

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



TESIS DOCTORAL

Realización de escala de medida de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) en el rango espectral del infrarrojo cercano

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Néstor Tejedor Sierra

DIRECTORES

Joaquín Campos Acosta,
Alejandro Ferrero Turrión

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Óptica y Optometría



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

**Realización de escala de medida de la función de
distribución de reflectancia bidireccional (BRDF)
en el rango espectral del infrarrojo cercano**

Néstor Tejedor Sierra

Directores:

Joaquín Campos Acosta,
Alejandro Ferrero Turrión

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Óptica y Optometría

Programa de Doctorado en Óptica, Optometría y Visión



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

**Realización de escala de medida de la función de
distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) en el
rango espectral del infrarrojo cercano**

Néstor Tejedor Sierra

Directores:

Joaquín Campos Acosta,
Alejandro Ferrero Turrión

Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Madrid, España, 2025

*A Cristina y a mis padres,
por su cariño, comprensión y apoyo en los momentos más difíciles.*

*A mis directores,
por su guía y enseñanzas, fundamentales en mi formación como doctor.*

*Y por último,
a quien no confía en sus capacidades.*

Agradecimientos

Esta tesis ha sido realizada en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IO-CSIC), al cual quiero agradecer permitirme utilizar sus instalaciones para el desarrollo de la tesis, así como los materiales y medios proporcionados durante toda la etapa predoctoral. Quiero agradecer también al programa de ayudas para contratos de Personal Técnico de Apoyo (PTA) 2019, de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, cuyo soporte económico fue esencial en esta etapa académica; y a los proyectos que han financiado las actividades llevadas a cabo durante este trabajo, como el European Regional Development Fund y la Agencia Estatal de Investigación (PGC2018-096470-B-I00, TED2021-129661B-C21). Por último, gracias al programa de doctorado en Óptica, Optometría y Visión de la Universidad Complutense de Madrid, por ofrecerme la oportunidad de desarrollar esta tesis.

Aprecio enormemente el acompañamiento de mis directores, a Joaquín por la paciencia, respeto y cordialidad, y a Alejandro por su entrega, exigencia y cercanía. También agradecer a mis compañeros y amigos de despacho y del ITEFI, especialmente a Pablo, Miguel y Jose Luis. Gracias de corazón por el apoyo, los momentos compartidos, consejos y debates profundos que han hecho el viaje un poco menos difícil y de una manera u otra han influido en mi desarrollo personal y profesional.

Gracias al personal del Instituto de Óptica, y también a mis compañeros del grupo de doctorandos de IOPTICA por esa pequeña etapa tan especial que me ha hecho valorar un poco más la divulgación científica. Gracias también a los profesores y compañeros del Grado en Óptica y Optometría del Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía de la Universidad de Alicante, que me acogieron después de la finalización de mi contrato con el CSIC y durante la escritura de la tesis doctoral.

Por último quiero agradecer el apoyo de mis amigos y de mis familiares, mención especial a la enorme paciencia y el cariño de mi mujer, mis padres y mi hermana, que han sabido soportarme en los momentos más duros del recorrido, y con la esperanza de que esta etapa finalizase pronto.

Madrid, Julio de 2025

Índice general

Índice de figuras	v
Índice de tablas	xiii
Lista de símbolos	xvii
Siglas y acrónimos	xxvii
Resumen	xxix
Abstract	xxxI
1. Fundamentos y metodología	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivo	3
1.4. Fundamentos	4
2. Ampliación y mejora del gonio-espectrofotómetro GEFE	7
2.1. Descripción del instrumento	8
2.1.1. Ampliación del sistema de irradiación	10
2.1.2. Mejora del sistema de posicionamiento	14
2.1.3. Ampliación del sistema de detección	15
2.2. Sistemas de referencia geométricos	16
2.3. Sistema auxiliar de alineamiento	18

3. Determinación del coeficiente de radiancia 0°:45°	21
3.1. Ecuación de medida	22
3.2. Caracterización de los coeficientes de corrección	23
3.2.1. Corrección espectral C_λ	23
3.2.2. Coeficiente de corrección de la no linealidad C_{NL}	29
3.2.2.1. Procedimiento experimental	30
3.2.2.2. Ecuación de medida de la linealidad y propagación de incertidumbres	35
3.2.2.3. Resultados	36
3.3. Descripción de las muestras a caracterizar	38
3.4. Montaje experimental para la medida del RC 0°:45°	40
3.5. Caracterización de las variables geométricas	44
3.5.1. Coseno del ángulo polar de reflexión	44
3.5.2. Ángulo sólido de reflexión	45
3.6. Resultados del RC	45
3.6.1. RC ponderado e incertidumbre asociada	51
3.6.2. Validación de los resultados del RC	53
4. Realización de la escala de BRDF	57
4.1. Ecuación de medida	58
4.2. Caracterización del sistema	61
4.2.1. Espectrorradiómetro NIR	61
4.2.1.1. Caracterización espacial	62
4.2.1.2. Calibración en longitud de onda	63
4.2.1.3. Aplicación del algoritmo de alto rango dinámico	66
4.2.1.4. Calibración de la linealidad	69
4.2.1.5. Caracterización de la repetitividad	76
4.2.1.6. Caracterización del error residual de descentramiento	78
4.2.2. Uniformidad del área irradiada	79
4.2.3. Uniformidad de los patrones de reflectancia	81
4.3. Procedimiento experimental	85
4.4. Resultados de la BRDF relativa	88

5. Resultados de la escala de BRDF	91
5.1. Dependencia espectral de la BRDF	93
5.2. Dependencia angular de la BRDF	110
5.3. Validación de los resultados	115
5.3.1. Principio de reciprocidad de Helmholtz	115
5.3.2. Cálculo de la reflectancia $0^\circ:d$	118
5.3.3. Intercomparación de la BRDF (CSIC-PTB)	121
Conclusiones	125
Bibliografía	127
ANEXOS	134
A. Selección de la lente de inyección de la radiación en el monocromador (L0)	135
B. Valores del RC $0^\circ:45^\circ$ e incertidumbres tipo A implicadas en el cálculo de la ecuación	139
C. Valores de BRDF relativa e incertidumbre asociada	159
D. Valores de BRDF e incertidumbre asociada	161

Índice de figuras

1.1.	Variables usadas en la definición de la BRDF sobre una superficie imaginaria.	5
2.1.	Vista general del gonio-espectrofotómetro GEFE ampliado.	8
2.2.	Esquema del gonio-espectrofotómetro ampliado. En la parte superior se muestra una vista de la planta, mientras que en la inferior se muestra el alzado. Los elementos que lo componen están identificados en la propia figura.	9
2.3.	Esquema de funcionamiento de la lámpara LDLS.	10
2.4.	Distribución espectral normalizada al máximo para las fuentes LDLS y lámpara de xenón, respectivamente.	11
2.5.	Transmitancia medida de las lentes involucradas en las configuraciones del sistema de irradiación del gonio-espectrofotómetro.	13
2.6.	Brazo robot del conjunto de posicionamiento.	14
2.7.	Elementos que componen cada conjunto de sujeción de las muestras para el brazo robot del GEFE: succión (a) y sujeción mecánica (b).	14
2.8.	Conjuntos de sujeción de las muestras para el brazo robot montados en el GEFE: succión (a) y sujeción mecánica (b).	15
2.9.	Esquema de los sistemas de coordenadas global y de la muestra.	17
2.10.	Sistema auxiliar de alineamiento con las cuatro aperturas y los dos láseres orientados para definir el centro del anillo, centro de giro de la plataforma de detección. $\phi_A = 0^\circ$ es la dirección del eje óptico.	18
2.11.	Realización del eje óptico para el alineamiento del sistema de irradiación sobre la muestra.	19
3.1.	Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 0.5 mm.	26
3.2.	Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 1 mm.	26
3.3.	Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 2 mm.	26

3.4.	Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1014.6 nm.	27
3.5.	Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1268.3 nm.	27
3.6.	Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1521.9 nm.	27
3.7.	Esquema del montaje experimental empleado para caracterizar la linealidad del fotodiodo de InGaAs.	30
3.8.	Transmitancia espectral de los filtros montados en FW y FW2 y empleados para atenuar la señal.	32
3.9.	Transmitancia espectral de los filtros presentes en FL y empleados para atenuar la señal.	32
3.10.	Respuesta espectral del fotodiodo normalizada al valor máximo para los niveles impares de atenuación y algunas longitudes de onda.	34
3.11.	SNR en función de la señal correspondiente al flujo transmitido por el filtro de referencia para cuatro longitudes de onda evaluadas: 900 nm, 1100 nm, 1300 nm y 1500 nm.	34
3.12.	Coefficiente de no linealidad espectral frente a la señal transmitida para cuatro longitudes de onda evaluadas: 900 nm, 1100 nm, 1300 nm y 1500 nm.	37
3.13.	Incertidumbre combinada frente a la señal incidente para las cuatro longitudes de onda evaluadas.	38
3.14.	Patrón de reflectancia cerámico AH14.	39
3.15.	Ejemplares de cada tipo de muestra que va a ser caracterizada como patrón del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ en este trabajo, de izquierda a derecha: G97, AW1 y ZP1.	40
3.16.	Esquema de la configuración del gonio-espectrofotómetro GEFE para la posición de registro del flujo incidente en la medida del coeficiente de radiancia a la geometría de referencia $0^\circ:45^\circ$	42
3.17.	Esquema de la configuración del sistema GEFE para la medida del flujo reflejado a la geometría de referencia $0^\circ:45^\circ$	43
3.18.	Coefficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón G97.	47
3.19.	Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra G97, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.	47

3.20. Coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón AW1.	48
3.21. Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra AW1, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.	48
3.22. Coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón ZP1.	49
3.23. Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra ZP1, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.	49
3.24. RC ponderado e incertidumbre expandida asociada $k = 2$ para cada muestra.	52
3.25. Incertidumbre realtiva expandida $k = 2$ del RC ponderado para cada muestra.	52
3.26. RC $0^\circ:45^\circ$ obtenido para Lambda 9 y GEFÉ, y para el patrón G97. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.	54
3.27. RC $0^\circ:45^\circ$ obtenido para Lambda 9 y GEFÉ, y para el patrón AW1. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.	54
3.28. RC $0^\circ:45^\circ$ obtenido para Lambda 9 y GEFÉ, y para el patrón ZP1. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.	55
3.29. Diferencia normalizada calculada entre las medidas del RC para GEFÉ y Lambda 9, y para los patrones G97, AW1 y ZP1.	55
4.1. Irradiancia de la imagen sobre el sensor de un dispositivo de detección con sistema óptico acoplado.	59
4.2. Imagen del patrón de franjas registrada por el espectrorradiómetro. La barra de color representa el nivel de señal en cuentas (saturación a 4095 cuentas, 12 bits).	62
4.3. Distribuciones de respuesta espectral correspondientes a cada lámpara espectral evaluada.	64
4.4. Ajuste obtenido para la relación entre las líneas de emisión de referencia y los canales de respuesta espectral del espectrorradiómetro correspondientes.	65
4.5. Adquisiciones registradas en el procedimiento de alto rango dinámico empleado para tiempos de integración de 500 ms (a), 125 ms (b), 31 ms (c) y 8 ms (d).	67
4.6. Espectro compuesto a partir de las adquisiciones HDR mostradas previamente en la Fig.4.5. Nótese que la señal de cada canal espectral se ha obtenido con el tiempo de integración más apropiado a su valor.	68

4.7.	Respuesta compuesta a partir de las adquisiciones previas mostradas expresada como el cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración.	69
4.8.	Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro frente al tiempo de integración para las longitudes de onda mencionadas, manteniendo constante la radiancia del objeto.	71
4.9.	Cociente entre la respuesta y el tiempo de integración, normalizado a 200 cuentas, del espectrorradiómetro frente al número de cuentas digitales para los tiempos de integración utilizados. Los datos de cada longitud de onda se diferencian de los demás por el símbolo y el color.	72
4.10.	Ajuste polinómico de segundo grado del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración frente al número de cuentas digitales, excluidos los valores menores que 500 cuentas y mayores que 3600.	73
4.11.	Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración frente al número de cuentas digitales tras efectuar el ajuste.	73
4.12.	Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración frente al tiempo de integración tras efectuar el ajuste.	74
4.13.	Transmitancia normalizada frente al cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración ya corregido de no linealidad para cuatro niveles de radiancia evaluados.	75
4.14.	Desviación típica para cada conjunto de adquisiciones HDR en función del número de repeticiones registrado (a) y frecuencia de aparición de cada valor del cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración para la adquisición de 25 repeticiones usando 12 intervalos de respuesta (b).	77
4.15.	Incertidumbre relativa del cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración en función de dicho cociente. Cada punto corresponde a una longitud de onda diferente. Cada color representa un nivel de radiancia diferente obtenido atenuando con filtros neutros de transmitancias nominales 10%, 1% y 0.01%	77
4.16.	Variación de la longitud registrada del haz sobre el plano de la muestra para tres ángulos polares de reflexión.	79
4.17.	Representación del descentramiento con la variación de θ_r . Las líneas rojas representan la longitud registrada por el espectrorradiómetro para el ángulo de 75° y 15°, respectivamente.	79
4.18.	Distribución espacial de irradiancia sobre el plano de la muestra registrada empleando un fotodiodo de InGaAs. Las zonas marcadas con línea discontinua indican las regiones seleccionadas para el cálculo de la uniformidad.	81

4.19. Uniformidad promedio de la zona irradiada de los patrones de reflectancia, que se ve afectada por las uniformidades tanto de irradiación en el plano de la muestra como de la distribución espacial de respuesta de los píxeles de la cámara.	82
4.20. Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones ZP1 (a) y ZP2 (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.	83
4.21. Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones AW1 (a) y AW2 (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.	84
4.22. Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones G97 (a) y G97p (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.	84
4.23. Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, del patrón AH14 que indica la homogeneidad del mismo. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.	85
4.24. Configuración del goniospectrofotómetro GEFE para la medida directa de la irradiancia en el plano de irradiación de las muestras en la medida de la BRDF relativa.	86
4.25. Configuración del sistema GEFE para la medida de la radiancia reflejada en la medida de la BRDF relativa.	87
4.26. Definición del plano de incidencia, así como de un semiplano de detección fuera del plano de incidencia.	88
4.27. Distribución espectral de la BRDF relativa de la muestra G97 para una dirección de incidencia y detección, $f_r(0^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 0^\circ)$	89
4.28. Distribución espectral de la incertidumbre relativa expandida de la BRDF relativa para la misma dirección de incidencia y detección anterior, $f_r(0^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 0^\circ)$	89
5.1. Incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF y sus contribuciones a la incertidumbre, también expresadas como incertidumbre relativa expandida $k = 2$, para la muestra G97 y la geometría de medida $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$	92
5.2. BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AH14.	94
5.3. BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AH14.	95

5.4.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AW1.	96
5.5.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AW1.	97
5.6.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AW2.	98
5.7.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AW2.	99
5.8.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón G97.	100
5.9.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón G97.	101
5.10.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón G97p.	102
5.11.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón G97p.	103
5.12.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón ZP1.	104
5.13.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón ZP1.	105
5.14.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón ZP2.	106
5.15.	BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón ZP2.	107
5.16.	Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 30^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.	108
5.17.	Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 45^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.	108
5.18.	Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 60^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.	109
5.19.	Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 75^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.	109

5.20. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 0^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	111
5.21. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 15^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	111
5.22. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 30^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	112
5.23. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 45^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	112
5.24. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 60^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	113
5.25. Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 75^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.	113
5.26. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas, y para el patrón AH14.	116
5.27. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón AW1.	116
5.28. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón AW2.	116
5.29. Diferencia normalizada en función de λ para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón G97.	117
5.30. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón G97p.	117

5.31. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón ZP1.	117
5.32. Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón ZP2.	118
5.33. Reflectancia normal hemisférica 0°:d para cada una de las muestras medidas.	119
5.34. Reflectancia normal hemisférica 0°:d medida en GEFE y 8°:di medida con esfera integradora para el patrón AW1. La incertidumbre típica expandida $k = 2$ se representa en las barras de error para cada medida.	120
5.35. Reflectancia normal hemisférica 0°:d medida en GEFE y 8°:di medida con esfera integradora para el patrón ZP2. La incertidumbre típica expandida $k = 2$ se representa en las barras de error para cada medida.	120
5.36. Diferencia normalizada calculada entre las medidas de reflectancia 8°:di y 0°:d para los patrones AW1 y ZP2.	121
5.37. Coeficiente de radiancia 0°:45° e incertidumbres expandidas asociadas $k = 2$ medidos por el PTB y el CSIC para la muestra AH14.	122
5.38. Diferencia normalizada calculada entre los datos del RC 0°:45° del PTB y el CSIC para el patrón AH14.	122
A.1. Distancias objeto e imagen en función de la distancia focal, así como el diámetro del haz sobre la lente.	137

Índice de tablas

2.1.	Especificaciones más relevantes de la fuente con la lámpara de xenón. . . .	12
2.2.	Especificaciones más relevantes de la fuente LDLS.	12
2.3.	Especificaciones más relevantes del espectrorradiómetro de infrarrojo. . . .	16
2.4.	Especificaciones más relevantes para la cámara infrarroja.	16
3.1.	Valores de la longitud de onda de referencia y corrección espectral para diferentes anchuras de la rendija de entrada. Se indica la lámpara espectral, así como el orden de difracción de sus líneas de emisión usadas.	24
3.2.	Valores de anchura de banda en función de la anchura de la rendija de salida para tres longitudes de onda correspondientes a distintos órdenes de líneas de una lámpara de lápiz de Hg.	28
3.3.	Grado de atenuación nominal de la irradiancia con respecto al primer nivel.	33
3.4.	Factores de calibración del picoamperímetro y su incertidumbre típica, en el rango de medida usado en esta tesis.	33
3.5.	Valores e incertidumbres para el cálculo de $\cos \theta_r$	44
3.6.	Variables e incertidumbres típicas de los parámetros involucradas en el cálculo de ω_r y su incertidumbre.	45
3.7.	RC ponderado e incertidumbre expandida asociada $k = 2$, para las tres muestras evaluadas.	53
4.1.	Líneas de emisión escogidas y su canal espectral de máxima respuesta para las lámparas evaluadas.	65
4.2.	Valores de cada parámetro de la ecuación de ajuste.	65
4.3.	Parámetros obtenidos tras el ajuste.	73
4.4.	Incertidumbre calculada para los intervalos de respuesta.	78
4.5.	Valores de uniformidad de los patrones.	85
4.6.	Configuración de los ángulos polares, para $\phi_r = 0^\circ$ y $\phi_r = 180^\circ$, empleados en la caracterización de la BRDF.	88
5.1.	Índice para las geometrías empleadas en la medida de la BRDF, en función de las direcciones polares y azimutales de incidencia y reflexión. Nótese que la dirección azimutal de incidencia no se indica, ya que tiene un único valor, 0°	108

5.2.	Desviación típica de la BRDF a la longitud de onda de 1300 nm para el conjunto de geometrías correspondientes a cada ángulo de incidencia θ_i , así como el índice de no-lambertianidad, definido como la desviación típica de los valores anteriores.	114
B.1.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el primer ciclo de medida.	140
B.2.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el primer ciclo de medida.	141
B.3.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el segundo ciclo de medida.	142
B.4.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el segundo ciclo de medida.	143
B.5.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el tercer ciclo de medida.	144
B.6.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el tercer ciclo de medida.	145
B.7.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el primer ciclo de medida.	146
B.8.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el primer ciclo de medida.	147
B.9.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el segundo ciclo de medida.	148
B.10.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el segundo ciclo de medida.	149
B.11.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el tercer ciclo de medida.	150
B.12.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el tercer ciclo de medida.	151
B.13.	Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el primer ciclo de medida.	152
B.14.	Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el primer ciclo de medida.	153

B.15. Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el segundo ciclo de medida.	154
B.16. Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el segundo ciclo de medida.	155
B.17. Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el tercer ciclo de medida.	156
B.18. Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el tercer ciclo de medida.	157

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
A_a	Área de la apertura de precisión	m^2
A_F	Área de la emisión de la fuente LDLS	m^2
A_M	Área de la imagen sobre la rendija de entrada del monocromador	m^2
A_L	Área de la lente	m^2
A_p	Área de irradiación del píxel	m^2
C_{NL}	Coefficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta	-
$C_{NL,1}$	Coefficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta para el primer nivel de irradiación	-
$C_{NL,n}$	Coefficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta para el nivel de irradiación n	-
C_U	Coefficiente de corrección para las no uniformidades del espectrorradiómetro	-
C_λ	Corrección espectral	A
$C_{\lambda,r}$	Corrección espectral para la configuración de reflexión	A
$C_{\lambda,i}$	Corrección espectral para la configuración de incidencia	A
C_Φ	Coefficiente de corrección del flujo radiante	-
d_c	Distancia entre la muestra y la apertura de precisión del detector	m
dA	Elemento diferencial de área	m^2
dA_0	Elemento diferencial de área para el plano de la muestra	m^2
dA_1	Elemento diferencial de área para el plano del sensor	m^2
dE_i	Elemento diferencial de irradiancia incidente	W/m^2
dL_r	Elemento diferencial de radiancia reflejada	W/m^2sr
$d\theta_r$	Diferencial del ángulo polar de reflexión	rad
$d\phi_r$	Diferencial del ángulo azimutal de reflexión	rad
$d\Omega_r$	Diferencial del ángulo sólido de reflexión proyectado	rad

Símbolo	Descripción	Unidad
$d\omega_i$	Diferencial del ángulo sólido de incidencia	rad
$d\omega_r$	Diferencial del ángulo sólido de reflexión	rad
D_n	Diferencia normalizada	-
E_i	Irradiancia incidente	W/m ²
E_L	Irradiancia sobre la lente L0	W/m ²
E_M	Irradiancia sobre la rendija de entrada del monocromador	W/m ²
f	Distancia focal	m
f_r	Función de distribución de reflectancia bidireccional	sr ⁻¹
$f_{r,k}$	Función de distribución de reflectancia bidireccional para la geometría k	sr ⁻¹
$f_{r,rel}$	Función de distribución de reflectancia bidireccional relativa	-
$f_{r,CSIC}$	Función de distribución de reflectancia bidireccional para el CSIC	sr ⁻¹
$f_{r,PTB}$	Función de distribución de reflectancia bidireccional para el PTB	sr ⁻¹
F_{cal}	Factor de calibración del picoamperímetro	-
$F_{cal,i}$	Factor de calibración del picoamperímetro para la señal incidente	-
$F_{cal,i,1}$	Factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el primer nivel de flujo radiante	-
$F_{cal,i,n}$	Factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el nivel de flujo radiante n	-
$F_{cal,r}$	Factor de calibración del picoamperímetro para para la respuesta del fotodiodo al flujo reflejado	-
$F_{cal,t,1}$	Factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el primer nivel de flujo radiante	-
$F_{cal,t,n}$	Factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el nivel de flujo radiante n	-
G	Términos geométricos	m ²
i_{nlb}	Índice de no-lambertianidad	sr ⁻¹
l_m	Longitud medida de la estructura periódica	m

Símbolo	Descripción	Unidad
l_{px}	Longitud observada por el píxel	m
L_0	Radiancia del plano de la muestra	W/m ² sr
L_F	Radiancia de la fuente	W/m ² sr
L_i	Radiancia incidente	W/m ² sr
$L_{i,n}$	Radiancia incidente para el nivel de radiancia n	W/m ² sr
L_r	Radiancia reflejada	W/m ² sr
$L_{r,\text{PRD}}$	Radiancia del difusor perfecto	W/m ² sr
$L_{r,\text{ref}}$	Radiancia reflejada del patrón empleado como referencia	W/m ² sr
$L_{t,n}$	Radiancia transmitida para el nivel de radiancia n	W/m ² sr
n_0	Índice de refracción para el medio 0	-
n_1	Índice de refracción para el medio 1	-
n_m	Número de píxeles de la estructura sobre la imagen	-
n_{rep}	Número de repeticiones	-
$n_{\text{rep},0}$	Número de repeticiones en oscuridad	-
N	Respuesta del espectrorradiómetro	-
$N_{0:45}$	Respuesta del espectrorradiómetro para la condición 0°:45°	-
N_1	Respuesta del espectrorradiómetro para la primera adquisición	-
N_2	Respuesta del espectrorradiómetro para la segunda adquisición	-
$N_{i,n}$	Respuesta del espectrorradiómetro para la configuración de incidencia y la adquisición n	-
N_n	Respuesta del espectrorradiómetro para la para la adquisición n	-
N_r	Respuesta del espectrorradiómetro para la condición reflejada	-
$N_{t,n}$	Respuesta del espectrorradiómetro para la configuración de transmisión y la adquisición n	-
N/t_{int}	Cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro	s ⁻¹
$N_r/t_{\text{int},r}$	Cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro para la condición reflejada	s ⁻¹
$N_{0:45}/t_{\text{int},0:45}$	Cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro para la geometría 0°:45°	s ⁻¹
M	Aumento lateral	-
q	Coefficiente de radiancia	sr ⁻¹

Símbolo	Descripción	Unidad
$q_{0:45}$	Coficiente de radiancia 0°:45°	sr ⁻¹
$\bar{q}_{0:45}$	Coficiente de radiancia 0°:45°ponderado	sr ⁻¹
$q_{0:45,ref}$	Coficiente de radiancia 0°:45° del patrón empleado como referencia	sr ⁻¹
$\bar{q}_{0:45}(GEFE)$	Coficiente de radiancia 0°:45°ponderado medido en el gonioespectrofotómetro español	sr ⁻¹
$q_{0:45}(L9)$	Coficiente de radiancia 0°:45°medido en el espectrofotómetro Lambda 9	sr ⁻¹
r_{AM}	Cociente de las áreas para los casos AN y 1:1	-
r_E	Cociente de las irradiancias sobre la rendija de entrada del monocromador	-
r_ϕ	Cociente de los flujos sobre la rendija de entrada del monocromador	-
R	Factor de Radiancia	-
$R_{0:d}$	Factor de Radiancia 0°:difusa	-
$R_{8:di}$	Factor de Radiancia 8°:difusa (incluye la dirección especular)	-
s	Distancia objeto	m
s'	Distancia imagen	m
s_{rep}	Respuesta para la de señal de repetición	-
s_{sat}	Respuesta para la señal de saturación	-
S	Señal neta del fotodiodo	A
S_i	Señal neta incidente	A
$S_{i,1}$	Respuesta del fotodiodo para la señal incidente y el primer nivel de flujo radiante	A
$S_{i,n}$	Respuesta del fotodiodo para la señal incidente y el nivel de flujo radiante n	A
$S_{mon,0:45}$	Señal del monitor para la condición 0°:45°	A
$S_{mon,i}$	Señal del monitor para la situación de incidencia	A
$S_{mon,r}$	Señal del monitor para la situación de reflexión	A
S_r	Señal neta reflejada	A
$S_{t,1}$	Respuesta del fotodiodo para la señal transmitida y el primer nivel de flujo radiante	A
$S_{t,n}$	Respuesta del fotodiodo para la señal transmitida y el nivel de flujo radiante n	A
t_{int}	Tiempo de integración del espectrorradiómetro	s

Símbolo	Descripción	Unidad
$t_{\text{int},0:45}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la condición $0^\circ:45^\circ$	s
$t_{\text{int},1}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la primera adquisición	s
$t_{\text{int},2}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la segunda adquisición	s
$t_{\text{int},i,n}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la configuración de incidencia y la adquisición n	s
$t_{\text{int},n}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la adquisición n	s
$t_{\text{int},r}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la condición reflejada	s
$t_{\text{int},t,n}$	Tiempo de integración del espectrorradiómetro para la configuración de transmisión y la adquisición n	s
$u(A_a)$	Incertidumbre típica del área de la apertura de precisión	m ²
$u(\cos \theta_i)$	Incertidumbre típica del coseno del ángulo polar de incidencia	rad
$u(\cos \theta_r)$	Incertidumbre típica del coseno del ángulo polar de reflexión	rad
$u(C_{\text{NL}})$	Incertidumbre típica del coeficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta	-
$u(C_{\text{NL},n})$	Incertidumbre típica del coeficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta para el nivel de irradiación n	-
$u(C_{\text{U}})$	Incertidumbre típica del coeficiente de corrección de las no-uniformidades para el espectrorradiómetro	-
$u(C_{\Phi})$	Incertidumbre típica del coeficiente de corrección del flujo radiante	-
$u(d_c)$	Incertidumbre típica de la distancia entre la muestra y la apertura de precisión del detector	m
$u(f_r)$	Incertidumbre típica de la función de distribución de reflectancia bidireccional	sr ⁻¹
$u(f_{r,\text{rel}})$	Incertidumbre típica de la función de distribución de reflectancia bidireccional relativa	-
$u(F_{\text{cal}})$	Incertidumbre típica para el factor de calibración del picoamperímetro	-

Símbolo	Descripción	Unidad
$u(F_{\text{cal},i})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente	-
$u(F_{\text{cal},i,1})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el primer nivel de flujo radiante	-
$u(F_{\text{cal},i,n})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el nivel de flujo radiante n	-
$u(F_{\text{cal},r})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo reflejado	-
$u(F_{\text{cal},t,1})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el primer nivel de flujo radiante	-
$u(F_{\text{cal},t,n})$	Incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el nivel de flujo radiante n	-
$u(l_{\text{px}})$	Incertidumbre típica de la longitud observada por el píxel	m
$u(N_{0:45}/t_{\text{int},0:45})$	Incertidumbre típica del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro para la geometría $0^\circ:45^\circ$	s^{-1}
$u(N_{\text{r}}/t_{\text{int},\text{r}})$	Incertidumbre típica del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro para la configuración de reflexión	s^{-1}
$u(q_{0:45})$	Incertidumbre típica del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$	sr^{-1}
$u(\bar{q}_{0:45})$	Incertidumbre típica del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ ponderado	sr^{-1}
$u(S)$	Incertidumbre típica de la señal neta del fotodiodo	A
$u(S_0)$	Incertidumbre típica de la señal de oscuridad	A
$u(S_i)$	Incertidumbre típica de la señal neta incidente	A
$u(S_{i,1})$	Incertidumbre típica de la señal incidente para el primer nivel de flujo radiante	A
$u(S_{i,n})$	Incertidumbre típica de la señal incidente para el nivel de flujo radiante n	A
$u(S_{\text{r}})$	Incertidumbre típica de la señal neta reflejada	A

Símbolo	Descripción	Unidad
$u(S_{t,1})$	Incertidumbre típica de la señal transmitida para el primer nivel de flujo radiante	A
$u(S_{t,n})$	Incertidumbre típica de la señal transmitida para el nivel de flujo radiante n	A
$u(\bar{x}_p)$	Incertidumbre típica del parámetro que representa el coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ ponderado en función de la muestra	sr^{-1}
$u(\omega_r)$	Incertidumbre típica del ángulo sólido de reflexión	sr
$u(\theta_r)$	Incertidumbre típica del ángulo polar de reflexión	rad
$u_r(C_{NL,n})$	Incertidumbre relativa típica del coeficiente de corrección de la no-linealidad de respuesta para el nivel de irradiación n	-
$u_r(F_{cal,i,1})$	Incertidumbre relativa típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el primer nivel de flujo radiante	-
$u_r(F_{cal,i,n})$	Incertidumbre relativa típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo incidente y para el nivel de flujo radiante n	-
$u_r(F_{cal,t,1})$	Incertidumbre relativa típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el primer nivel de flujo radiante	-
$u_r(F_{cal,t,n})$	Incertidumbre relativa típica del factor de calibración del picoamperímetro para la respuesta del fotodiodo al flujo transmitido y para el nivel de flujo radiante n	-
$u_r(f_r)$	Incertidumbre relativa típica de la función de distribución de reflectancia bidireccional	-
$u_r(f_{r,rel})$	Incertidumbre típica relativa de la función de distribución de reflectancia bidireccional relativa	-
$u_r(N/t_{int})$	Incertidumbre típica relativa del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro	-
$u_r(q_{0:45})$	Incertidumbre típica relativa del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$	-
$u_r(S_{i,1})$	Incertidumbre relativa típica de la señal incidente para el primer nivel de flujo radiante	-
$u_r(S_{i,n})$	Incertidumbre relativa típica de la señal incidente para cada nivel de flujo radiante	-

Símbolo	Descripción	Unidad
$u_r(S_{t,1})$	Incertidumbre relativa típica de la señal transmitida para el primer nivel de flujo radiante	-
$u_r(S_{t,n})$	Incertidumbre relativa típica de la señal transmitida para cada nivel de flujo radiante	-
$u_{res}(l_m)$	Incertidumbre de la resolución para la longitud medida de la estructura periódica	m
$u_{res}(n_m)$	Incertidumbre de la resolución para el número de píxeles de la estructura sobre la imagen	-
$u_{res}(S)$	Incertidumbre de la resolución para la señal del fotodiodo	A
$u_{res}(S_0)$	Incertidumbre de la resolución para la señal de oscuridad del fotodiodo	A
$U(f_r)$	Incertidumbre expandida de la función de distribución de reflectancia bidireccional	sr ⁻¹
$U(f_{r,CSIC})$	Incertidumbre expandida de la función de distribución de reflectancia bidireccional para el CSIC	sr ⁻¹
$U(f_{r,PTB})$	Incertidumbre expandida de la función de distribución de reflectancia bidireccional para el PTB	sr ⁻¹
$U(\bar{q}_{0:45})$	Incertidumbre expandida del coeficiente de radiancia 0°:45° ponderado	sr ⁻¹
$U(\bar{q}_{0:45}(GEFE))$	Incertidumbre expandida del coeficiente de radiancia 0°:45° ponderado medido en el goniospectrofotómetro español	sr ⁻¹
$U(q_{0:45}(L9))$	Incertidumbre expandida del coeficiente de radiancia 0°:45° medido en el espectrofotómetro Lambda 9	sr ⁻¹
$U(R_{0:d})$	Incertidumbre expandida del factor de radiancia 0°:difusa	-
$U(R_{8:di})$	Incertidumbre expandida del factor de radiancia 8°:difusa (incluye la dirección especular)	-
$w_{n,p}$	Parámetro para la ponderación que representa la inversa de la incertidumbre típica del coeficiente de radiancia 0°:45° en función del número de medición y la muestra	sr
$x_{n,p}$	Parámetro para la ponderación que representa el coeficiente de radiancia 0°:45° en función del número de medición y la muestra	sr ⁻¹
x_{dh}	Distancia en el eje de abscisas al centro de coordenadas para el descentramiento del espectrorradiómetro	m
\bar{x}_p	Parámetro que representa el coeficiente de radiancia 0°:45° ponderado en función de la muestra	sr ⁻¹

Símbolo	Descripción	Unidad
y_{dh}	Diferencia en la longitud vertical de la irradiación sobre la muestra registrada por el espectrorradiómetro y debida al descentramiento de este	m
α_x	Rotación respecto al eje X	rad
α_y	Rotación respecto al eje Y	rad
α_z	Rotación respecto al eje Z	rad
β	Factor de radiancia	-
$\delta\lambda$	Corrección espectral	nm
$\Delta\theta_{r,k}$	Diferencia angular polar de reflexión para la geometría k	rad
ε_0	Semiángulo que abarca desde la superficie A_0 a la lente del sistema óptico del elemento de detección	rad
ε_1	Semiángulo subtendido desde la superficie A_1 a la lente del sistema óptico del elemento de detección	rad
θ_i	Ángulo polar de incidencia	rad
θ_r	Ángulo polar de reflexión	rad
λ	Longitud de onda	nm
λ_{ref}	Longitud de onda de referencia	nm
τ	Transmitancia del filtro de referencia	-
τ_1	Transmitancia del filtro de referencia medida en el primer nivel de irradiación	-
τ_L	Transmitancia de la lente L0	-
τ_n	Transmitancia del filtro de referencia medida en cada nivel de irradiación	-
ϕ_i	Ángulo azimutal de incidencia	rad
ϕ_r	Ángulo azimutal de reflexión	rad
ϕ_A	Desplazamiento de la plataforma sobre el carril	rad
Φ	Flujo	W
Φ_F	Flujo emitido por la fuente	W
Φ_M	Flujo emitido sobre la rendija de entrada del monocromador	W
Φ_i	Flujo incidente	W
Φ_r	Flujo reflejado	W
Φ_t	Flujo transmitido	W
ω_i	Ángulo sólido de incidencia	sr
ω_r	Ángulo sólido de reflexión	sr

Símbolo	Descripción	Unidad
$\Omega_{AN,1:1}$	Ángulo sólido proyectado por la lente para los casos AN y 1:1	sr
\mathfrak{R}	Responsividad del espectrorradiómetro	sr/W s
\mathfrak{R}_i	Responsividad del fotodiodo para la configuración de incidencia	A/W
$\mathfrak{R}_{i,n}$	Responsividad del espectrorradiómetro para la configuración de incidencia y la adquisición n	m ² sr/W s
$\mathfrak{R}_{0:45}$	Responsividad del espectrorradiómetro para la condición 0°:45°	sr/W s
\mathfrak{R}_r	Responsividad del fotodiodo para la configuración de reflexión (CAP.3)	A/W
\mathfrak{R}_r	Responsividad del espectrorradiómetro para la configuración de reflexión (CAP.4)	sr/W s
\mathfrak{R}_t	Responsividad del fotodiodo para la configuración de transmisión	A/W
$\mathfrak{R}_{t,n}$	Responsividad del espectrorradiómetro para la configuración de transmisión y la adquisición n	m ² sr/W s
\varnothing_{haz}	Diámetro del haz sobre la lente L0	m

Siglas y acrónimos

BRDF *Bidirectional Reflectance Distribution Function/ Función de distribución de reflectancia bidireccional*

CEM *Centro Español de Metrología*

CIE *Commission Internationale de L'éclairage/ Comisión Internacional de la Iluminación*

CSIC *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

DSR *Differential Spectral Responsivity/ Responsividad espectral diferencial*

ECV *Essential Climate Variable/ Variable Climática Esencial*

FPA *Focal-plane array / Conjunto de plano focal*

FWHM *Full Width Half Maximum / Anchura a media altura*

GEFE *Gonio Espectrofotómetro Español*

GUM *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición*

HDR *High Dynamic Range/ Alto Rango Dinámico*

InGaAs *Arseniuro de Indio y Galio*

LDLS *Laser-Driven Light Sources / Fuentes de luz conducidas por láser*

NIR *Near Infrared/ Infrarrojo cercano*

PRD *Perfect Radiant Diffuser/ Difusor Radiante Perfecto*

PTB *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*

PTFE *Polytetrafluoroethylene/ Politetrafluoroetileno*

RC *Radiance Coefficient/ Coeficiente de Radiancia*

SCG *Sistema de coordenadas global/ Global Coordinate System*

SCM *Sistema de coordenadas de la muestra/ Sample Coordinate System*

SNR *Signal-to-Noise Ratio/ Relación Señal Ruido*

Resumen

Esta tesis tiene como objetivo principal la obtención de una escala de BRDF (función de distribución de reflectancia bidireccional, por sus siglas en inglés) en el intervalo del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), comprendido entre 900 nm y 1700 nm. La BRDF describe cómo una superficie distribuye angularmente la radiación reflejada, y su conocimiento es esencial para determinar magnitudes como la reflectancia y el factor de reflectancia de superficies difusas, fundamentales en aplicaciones científicas e industriales. La realización de medidas radiométricas en el infrarrojo cercano es fundamental en muy diversas aplicaciones. Entre ellas, la mejora de la eficiencia energética empleando distintos materiales y la monitorización de las reservas hídricas son de gran interés en la actualidad debido al fenómeno conocido como cambio climático.

Dado que no existen actualmente suficientes datos fiables de materiales en esta región espectral, en parte por la ausencia de instrumentos con suficiente calidad metrológica, esta tesis contribuye a cubrir esa carencia mediante la implementación de una metodología de medida de la BRDF robusta y trazable al sistema internacional de unidades. Las medidas se realizan con el gonio-espectrofotómetro GEFE, desarrollado en el Instituto de Óptica del CSIC, que ha sido adaptado para operar en el NIR mediante la inclusión de una fuente LDLS (Laser Driven Light Source, por sus siglas en inglés), que por su alta radiancia espectral permite soslayar el límite de detección impuesto por la sensibilidad espectral de los detectores empleados. También se modifica el sistema GEFE para la realización de la medida de BRDF incluyendo en la instalación un fotodiodo InGaAs, un espectrorradiómetro de infrarrojo y una cámara infrarroja. Tras la actualización del sistema de irradiación y detección del GEFE, se posibilita la realización de medidas absolutas de BRDF en cualquier configuración geométrica, incluida la retrorreflexión.

El desarrollo de la escala consiste en aplicar un método absoluto para una geometría de medida y un método relativo para caracterizar la BRDF completa. Para el método relativo, se emplea el espectrorradiómetro NIR como detector, y se mide la BRDF relativa en un conjunto de posiciones de incidencia y reflexión. Con el método absoluto se determina el coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$, y se realiza con un fotodiodo InGaAs. La combinación de los resultados de ambos métodos permite obtener la BRDF absoluta de superficies difusoras.

Se mide el coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ de muestras altamente reflectantes y lam-

bertianas, previamente seleccionadas según la bibliografía y las opciones de mercado. Se desarrolla una ecuación de medida, se caracterizan los elementos radiométricos que intervienen en ella, y se analizan las contribuciones a la incertidumbre. La caracterización de los elementos incluye la linealidad del fotodiodo empleado en la medida del coeficiente de radiancia, que es evaluado en un intervalo amplio de respuesta.

El desarrollo de la escala se completa mediante la realización de medidas relativas de BRDF. Para esta medida se caracteriza la BRDF de un conjunto mayor de muestras: 4 de PTFE, dos de vidrio de alúmina y una cerámica. Una vez obtenidos los resultados de BRDF, se estudian sus distribuciones espectrales y angulares para seleccionar el conjunto de muestras más reflectantes y lambertianas que formarían la escala de BRDF.

Por último, se validan los resultados de BRDF a través de dos métodos internos y uno externo: para los métodos internos se calcula la reciprocidad de la reflectancia bidireccional para geometrías equivalentes, y se efectúa el cálculo del factor de reflectancia $0^\circ:d$, que es un caso particular de la reflectancia direccional-hemisférica. El método externo consistió en efectuar una intercomparación entre los resultados de BRDF obtenidos para el patrón de reflectancia cerámico, y los disponibles de su certificado de calibración, realizada por el PTB, instituto de metrología alemán.

Abstract

The main objective of this thesis is the development of a BRDF (bidirectional reflectance distribution function) scale in the near-infrared (NIR) spectral range, from 900 nm to 1700 nm. The BRDF describes how a surface distributes reflected radiation as a function of direction, and its knowledge is essential for determining quantities such as reflectance and the reflectance factor of diffuse surfaces, which are fundamental in both scientific and industrial applications. Radiometric measurements in the near-infrared are crucial for a wide range of applications. Among them, improving energy efficiency through the use of different materials and monitoring water reserves are currently of great interest due to the phenomenon known as climate change.

Given the current lack of reliable material data in this spectral region, partly due to the absence of instruments with sufficient metrological quality, this thesis contributes to addressing that gap by implementing a robust and traceable methodology for BRDF measurement, linked to the International System of Units. The measurements are performed using the GEFE goniospectrophotometer, developed at the Instituto de Óptica of the CSIC, which has been adapted to operate in the NIR through the inclusion of a Laser-Driven Light Source (LDLS). Its high spectral radiance allows overcoming the detection limits imposed by the spectral sensitivity of the detectors used. The GEFE system was also modified for BRDF measurements by incorporating an InGaAs photodiode, an infrared spectroradiometer, and an infrared camera into the setup. Following the upgrade of the GEFE's irradiation and detection system, it is now possible to perform absolute BRDF measurements in any geometric configuration, including retroreflection.

The development of the scale involves applying an absolute method for one measurement geometry and a relative method to characterize the full BRDF. For the relative method, the NIR spectroradiometer is used as a detector to measure the relative BRDF at a set of incidence and reflection angles. The absolute method determines the radiance coefficient at $0^\circ:45^\circ$, using an InGaAs photodiode. The combination of results from both methods enables the determination of the absolute BRDF of diffuse surfaces.

The radiance coefficient at $0^\circ:45^\circ$ is measured for highly reflective and Lambertian samples, previously selected based on literature and available commercial options. A measurement equation is developed, the radiometric elements involved are characterized, and contributions to uncertainty are analyzed. The characterization includes the linearity of

the photodiode used in the radiance coefficient measurement, evaluated over a wide response range.

The scale development is completed by performing relative BRDF measurements. For this, the BRDF of a broader set of samples is characterized: four PTFE samples, two alumina glass samples, and one ceramic. Once the BRDF results are obtained, their spectral and angular distributions are studied to select the most reflective and Lambertian samples to form the BRDF scale.

Finally, the BRDF results are validated through two internal methods and one external method. For the internal methods, the reciprocity of the bidirectional reflectance is assessed for equivalent geometries, and the $0^\circ:d$ reflectance factor is calculated, which is a particular case of directional-hemispherical reflectance. The external method consisted of an intercomparison between the BRDF results obtained for the ceramic reflectance standard and those provided in its calibration certificate, issued by PTB, the German national metrology institute.

Capítulo 1

Fundamentos y metodología

Contenido

1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivo	3
1.4. Fundamentos	4

1.1. Introducción

La relación entre el flujo radiante incidente y la parte del mismo que es reflejado por una superficie se denomina reflectancia. En general la reflexión de la radiación en una superficie se produce en distintas direcciones y con distinta intensidad en cada una de ellas. Esto depende de características propias de la superficie, como su índice de refracción y rugosidad, y de características propias de la radiación incidente. En la literatura se describen dos situaciones extremas en este sentido. Una, en la que la radiación reflejada se distribuye uniformemente en todas las direcciones, conocida como reflexión lambertiana, porque sigue la ley de Lambert. Ésta es una situación ideal y a las superficies que presentan esta reflexión se las conoce como difusores perfectos o lambertianos. En la otra, la radiación incidente que proviene de una única dirección se refleja también en una única dirección; denominada reflexión especular, ya que este fenómeno se produce típicamente en los espejos. Para cada una de ellas existen modelos físicos que estiman el flujo radiante reflejado en función de los parámetros geométricos del fenómeno: direcciones de incidencia

y observación, de las propiedades ópticas de la superficie (índice de refracción y rugosidad) y de las propiedades de la radiación incidente, tales como su distribución espectral y estado de polarización. Sin embargo, en la mayor parte de las superficies reales la reflexión se produce como una combinación en distinto grado de esas situaciones extremas.

El estudio de la reflexión en estas superficies se aborda a partir de la función de distribución bidireccional de la reflectancia, conocida como BRDF por sus siglas en inglés *Bidirectional Reflectance Distribution Function*. Esta función indica cómo se distribuye angularmente el flujo radiante reflejado en función de la distribución angular del flujo radiante incidente. Es una función de distribución experimental, pues no existe a día de hoy un modelo físico que explique el fenómeno de la reflexión en cualquier tipo de superficie, por lo que es necesario medirla para cada tipo de superficie. A partir de la BRDF se puede determinar la reflectancia global de una superficie o la parcial en distintas condiciones de incidencia y observación, lo que se denomina como factor de reflectancia [1,2], que son las magnitudes con las que se trabaja en la ciencia, la tecnología y la industria. Puesto que la geometría es una variable importante en el fenómeno de la reflexión, se han establecido unas condiciones geométricas de referencia para la medición de la reflectancia de forma que los valores se puedan comparar de forma clara, precisa y eficaz [1]. Por otra parte, y por esta misma razón, hay que prestar atención a los parámetros geométricos de los instrumentos de medida a la hora de medir la BRDF [3].

El infrarrojo cercano, conocido como NIR por sus siglas en inglés *near-infrared*, es una parte del espectro electromagnético de gran interés en la actualidad, no sólo por sí misma, sino también porque complementa la información que se obtiene en la región visible del espectro en distintas situaciones, como en aquellas en las que interviene el espectro solar [4]. La caracterización de la reflectancia de materiales en este intervalo espectral es de interés, por ejemplo, en la detección remota o la teledetección empleando satélites [5,6], porque a partir de ella se pueden determinar varias de las denominadas variables climáticas esenciales (ECV por sus siglas en inglés *Essential Climatic Variables*); en la evaluación de la eficiencia energética de los materiales empleados en la construcción de edificios [7,8], para determinar el grado de aislamiento térmico de los mismos; en la biometría [9], posibilitando el reconocimiento de patrones en condiciones de baja iluminación; o como asistencia a la cirugía en el ámbito médico [10], permitiendo la detección del tejido canceroso; entre otras aplicaciones [11,12]. En particular, la mejora de la eficiencia energética empleando distintos materiales y la monitorización de las reservas hídricas son dos aplicaciones de gran interés en la actualidad debido al fenómeno conocido como cambio climático.

1.2. Motivación

La necesidad de datos radiométricos en este intervalo de longitudes de onda ha motivado la investigación y el desarrollo de dispositivos de detección y medida que posibiliten

la caracterización de la reflectancia de materiales en condiciones adecuadas a cada situación. La medición de la reflectancia con estos dispositivos requiere siempre una superficie de referencia que tenga alta reflectancia en todo el intervalo espectral y que sea lo más próxima posible a una superficie lambertiana; es decir, un patrón de reflectancia. Con esta finalidad se han desarrollado distintos materiales, cada uno con sus matices según el compuesto con el que están hechos, que hacen que no sean igualmente deseables en cualquier aplicación [13–17]. El conocimiento de la distribución espectral y angular de la reflectancia de estos patrones con la menor incertidumbre posible es importante, puesto que fijan el límite inferior del valor de la incertidumbre para la medición que se realiza con los equipos en las distintas aplicaciones.

1.3. Objetivo

El grupo de investigación “Medidas de Radiación Óptica” del Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC tiene entre sus objetivos genéricos el desarrollo, mantenimiento y difusión de patrones de medida para el Laboratorio de Fotometría, Radiometría y Fibras Ópticas (Laboratorio Asociado al Centro Español de Metrología para las magnitudes relacionadas con la radiación óptica). Por ello, dado el interés de las medidas citadas anteriormente, se ha marcado como objetivo de esta tesis doctoral la realización de una escala propia de reflectancia y factor de reflectancia en el infrarrojo cercano. La realización de una escala metrológica se puede hacer mediante un dispositivo que cubra un rango de la magnitud (piénsese, por ejemplo, en una regla en el caso de la longitud), o con un dispositivo que consta de una muestra calibrada en uno o más puntos (patrón de referencia) y un método o instrumento que garantice la proporcionalidad de la respuesta frente a la magnitud de interés en un rango especificado. Este es el caso de las magnitudes de las que se ocupa esta tesis doctoral. Por tanto, esta tesis tiene dos objetivos: la realización de un instrumento de medida, un gonio-espectrofotómetro en este caso, y la realización de patrones de BRDF; es decir, la determinación de esa distribución en materiales difusores que presentan una distribución espectral relativamente constante y se aproximan al difusor perfecto. Con la consecución de los mismos se habrá realizado una escala de medida de reflectancia en el infrarrojo cercano que será independiente de las escalas de reflectancia en este intervalo espectral de otros países.

En el Instituto de Óptica se diseñó y construyó un gonio-espectrofotómetro para poder realizar esas mediciones de BRDF en el intervalo visible del espectro [18], que se conoce como GEFE (Gonio-Espectrofotómetro Español) y que permite realizar medidas absolutas de la BRDF espectral en cualquier geometría bidireccional de irradiación/colección, tanto dentro como fuera del plano de incidencia de la muestra, incluyendo la geometría donde la dirección de colección coincide con la de incidencia (retroreflexión real). En esta tesis se propone extender el intervalo espectral de medición del dispositivo al infrarrojo cercano,

en el que no existen muchos datos fiables de materiales por la ausencia de instrumentos de calidad metrológica suficiente para realizar estas medidas.

Esa ampliación no es una cuestión trivial ni inmediata, puesto que se necesita rediseñar el sistema de iluminación, así como el sistema de detección, que son dos de las tres partes básicas del instrumento. En el capítulo 2 de esta memoria se describe en detalle la ampliación del instrumento que se ha llevado a cabo en esta tesis doctoral.

1.4. Fundamentos

La función de distribución de reflectancia bidireccional, BRDF [1, 2], se define de la siguiente manera:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda, E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}; \quad (1.1)$$

siendo L_r la radiancia reflejada por la muestra, E_i la irradiancia sobre la misma, θ_i y θ_r los ángulos polares de las direcciones de incidencia y reflexión, respectivamente; ϕ_i y ϕ_r los ángulos azimutales de las direcciones de incidencia y reflexión, respectivamente; y λ la longitud de onda de la radiación incidente.

Para su mejor comprensión, en la Figura 1.1 se muestra un sistema de coordenadas típico para la definición de la BRDF con las variables involucradas. ω_i y ω_r son los ángulos sólidos de incidencia y reflexión, respectivamente, y A el área irradiada de la muestra.

La BRDF es una derivada de la radiancia producida respecto a la irradiancia incidente. En la realidad, no se pueden medir valores infinitesimales de las magnitudes, sino valores promedio de las mismas en intervalos finitos de los parámetros que definen las condiciones geométricas de la función. Esos intervalos deberán mantenerse lo más pequeños posible para que la medida se acerque lo más posible a la BRDF. La ecuación 1.1 se suele expresar como:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{E_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}; \quad (1.2)$$

donde se asume que los intervalos finitos son suficientemente pequeños como para no afectar a la medida.

Para la situación en la que sólo se contempla una dirección de incidencia y observación, la magnitud se suele denominar coeficiente de radiancia [19], y se expresa:

$$q(\lambda) = \frac{L_r(\lambda)}{E_i(\lambda)}; \quad (1.3)$$

La medida de la radiancia es compleja siempre por los condicionantes geométricos expuestos, pero en el caso de la BRDF surge una dificultad adicional porque la relación señal/ruido puede ser pequeña. Piénsese que el flujo radiante incidente se redistribuye en todo el hemisferio de la muestra. Por este motivo, la determinación de la BRDF a partir de la medida espectral de la radiancia y la irradiancia en un conjunto significativo de di-

recciones es un proceso de medida muy largo, que compromete la estabilidad de la emisión de las fuentes de radiación empleadas en la medición y la estabilidad de las condiciones ambientales, que pueden influir tanto en la muestra bajo estudio como en el sistema de detección.

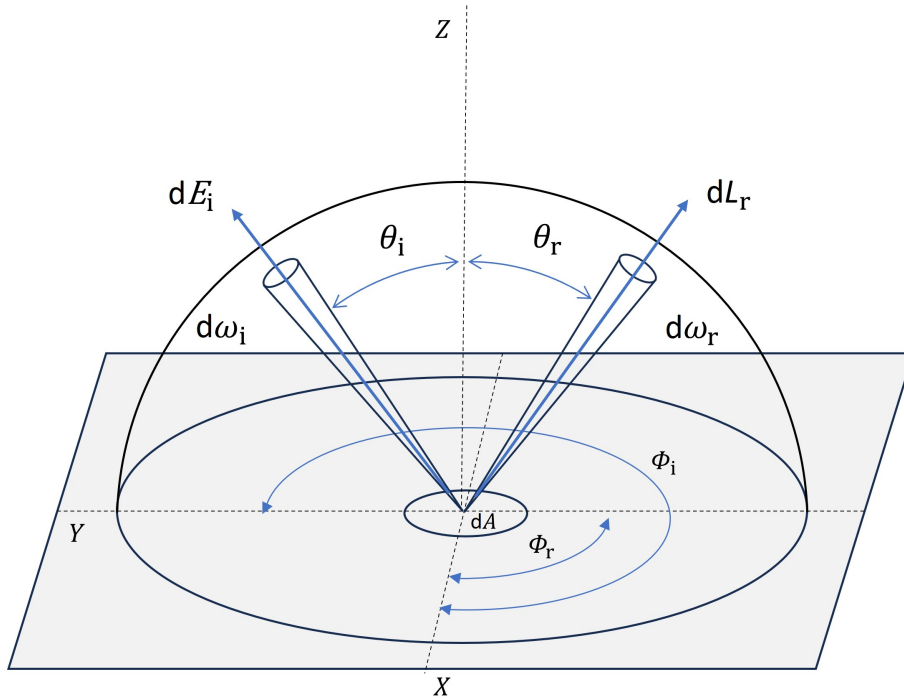


Figura 1.1: Variables usadas en la definición de la BRDF sobre una superficie imaginaria.

Una forma típica en radiometría de proceder en estas situaciones para conseguir medidas fiables de distribuciones es medir en un único punto, configuración geométrica en este caso, el valor absoluto de la magnitud y determinar la distribución en el resto de configuraciones de forma relativa a esa configuración. Así se puede disminuir el tiempo de medición, porque en la distribución relativa el problema se reduce a determinar el cociente de las señales en cada configuración respecto a la de referencia, en lugar de asignar un valor de la magnitud.

Esta es la solución que se ha adoptado en esta tesis doctoral [13], midiendo de forma absoluta la radiancia y la irradiancia en la configuración geométrica $0^\circ:45^\circ$ y en forma relativa en el resto de configuraciones. Esta configuración geométrica fue elegida al ser una de las de referencia recomendadas internacionalmente, facilitando la comparación de resultados obtenidos en distintos laboratorios. En el capítulo 3 de esta memoria se describe cómo se ha realizado esta medida: procedimiento experimental, ecuación de medida y análisis y balance de incertidumbres. En el mismo capítulo se presentan los resultados del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$. Adicionalmente se realiza una validación de los resultados a través de una comparación de estos con un espectrofotómetro PerkinElmer Lambda 9. En el capítulo 4 se describe cómo se ha realizado la medida relativa de la distribución:

procedimiento experimental y ecuación de medida. Los resultados para la medida relativa de la BRDF se presentan en el capítulo 4. En los capítulos 3 y 5 se dan los resultados obtenidos para el factor de reflectancia bidireccional de varios materiales que se usan como patrones, así como los criterios aplicados para la elección de los mismos. En el capítulo 3 de esta tesis se ofrece una somera descripción de estos materiales.

Por último, en el capítulo 5 se abordan los métodos de comparación internos y externos de las medidas de BRDF realizadas. Para los métodos de comparación internos se utilizan los resultados de la medida relativa de BRDF. El primer método consiste en obtener un índice para medir la proporcionalidad entre las medidas, y el segundo en calcular el factor de reflectancia en configuración geométrica direccional-difusa, concretamente la 0° :difusa (0° :d). Para el método externo se emplea una de las medidas de BRDF obtenidas en el capítulo 5 y se compara con la medida de BRDF de un laboratorio de referencia de reconocido prestigio internacional, el *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* de Alemania, conocido por sus siglas en alemán: PTB, cuya escala es también propia. La comparación ha consistido en el estudio de la compatibilidad de los valores de calibración del factor de radiancia 0° : 45° de un patrón calibrado por el PTB con los asignados al mismo patrón con nuestra escala de reflectancia bidireccional. El factor de radiancia se define como el cociente entre la radiancia de un elemento de superficie en una dirección especificada y la radiancia del difusor perfecto para idénticas condiciones geométricas de irradiación y reflexión, y se expresa como:

$$\beta(\lambda) = \frac{L_r(\lambda)}{L_{r,PRD}(\lambda)}; \quad (1.4)$$

donde $L_{r,PRD}$ es la radiancia del difusor perfecto. Por tanto, se puede obtener la BRDF para la geometría 0° : 45° de este patrón multiplicando su factor de radiancia por $1/\pi$, que es el valor de reflectancia bidireccional del difusor perfecto. Así se podría comparar directamente este valor calculado con el que se mide en este trabajo.

Capítulo 2

Ampliación y mejora del gonio-espectrofotómetro GEFE

Contenido

2.1. Descripción del instrumento	8
2.1.1. Ampliación del sistema de irradiación	10
2.1.2. Mejora del sistema de posicionamiento	14
2.1.3. Ampliación del sistema de detección	15
2.2. Sistemas de referencia geométricos	16
2.3. Sistema auxiliar de alineamiento	18

Los instrumentos desarrollados en los últimos 20 años para la medida de la BRDF han mejorado de forma notable su calidad metrológica. El principal cambio en el diseño ha sido en la forma de establecer las direcciones de incidencia y observación. Mover tanto el sistema de incidencia como el de observación es complejo, fuente de mayor incertidumbre en consecuencia, y requiere un espacio mayor para la instalación del instrumento, por lo que se investigaron diseños que permitiesen prescindir de la movilidad de uno de esos sistemas. Esto se ha conseguido introduciendo un brazo-robot para el posicionamiento y la orientación de la muestra. En la mayor parte de los casos [18, 20–27], como el del gonio-espectrofotómetro GEFE, el sistema de irradiación es fijo, pues contiene un mayor número de elementos y se facilita la estabilidad de la emisión de la fuente de radiación. Originalmente, el gonio-espectrofotómetro GEFE se diseñó y construyó para medir la BRDF en el intervalo visible del espectro y con esta tesis doctoral se ha logrado ampliar

2.1 Descripción del instrumento

su capacidad de medición al infrarrojo cercano, manteniendo las mismas capacidades: medida para cualquier geometría, incluyendo dentro y fuera del plano de incidencia, y en condiciones de retrorreflexión.

2.1. Descripción del instrumento

El gonio-espectrofotómetro GEFE (Figura 2.1) está compuesto por tres sistemas: irradiación, posicionamiento y detección, así como un cuarto sistema auxiliar de alineamiento. Como se ha mencionado antes, el sistema de irradiación es fijo, por lo que la configuración de las distintas direcciones de incidencia y reflexión se lleva a cabo con los otros dos sistemas. El sistema de posicionamiento permite establecer la dirección deseada de incidencia en la muestra, mientras que la dirección de reflexión queda fijada por el sistema de posicionamiento y la posición del sistema de detección, el cual se desplaza sobre el anillo de la instalación.

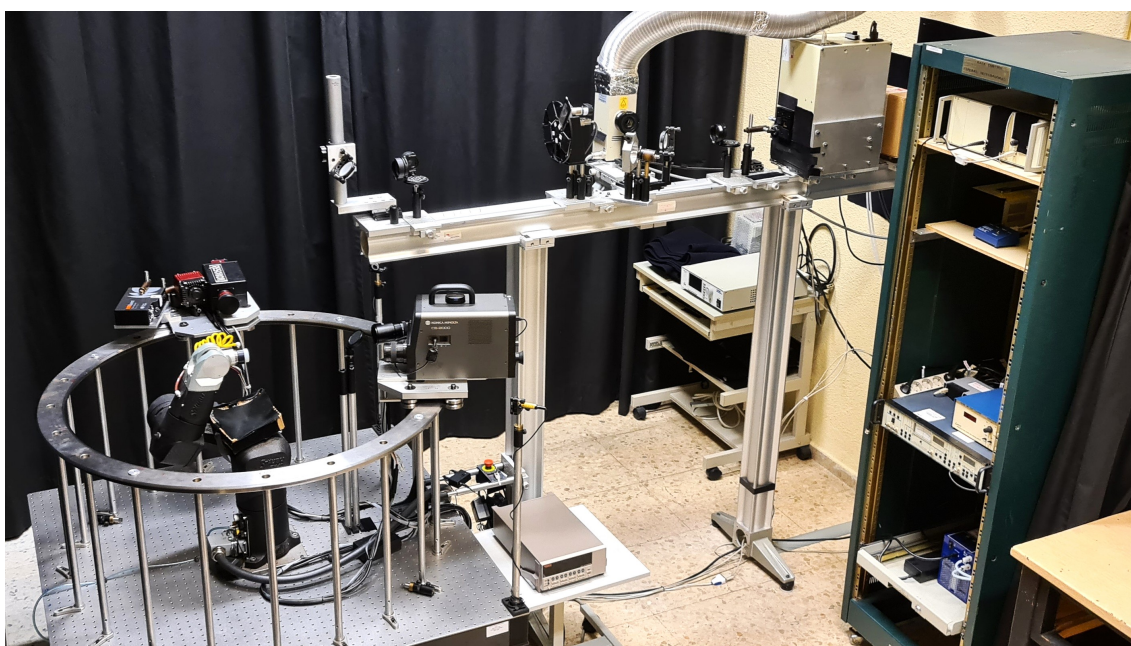


Figura 2.1: Vista general del gonio-espectrofotómetro GEFE ampliado.

Antes de la ampliación, el sistema de irradiación tenía un único eje óptico en el que quedaba situada la fuente S2 del esquema que se muestra más adelante, una lámpara de Xe de la marca Hamamatsu modelo 2175, y sin el monocromador. Esta fuente sigue siendo útil cuando el sistema de detección incorpora análisis espectral y por ello se ha mantenido en el gonio-espectrofotómetro ampliado, introduciendo un eje óptico secundario, perpendicular al primario, en el sistema de irradiación. Un espejo plano, M45_{S2}, montado en un soporte plegable que se encuentra en la intersección de ambos ejes ópticos, permite utilizar este eje óptico secundario.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema tanto de la planta como del alzado del gonio-espectrofotómetro en el que se pueden ver en más detalle los elementos que están involucrados en los tres sistemas de la medida de la BRDF. En la figura no se muestra el sistema auxiliar de alineamiento. Los elementos están identificados en la propia figura. Ésta es la configuración para la medida de BRDF en forma relativa. Para la medida del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ el sistema de detección está formado por un fotodiodo individual que no aparece en el esquema por simplicidad. Tampoco se muestran otros elementos adicionales para esa medida de coeficiente de radiancia que serán indicados en el capítulo propio de esta medición, el capítulo 3.

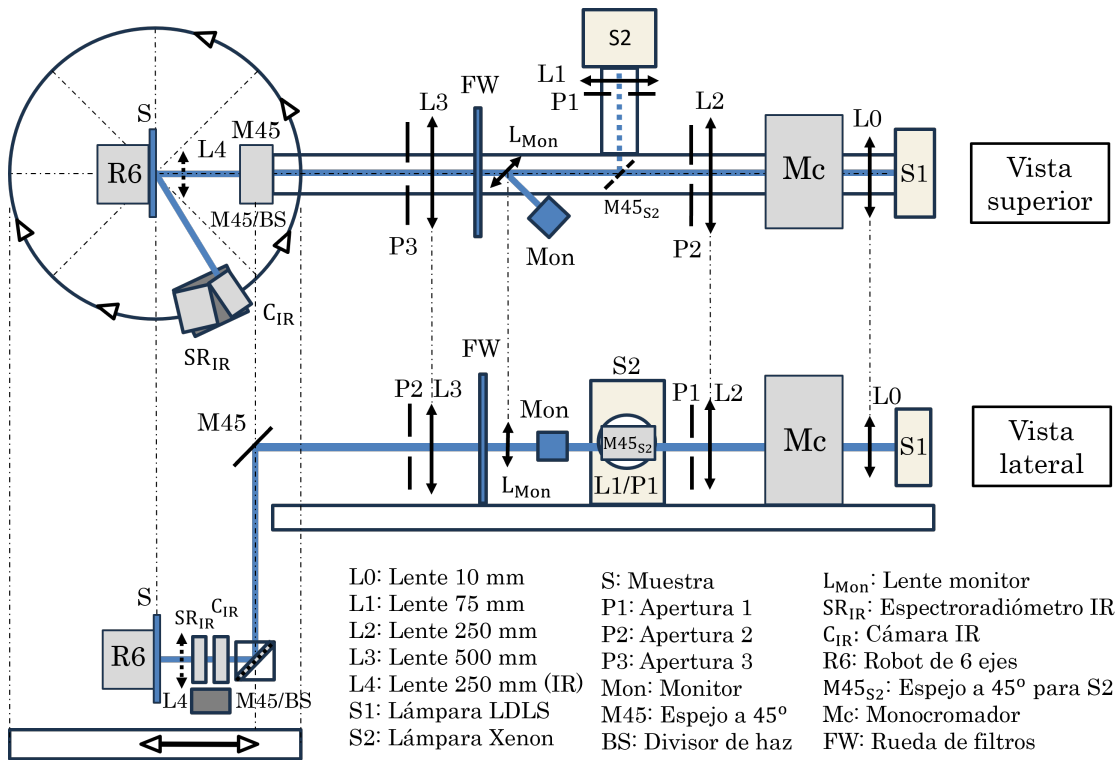


Figura 2.2: Esquema del gonio-espectrofotómetro ampliado. En la parte superior se muestra una vista de la planta, mientras que en la inferior se muestra el alzado. Los elementos que lo componen están identificados en la propia figura.

El sistema de detección en el intervalo visible, análogo al del infrarrojo, no se muestra en la figura 2.2, pero sí aparece en la figura 2.1 en la otra plataforma del anillo, observada en primer plano. Ambas plataformas son equivalentes. Para las caracterizaciones llevadas a cabo en este escrito, son empleados dos de los tres dispositivos de detección presentes en la plataforma correspondiente al intervalo del infrarrojo cercano. El restante, que es el que se encuentra situado más a la izquierda en la figura 2.1, fue añadido al sistema con posterioridad a la realización de la escala de BRDF, un espectroradiómetro de infrarrojo cercano de intervalo espectral extendido, para caracterizaciones por encima de

los 1700 nm, con intención de continuar extendiendo las posibilidades de medición del gonio-espectrofotómetro GEFE.

Los detalles de la ampliación se describen a continuación en cada uno de los sistemas del gonio-espectrofotómetro.

2.1.1. Ampliación del sistema de irradiación

Los detalles del gonio-espectrofotómetro GEFE que no se han modificado en esta ampliación se pueden ver tanto en [18,28], diseño y configuración iniciales, como en [29], primera modificación para incluir una fuente en el infrarrojo cercano. La actualización llevada a cabo para esta tesis responde a incrementar el flujo radiante que incide sobre la muestra en el intervalo espectral infrarrojo y, por lo tanto, poder incrementar el flujo radiante que es recogido por el sistema de detección tras ser reflejado por la muestra. Este aumento era necesario para poder realizar medidas absolutas de reflectancia bidireccional.

Con este objetivo se sustituyó la lámpara de incandescencia anterior por una fuente de luz activada por láser, LDLS, de sus siglas en inglés *laser driven light source*, desarrollada por la empresa Energetiq, modelo EQ77X, y representada por S1 en la figura 2.2. Esta fuente se encuentra instalada en el segmento principal del eje óptico del sistema de irradiación, el que va desde la propia S1 hasta el espejo M45. Su mecanismo de funcionamiento consiste en excitar el plasma creado en una lámpara de xenón mediante la focalización de un haz láser con una longitud de onda de 532 nm (Figura 2.3).

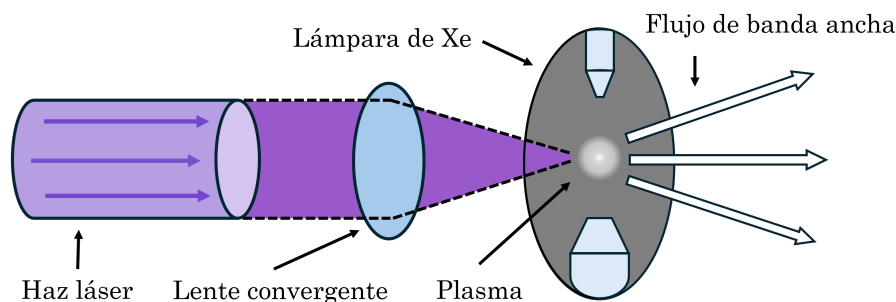


Figura 2.3: Esquema de funcionamiento de la lámpara LDLS.

Frente a las lámparas de descarga eléctrica convencionales, la tecnología LDLS crea un plasma extremadamente pequeño, muy estable en posición y tiempo, de alta radiancia espectral, que emite en un intervalo espectral más amplio, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, pasando por el visible. Frente a las fuentes basadas en lámparas de incandescencia, la tecnología LDLS ofrece una estabilidad temporal ligeramente mejor, mantiene niveles más altos de radiancia a lo largo del intervalo espectral y tiene mayor facilidad para aprovechar el flujo radiante emitido al ser una fuente casi puntual frente al filamento extenso de las lámparas de incandescencia. Por último, señalar que el flujo

radiante emitido en la zona de máxima emisión de las lámparas de incandescencia habituales en las aplicaciones de infrarrojo cercano, alrededor de 1 μm , es similar a la tecnología LDLS, pero esta mantiene niveles más altos de radiancia espectral, como se ha indicado. En la figura 2.4 se puede observar la comparación de la emisión entre las fuentes instaladas. Nótese que sólo las fuentes utilizadas en esta tesis están incluidas en la representación.

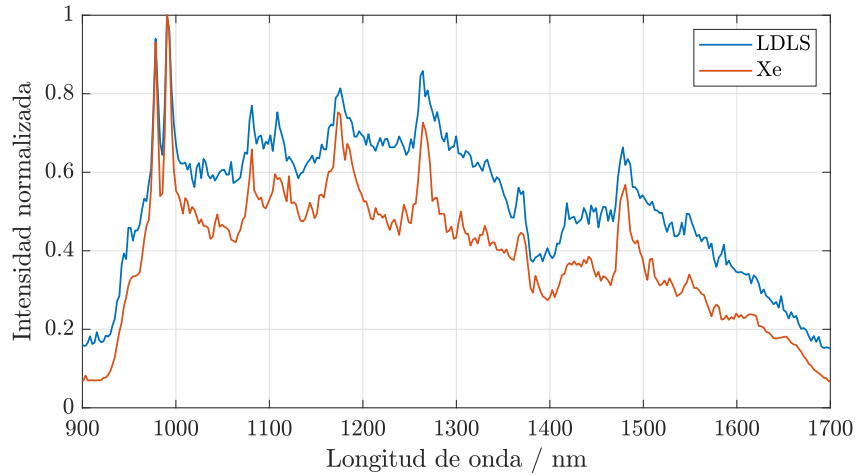


Figura 2.4: Distribución espectral normalizada al máximo para las fuentes LDLS y lámpara de xenón, respectivamente.

Las tablas 2.1 y 2.2 recogen las especificaciones más relevantes de las fuentes de irradiación instaladas en el gonio-espectrofotómetro tras la ampliación realizada en esta tesis.

El elemento del sistema que permite seleccionar las longitudes de onda al emplear la fuente LDLS es un monocromador tipo Czerny-Turner con 300 mm de focal, de la marca Bentham, modelo TMc-300, y representado como Mc en la figura 2.2. Consta de dos redes de difracción, una con 1200 mm^{-1} , empleada en el intervalo de 250 nm a 1200 nm, y otra con 830 mm^{-1} para el intervalo comprendido entre 500 nm y 1800 nm. Adicionalmente cuenta con una rueda de filtros interna y un filtro de segundo orden montado, que permite bloquear el flujo de los órdenes de difracción distintos al primero. Las rendijas de entrada y salida del dispositivo permiten ajustar el ancho de banda de la radiación que emerge del monocromador hasta un valor mínimo inferior a 2 nm para ambas redes de difracción. Dado que las aperturas numéricas de la fuente LDLS y el monocromador son diferentes, 0.12 para el monocromador y 0.5 para la LDLS según los fabricantes, la inyección de la radiación desde la fuente LDLS hasta el monocromador se hace mediante la lente L0, acoplando ambas aperturas numéricas a la del monocromador para que la contribución de luz esparcida en el mismo sea mínima. En el anexo A se describe cómo se ha realizado el cálculo de la focal y tamaño de lente que se necesita y cómo se ha adaptado esa solución a las opciones de catálogo. Se eligió una lente de sílice fundida de 12.5 mm de focal.

Para proyectar uniformemente la radiación que sale del monocromador sobre el plano de la muestra en la medida relativa de la BRDF, se usa un sistema óptico tipo Köhler,

2.1 Descripción del instrumento

constituido por las lentes de sílice fundida L2 (250 mm de focal) y L3 (500 mm de focal) sin recubrimiento antirreflejante, ya existentes antes de la ampliación. La apertura P2, un diafragma variable, permite variar el tamaño de la superficie de irradiación sobre la muestra, mientras que la apertura P3 permite variar el ángulo sólido de irradiación, así como la irradiancia sobre el plano de la muestra. Para esta configuración, dicho plano queda situado a unos 120 cm de L2. Nótese que cuando se usa la lámpara de xenón, L1 (75 mm de focal) juega el papel de L2 y P1 el de P2. La última lente del sistema de irradiación, L4 (focal de 250 mm), se usa solamente para la medida del coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$, como se explicará en el capítulo 3.

Tabla 2.1: Especificaciones más relevantes de la fuente con la lámpara de xenón.

Parámetro	Valor
Longitud del arco / FWHM	2.5 mm / $< 500 \mu\text{m}$
Apertura numérica	0.29
Intervalo espectral de emisión	185 nm - 2000 nm
Irradiancia Espectral a 1700 nm (a 50 cm)	$0.008 \mu\text{W}/\text{mm}^2 \text{ nm}$
Irradiancia Espectral a 900 nm (a 50 cm)	$0.075 \mu\text{W}/\text{mm}^2 \text{ nm}$
Corriente de alimentación	7.5 A
Voltaje	20 V (típico)

Tabla 2.2: Especificaciones más relevantes de la fuente LDLS.

Parámetro	Valor
Tamaño del plasma (FWHM)	$125 \mu\text{m} \times 320 \mu\text{m}$
Apertura Numérica	0.5
Intervalo espectral de emisión	170 nm - 2500 nm
Radiancia espectral a 1700 nm	$5 \text{ mW}/\text{mm}^2\text{sr nm}$
Radiancia espectral a 900 nm	$40 \text{ mW}/\text{mm}^2\text{sr nm}$
Potencia óptica de banda ancha	2.75 W

En el caso de necesitar formar imagen de la emisión de una de las fuentes sobre el plano de la muestra, como sucede en el caso de la medida del coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$, es empleada la fuente LDLS, al presentar menor tamaño de la emisión entre las dos. Esto permite que el área de incidencia de la radiación sobre el plano de la muestra sea menor, y por tanto, pueda quedar encerrada dentro del área de excitación del fotodiodo que es empleado para efectuar la medida. De esta manera, son empleadas L2 y L4, quedando posicionadas a su distancia focal con respecto a la salida del monocromador y al plano de medida, respectivamente.

En la Figura 2.5 se presenta la transmitancia espectral de las lentes descritas. Las distribuciones espectrales de L2 y L3 son iguales y por ello sólo se muestra una de ellas. Se

puede observar que el valor de transmitancia de las lentes del sistema Köhler se encuentra por encima del 90 % para la mayor parte del intervalo espectral de interés, salvo para L1, si bien esta lente se usa en el intervalo visible. La lente L4 tiene un tratamiento antirreflejante para el infrarrojo cercano y por eso presenta esa distribución espectral.

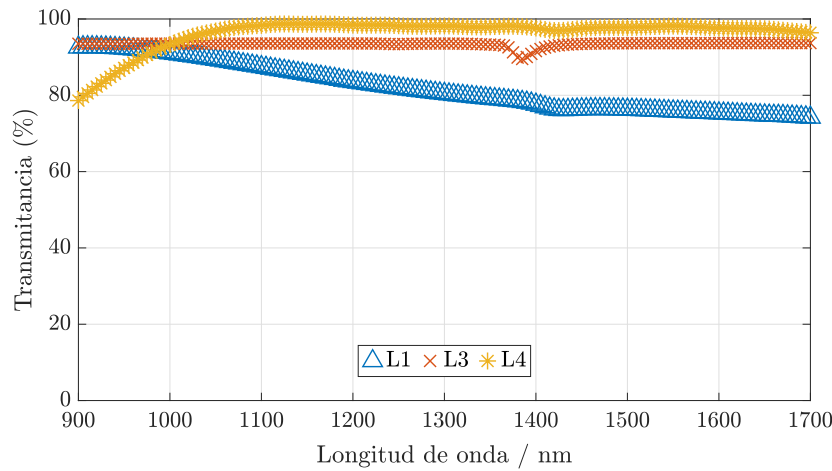


Figura 2.5: Transmitancia medida de las lentes involucradas en las configuraciones del sistema de irradiación del gonio-espectrofotómetro.

Una característica importante de este gonio-espectrofotómetro es su capacidad de realizar medidas en condiciones de retrorreflexión, lo que se consigue disponiendo los elementos del conjunto de irradiación en configuración periscópica; en la parte superior quedan situados el conjunto de lentes y fuentes descritos anteriormente, así como un espejo (M45) el cual refleja de forma perpendicular la radiación que se propaga hacia la muestra, que luego incide sobre un divisor de haz (BS) 50: 50 de sílice fundida, con alta transmisión en el infrarrojo, que queda situado en la sección inferior, a la misma altura que la muestra y los elementos de detección. La primera superficie de este elemento queda posicionada a 45° con respecto a la dirección del eje óptico. Cuando el sistema de detección empleado necesite una mayor cantidad de flujo radiante, se puede sustituir el divisor de haz por un espejo colocado en la misma posición, si bien esto elimina la posibilidad de medir la retrorreflexión.

El sistema de irradiación se completa con una rueda de filtros (FW) de 5 posiciones: una vacía, otra con una placa opaca que permite bloquear el haz para realizar las medidas de señal/oscuridad, y las otras tres con filtros neutros de 0.01 %, 1 % y 10 % de transmitancia nominal, respectivamente, para poder atenuar el flujo radiante que llega al sistema de detección. Los filtros neutros se han actualizado para cubrir el intervalo del infrarrojo cercano.

Por último, indicar que hay una lámina de sílice fundida sin recubrimiento (L_{mon} en la Figura 2.2), la cual refleja aproximadamente un 10 % de la radiación incidente hacia un detector monitor, que vigila la estabilidad de la emisión de la fuente de radiación.

2.1.2. Mejora del sistema de posicionamiento

Este sistema consta de un brazo robot de seis ejes que posibilitan el desplazamiento en los 3 ejes del sistema de coordenadas y las respectivas rotaciones en torno a cada eje. En la figura 2.6 se pueden observar 4 posiciones comunes de configuración del brazo; incluyendo cada representación la posición de los ejes de coordenadas de la muestra.

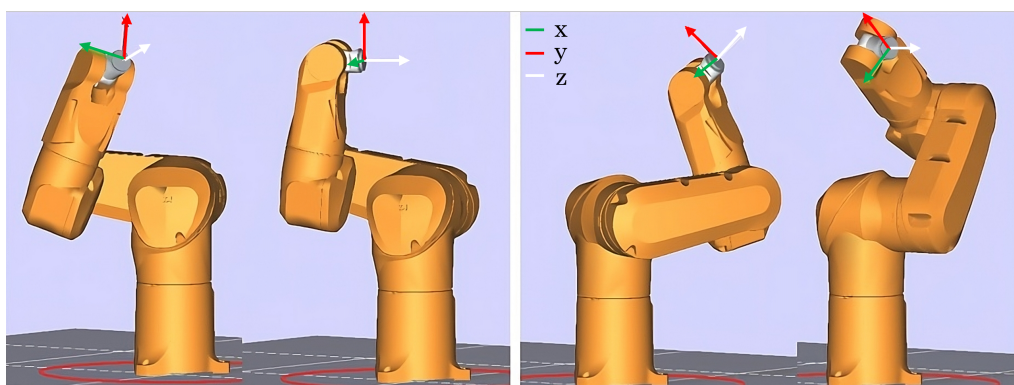
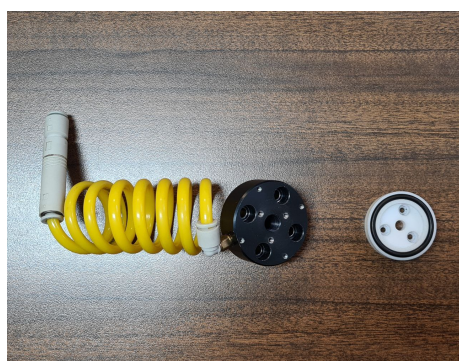


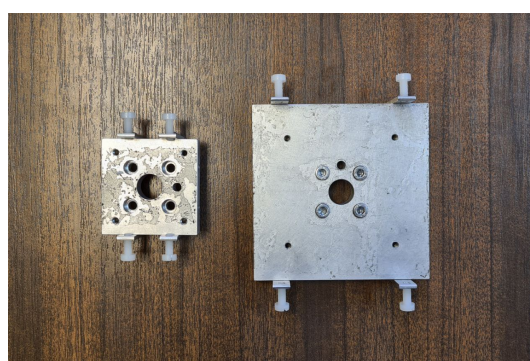
Figura 2.6: Brazo robot del conjunto de posicionamiento.

Su movimiento se rige desde el ordenador que controla el gonio-espectrofotómetro mediante señales digitales que se generan con un procesador Arduino. Esta es una de las modificaciones que se han introducido en esta ampliación, eliminando las tarjetas analógico-digitales en el bus del ordenador.

Las muestras a medir se sujetan con un succionador, conectado a un circuito de aire comprimido mediante una pieza diseñada exprefeso para acoplarse al brazo robot. Adicionalmente, y por si este conjunto fallase, se cuenta con dos piezas de sujeción mecánica para las muestras, de forma que es posible sujetar con el brazo robot muestras de dos tamaños distintos. Los dos conjuntos de sujeción de las muestras, así como los elementos que los componen se muestran en las figuras 2.7 y 2.8.



(a)



(b)

Figura 2.7: Elementos que componen cada conjunto de sujeción de las muestras para el brazo robot del GEFE: succión (a) y sujeción mecánica (b).



Figura 2.8: Conjuntos de sujeción de las muestras para el brazo robot montados en el GEFE: succión (a) y sujeción mecánica (b).

2.1.3. Ampliación del sistema de detección

El sistema de detección está en una plataforma movida por un motor, la cual se sitúa sobre un carril con forma de anillo con un diámetro de 103 cm. El movimiento de dicha plataforma otorga un grado de libertad adicional al sistema para completar la dirección de reflexión (ϕ_A). La plataforma no registra la posición angular, sino que es el programa de control del gonio-espectrofotómetro el que se ocupa de todos los cálculos necesarios para fijar la posición. La plataforma se desplaza durante las medidas a lo largo del intervalo angular que abarca desde $\phi_A=180^\circ$ (en la medida de la radiación incidente) hasta $\phi_A = 0^\circ$, que es la dirección del eje óptico. Dicha plataforma transporta un espectrorradiómetro de infrarrojo (SR_{IR} en la figura 2.2) de la marca Resonon, modelo PIKA-NIR 640 con resolución espectral y espacial para una dimensión, y una cámara infrarroja (C_{IR} en la figura 2.2) de la marca Allied Vision, modelo Goldeye G-008 TEC1. Las especificaciones más relevantes de estos elementos se indican en las tablas 2.3 y 2.4. El espectrorradiómetro es empleado en la medida de la BRDF, mientras que la cámara es usada para realizar medidas de uniformidad, principalmente.

El espectrorradiómetro tiene acoplado un objetivo de focal 25 mm, el cual se encuentra levemente separado del cuerpo del dispositivo por un anillo extensor, situado entre la boca del dispositivo y el objetivo, diseñado para que se pueda enfocar la muestra a medir bajo las condiciones dimensionales de la instalación. El radio del anillo sobre el que se desplaza la plataforma es menor que la distancia de enfoque propia del espectrorradiómetro. Esta modificación podría afectar al intervalo espectral de respuesta, ya que la dispersión espectral se hace formando imagen de la rendija de entrada sobre una dimensión del array de detección.

Para la cámara infrarroja se empleó un teleobjetivo Navitar Zoom de rango focal entre 18 mm y 108 mm. Éste objetivo fue escogido para aprovechar la totalidad de la superficie del sensor si se emplea un valor mayor de focal para caracterizar espacialmente las superficies de las muestras, teniendo en cuenta el tamaño habitual de las muestras y

2.2 Sistemas de referencia geométricos

del área irradiada. Así se consigue una mayor resolución espacial en las medidas.

Tabla 2.3: Especificaciones más relevantes del espectrorradiómetro de infrarrojo.

Parámetro	Valor proporcionado
Tipo de sensor	InGaAs
Intervalo espectral de detección	900 nm - 1700 nm
Resolución espectral	512 px
Ancho de banda espectral	2.5 nm
Resolución espacial	640 px
Tamaño del píxel	15 μm
Profundidad en bits	14
Intervalo temporal de integración	1 μs - 10 s

Tabla 2.4: Especificaciones más relevantes para la cámara infrarroja.

Parámetro	Valor proporcionado
Tipo de sensor	FPA / InGaAs
Intervalo espectral de detección	900 nm - 1700 nm
Resolución espacial	320 px \times 256 px
Tamaño del píxel	30 μm
Profundidad en bits	14
Intervalo temporal de integración	6 μs - 200 ms

Para la medida del coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$, se ha instalado en la plataforma un fotodiodo de InGaAs de 5 mm de diámetro, de la marca Hamamatsu, modelo G8370-85. Este tipo de fotodiodo es el que mejores prestaciones ofrece en el intervalo espectral del infrarrojo cercano. Se conecta a un picoamperímetro de la marca Keithley, modelo 6485, con una escala mínima de amplificación de 2 nA, y con posibilidad de medir corrientes de hasta 20 fA. En consecuencia, se mide la corriente de cortocircuito del fotodiodo.

Aunque no forma parte propiamente del sistema de detección, se incluye en esta sección el detector monitor de control de la estabilidad de la fuente de irradiación, otro fotodiodo de InGaAs (Mon en la figura 2.2) de las mismas características que el previamente mencionado.

2.2. Sistemas de referencia geométricos

El empleo del brazo robot como sistema de posicionamiento para orientar en cada momento la muestra con respecto al haz incidente, hace necesario tener que definir dos sistemas de coordenadas: uno el propio del robot y otro el del gonio-espectrofotómetro. Estos sistemas de coordenadas no se han visto afectados por la ampliación.

El sistema de coordenadas global, el del gonio-espectrofotómetro (SCG por sus siglas en español), que se identifica en esta memoria como (X,Y,Z) , tiene su centro en el punto en el que el eje óptico corta al plano de la muestra. El eje Z es el eje óptico del sistema. El eje X es el eje de rotación de la plataforma de detección. El eje Y es perpendicular a los dos anteriores. El otro sistema de referencia, relacionado con el brazo robot, es el de la muestra (SCM por sus siglas en español). Se identifica en esta memoria como (x, y, z) y tiene su centro en el mismo punto que el anterior. El eje z es la dirección perpendicular a la muestra, mientras que los ejes x e y están en el plano de la muestra. El eje x es el vertical cuando la muestra está en incidencia normal, mientras que el eje y es horizontal en esa posición.

De los seis grados de libertad relativos al brazo robot, tres, asociados al desplazamiento del mismo en las direcciones del sistema SCG, se emplean para posicionar la muestra en el origen de coordenadas. Los tres restantes habilitan las rotaciones en torno a los ejes del sistema SCG, y son α_x , α_y y α_z . En la Figura 2.9 se muestra una representación de los sistemas de coordenadas con los parámetros asociados.

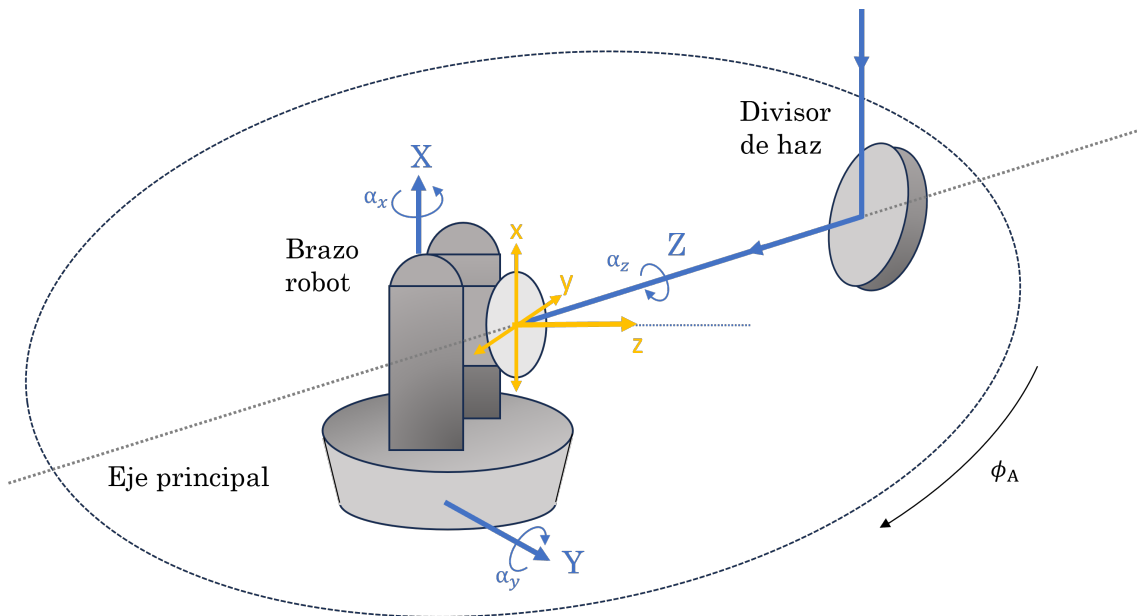


Figura 2.9: Esquema de los sistemas de coordenadas global y de la muestra.

Como se introdujo en el Capítulo 1, la BRDF está definida por las coordenadas esféricas de incidencia y observación $(\theta_i, \theta_r, \phi_i$ y $\phi_r)$, que han de ser relacionadas con los ángulos de giro del brazo robot y la plataforma de detección $(\alpha_x, \alpha_y$ y α_z y $\phi_A)$ mediante la aplicación de la correspondiente transformación geométrica. La derivación de la misma está descrita en en la literatura [25,28], y las relaciones entre los ángulos de giro a situar para los ángulos de incidencia y observación de medida se muestra a continuación:

$$\phi_A = \arccos(\cos \theta_i \cos \theta_r + \cos \phi_i \cos \phi_r \sin \theta_i \sin \theta_r + \sin \phi_i \sin \phi_r \sin \theta_i \sin \theta_r); \quad (2.1)$$

$$\alpha_x = \arctan \left(\frac{\cos \theta_r - \cos \theta_i \cos \phi_A}{\cos \theta_i \sin \phi_A} \right); \quad (2.2)$$

$$\alpha_y = \arcsin \left(\frac{-\sin \theta_i \sin \theta_r \sin(\phi_r - \phi_i)}{\sin \phi_A} \right); \quad (2.3)$$

$$\alpha_z = \arctan \left(\frac{\sin \theta_i \cos \theta_r \sin \phi_i - \sin \theta_r \cos \theta_i \sin \phi_r}{\sin \theta_r \cos \theta_i \cos \phi_r - \sin \theta_i \cos \theta_r \cos \phi_i} \right). \quad (2.4)$$

2.3. Sistema auxiliar de alineamiento

En una instalación multisistema con muchos elementos ópticos, como es ésta, el alineamiento es importante y conviene diseñar un sistema permanente que facilite su realización siempre que sea necesario, así como un procedimiento de alineamiento.

El sistema de alineamiento consta de dos láseres de diodo colimados (LA1 y LA2 en la figura 2.10), de los usados habitualmente para alinear, montados en un soporte gimbal; y cuatro aperturas de 1 mm de diámetro (V1-4) situadas sobre el anillo y separadas 90° unas de otras. Las aperturas, realizadas en el taller mecánico del Instituto de Óptica, se hicieron taladrando un agujero en un vástago de forma perpendicular al eje del mismo y que pasa por su centro.

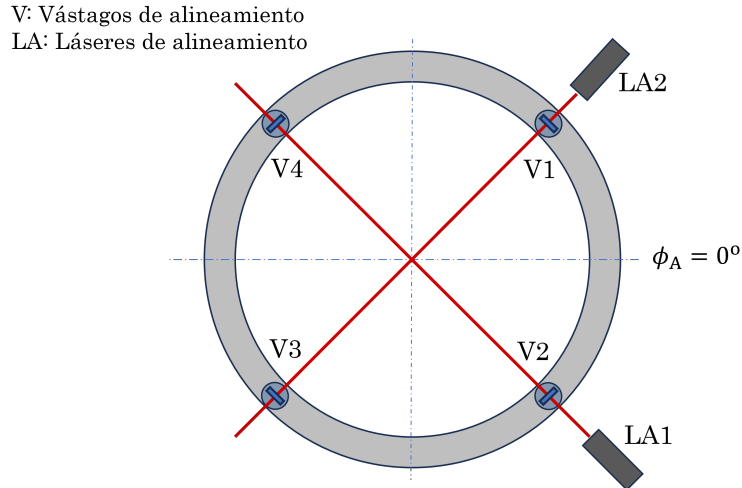


Figura 2.10: Sistema auxiliar de alineamiento con las cuatro aperturas y los dos láseres orientados para definir el centro del anillo, centro de giro de la plataforma de detección. $\phi_A = 0^\circ$ es la dirección del eje óptico.

Cada láser se orienta para que atraviese dos aperturas que se encuentran diametralmente opuestas, con lo que se realiza un diámetro del anillo sobre el que está la plataforma

de detección. Cada láser realiza un diámetro, perpendiculares entre sí y simétricos con respecto a la dirección de incidencia (véase Figura 2.10).

El punto donde se cortan estos dos diámetros es el centro del anillo por definición. Nótese que los láseres están levantados respecto al plano del anillo, es decir, son coplanarios entre sí, pero no con el plano del anillo, de forma que el punto donde se cortan está en el eje central del anillo a la altura del centro de los elementos de detección. Este punto será asignado como el centro de giro de los elementos de detección y el origen de los sistemas de coordenadas de la muestra y global, SCM y SCG.

Una vez realizado el centro de los sistemas de coordenadas, se sitúa un espejo (M_A en la figura 2.11) en el soporte de las muestras de forma que su centro coincida con el punto donde intersectan los láseres, con la superficie perpendicular al eje óptico. A continuación, se gira 22.5° respecto al eje X del sistema SCG, con lo que el haz láser reflejado se propaga en la dirección del eje óptico (véase la Figura 2.11). A continuación, se alinea el sistema periscópico de forma que el haz láser se propague en una dirección paralela al banco óptico para posteriormente alinear todos los componentes del conjunto de irradiación centrándolos respecto al láser, empezando por la fuente LDLS (S1 en la Figura 2.11). Es decir, se utiliza este láser como realización del eje óptico de nuestro sistema.

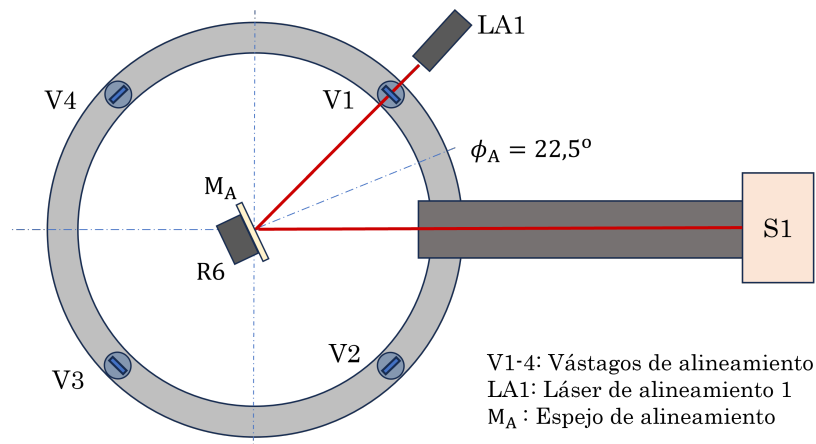


Figura 2.11: Realización del eje óptico para el alineamiento del sistema de irradiación sobre la muestra.

El proceso de alineamiento se concluye posicionando la plataforma de detección frente al haz láser reflejado por el espejo, en la configuración observada en la figura 2.11. Bajo esta configuración, el láser puede alcanzar los elementos de detección gracias al divisor de haz presente en la instalación (BS en la figura 2.2). Así, se alinean los componentes de detección en incidencia normal y centrados respecto al láser.

Capítulo 3

Determinación del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$

Contenido

3.1. Ecuación de medida	22
3.2. Caracterización de los coeficientes de corrección	23
3.2.1. Corrección espectral C_λ	23
3.2.2. Coeficiente de corrección de la no linealidad C_{NL}	29
3.2.2.1. Procedimiento experimental	30
3.2.2.2. Ecuación de medida de la linealidad y propagación de incertidumbres	35
3.2.2.3. Resultados	36
3.3. Descripción de las muestras a caracterizar	38
3.4. Montaje experimental para la medida del RC $0^\circ:45^\circ$	40
3.5. Caracterización de las variables geométricas	44
3.5.1. Coseno del ángulo polar de reflexión	44
3.5.2. Ángulo sólido de reflexión	45
3.6. Resultados del RC	45
3.6.1. RC ponderado e incertidumbre asociada	51
3.6.2. Validación de los resultados del RC	53

En este capítulo se describe la determinación del coeficiente de radiancia (RC por sus siglas en inglés *Radiance Coefficient*) $0^\circ:45^\circ$ de un conjunto de muestras seleccionadas para ser patrones de medida de esta magnitud. En primer lugar, se describe el proceso de caracterización radiométrica de los dispositivos o elementos que intervienen en la medición y contribuyen a su incertidumbre. A continuación, se describen las muestras y el procedimiento experimental utilizado para su medida. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos junto con su incertidumbre y se realiza un análisis de los mismos para seleccionar la muestra que se ha empleado como referencia para la caracterización de la escala de BRDF, como se explica en el capítulo siguiente.

3.1. Ecuación de medida

Como se describió en el capítulo 1, la BRDF de una superficie se expresa en términos de radiancia reflejada e irradiancia incidente (ecuación 1.2), y se puede expresar en términos del flujo radiante incidente y el reflejado en una dirección dada, según la ecuación:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{\Phi_r(\theta_r, \phi_r; \lambda)}{\Phi_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) \omega_r \cos \theta_r}; \quad (3.1)$$

siendo Φ_i y Φ_r los flujos incidente desde la dirección (θ_i, ϕ_i) y reflejado en la dirección (θ_r, ϕ_r) respectivamente, y ω_r el ángulo sólido de reflexión.

El flujo radiante incidente sobre un radiómetro (conjunto de detector y sistema de amplificación) se obtiene como el cociente entre la señal neta del radiómetro, S (obtenida sustrayendo la señal de oscuridad a la respuesta del radiómetro) y la responsividad del mismo, $\mathfrak{R}(\lambda)$, que en el caso de radiómetros con detectores semiconductores depende de la longitud de onda de la radiación incidente. Por tanto, la ecuación 3.1 se puede reescribir como:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{S_r(\theta_r, \phi_r; \lambda)}{S_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) \omega_r \cos \theta_r} \frac{\mathfrak{R}_i(\lambda)}{\mathfrak{R}_r(\lambda)} = \frac{S_r(\theta_r, \phi_r; \lambda)}{S_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) \omega_r \cos \theta_r} C_{NL}(\lambda), \quad (3.2)$$

donde el subíndice i hace referencia al haz incidente, mientras que el r hace referencia al reflejado. El cociente entre los valores de la responsividad del radiómetro se denota como C_{NL} , coeficiente de no linealidad de respuesta, que puede depender de la longitud de onda.

Si se tiene en cuenta que la longitud de onda se selecciona con un monocromador y que el método de medida consiste en hacer un barrido espectral en cada posición, hay que introducir en la ecuación anterior un coeficiente de corrección debido a la incertidumbre en longitud de onda, quedando la ecuación como:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \left[\frac{S_r(\theta_r, \phi_r; \lambda) + C_{\lambda,r}}{S_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) + C_{\lambda,i}} \right] \frac{1}{\omega_r \cos \theta_r} C_{NL}(\lambda). \quad (3.3)$$

Si, además, se tiene en cuenta que la emisión de la fuente puede variar a lo largo del tiempo,

habrá que introducir un coeficiente de corrección en la ecuación anterior para la variación que haya podido sufrir el flujo radiante incidente cuando se mide el flujo radiante reflejado. Como se indicaba en la figura 2.2, el flujo radiante emitido se controla con un detector monitor, cuya respuesta es proporcional a ese flujo radiante. Por tanto, la relación entre la señal del monitor cuando se mide la radiación incidente y la reflejada es una estimación del cambio de flujo radiante emitido. Al incluir esto en la ecuación de medida anterior, se obtiene:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \left[\frac{S_r(\theta_r, \phi_r; \lambda) + C_{\lambda,r}}{S_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) + C_{\lambda,i}} \right] \frac{1}{\omega_r \cos \theta_r} C_{NL}(\lambda) \frac{S_{mon,i}(\lambda)}{S_{mon,r}(\lambda)}. \quad (3.4)$$

Si se denomina C_Φ al cociente de señales del monitor y se reescribe la ecuación anterior teniendo en cuenta que la medida se efectúa solamente en la geometría definida por los ángulos $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_r = 45^\circ$ y $\phi_i, \phi_r = 0^\circ$, se obtiene:

$$f_r(0^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 0^\circ; \lambda) = \left[\frac{S_r(45^\circ, 0^\circ; \lambda) + C_{\lambda,r}}{S_i(0^\circ, 0^\circ; \lambda) + C_{\lambda,i}} \right] \frac{1}{\omega_r \cos 45^\circ} C_{NL}(\lambda) C_\Phi(\lambda); \quad (3.5)$$

y si se simplifica la dependencia angular, la ecuación de medida se puede escribir finalmente como:

$$q_{0:45}(\lambda) = \left[\frac{S_r(\lambda) + C_{\lambda,r}}{S_i(\lambda) + C_{\lambda,i}} \right] \frac{1}{\omega_r \cos 45^\circ} C_{NL}(\lambda) C_\Phi(\lambda); \quad (3.6)$$

donde $q_{0:45}$ es el coeficiente de radiancia espectral $0^\circ:45^\circ$. Los coeficientes de corrección espectral, y de no-linealidad son sistemáticos, propios de los elementos del goni-espectrofotómetro, por lo que pueden ser estimados una vez para todas las mediciones, como se indica a continuación. El coeficiente de corrección del flujo radiante se determina en cada medición.

3.2. Caracterización de los coeficientes de corrección

3.2.1. Corrección espectral C_λ

La corrección espectral se expresa en función de la diferencia entre la longitud de onda de la radiación que sale del monocromador y la que indica el mismo, que denominamos δ_λ :

$$C_\lambda = \frac{\partial S(\lambda)}{\partial \lambda} \delta_\lambda \quad (3.7)$$

Luego la corrección espectral tiene un componente propio de cada distribución espectral, la variación espectral de la señal, y otro propio del sistema de irradiación, la corrección espectral del monocromador. La primera componente ha de obtenerse a partir de la reflectancia espectral de cada muestra. La determinación de la segunda componente es la que

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

se describe a continuación. Se ha llevado a cabo usando el método clásico de comparar las longitudes de onda de los picos de señal registrados con los correspondientes valores de referencia de las líneas de emisión de lámparas espectrales en el intervalo comprendido entre 900 nm y 1700 nm, intervalo elegido para la realización del valor del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$.

Se emplearon lámparas de lápiz de calibración espectral de Hg, Ne y Kr, con las que se cubre el intervalo espectral que se desea evaluar de forma homogénea. Se escogieron siete líneas de emisión que se indican en la tabla 3.1. Puesto que se usan las líneas de emisión en el visible y sus órdenes superiores de difracción para la lámpara de Hg, se utilizó un fotodiodo de silicio para la detección con esta lámpara, mientras que para las otras dos lámparas se empleó un fotodiodo InGaAs.

Cada lámpara fue situada en la posición más cercana posible a la rendija de entrada del monocromador, alineándolas con dicha rendija. El fotodiodo, conectado a un picoamperímetro Keithley 6485, se situó lo más próximo posible a la rendija de salida para captar la radiación que emerge del monocromador.

Para determinar con precisión la posición espectral de máxima respuesta sin alargar en exceso el tiempo de medición, se seleccionaron intervalos espectrales con una longitud de 10 nm alrededor de cada longitud de onda de referencia, de forma que el máximo de señal quedase centrado en el intervalo, registrando los valores de la señal del fotodiodo correspondiente en pasos de 0.1 nm.

Con el objetivo de analizar el posible cambio de la posición de máxima respuesta al variar la anchura de la rendija de salida, se realizaron barridos espectrales diferentes para las anchuras de rendija de 0.5 mm, 1 mm y 2 mm.

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de la calibración espectral realizada.

Tabla 3.1: Valores de la longitud de onda de referencia y corrección espectral para diferentes anchuras de la rendija de entrada. Se indica la lámpara espectral, así como el orden de difracción de sus líneas de emisión usadas.

Lámpara	Orden de difracción	$\lambda_{\text{ref}}/\text{nm}$	$\delta\lambda/\text{nm}$		
			0.5 mm	1 mm	2 mm
Kr	1	975.20	0.95	1	1
Hg	4	1014.60	0.85	0.95	0.95
Hg	5	1268.25	0.3	0.35	0.45
Ne	1	1406.50	0.45	0.5	0.55
Ne	1	1487.78	0.03	0.03	0.08
Hg	6	1521.90	0.2	0.15	0.2
Kr	1	1622.58	-0.02	0.08	0.23

En las tres primeras columnas se indican la longitud de onda de referencia, la lámpara que la produce y el orden de difracción de la línea de emisión utilizada. En las siguientes columnas se indica la diferencia entre el valor de longitud de onda de referencia y la

indicación de longitud de onda del monocromador para la que se obtiene el pico de señal del fotodiodo, para cada anchura de rendija, que se denomina corrección espectral y se representa como $\delta\lambda$.

En la tabla se puede observar que, para valores de longitud de onda menores que 1000 nm, aproximadamente, la desviación en longitud de onda cambia poco con la anchura de la rendija y su valor es más uniforme, mientras que para valores mayores sí se observa que la corrección espectral va disminuyendo con la longitud de onda y cambia con la anchura de la rendija de salida.

Si se ajusta el conjunto de valores asociado a cada tamaño de rendija a una recta, se observa que la pendiente de la misma disminuye, cuando aumenta la anchura de rendija.

En resumen, los resultados observados muestran que la corrección espectral es menor cuanto menor es la anchura de la rendija de salida del monocromador y cuanto mayor es la longitud de onda de la radiación.

La caracterización espectral no es completa si no se conoce la anchura de banda de la radiación saliente, que está determinada por la anchura de la rendija de salida del monocromador, el número de líneas por milímetro de la red de difracción y la longitud focal del mismo. De estos parámetros, la anchura de rendija es el único que se puede variar en el instrumento, por lo que en la práctica esta variable es la que determina la anchura de banda. Para estimar la relación entre ambas anchuras se seleccionaron solo tres picos de emisión de los usados en la determinación de la corrección espectral, uno en cada extremo del intervalo espectral descrito, y el tercero aproximadamente a mitad del intervalo, puesto que la variación de la anchura de banda con la longitud de onda suele ser monótona.

Se ha registrado la respuesta del fotodiodo al barrer espectralmente en un intervalo alrededor de cada uno de los picos seleccionados para cuatro anchuras de rendija de salida: 0.5 mm, 1 mm, 2 mm y 3 mm. Se fijó la misma anchura en la rendija de entrada que en la de salida para cada registro. Se eligieron los picos de señal con mayor respuesta del fotodiodo que no tuvieran otro pico dentro de la anchura de banda nominal del monocromador: 1014.6 nm, 1268.3 nm y 1521.9 nm. No se eligieron la longitud de onda más larga ni la más corta debido al solapamiento de otra línea de emisión en la anchura de banda.

La anchura de banda espectral se caracteriza mediante la anchura de la distribución determinada por las señales cuyo valor es la mitad que la de pico (FWHM por sus siglas en inglés *Full Width Half Maximum*). Las distribuciones de las señales registradas para cada pico de emisión se representan en las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente. Los resultados se presentan normalizados con respecto al valor máximo de cada distribución, para poder apreciar de forma más clara los valores que presentan la mitad de la altura de la distribución. En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se representa desviación en longitud de onda en función de la longitud de onda de referencia para cada anchura de la rendija de salida del monocromador.

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

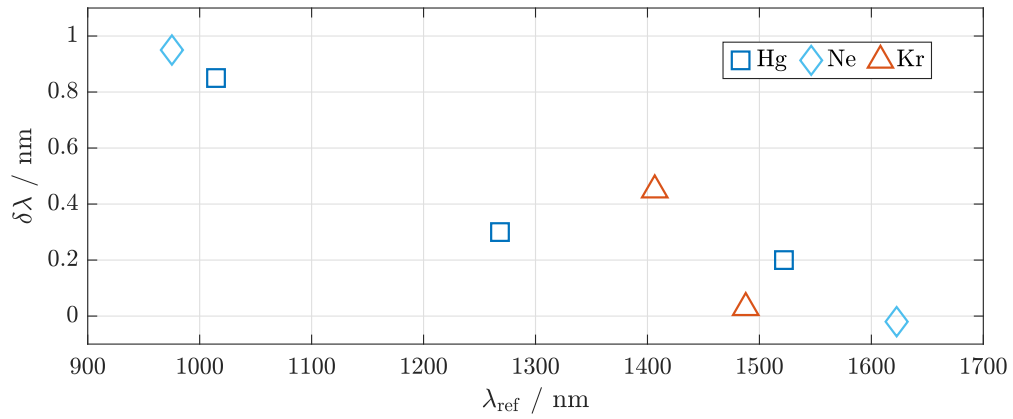


Figura 3.1: Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 0.5 mm.

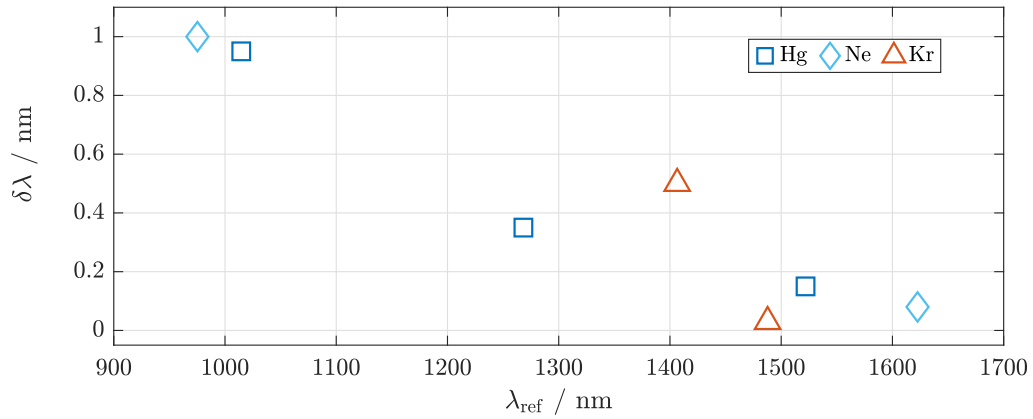


Figura 3.2: Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 1 mm.

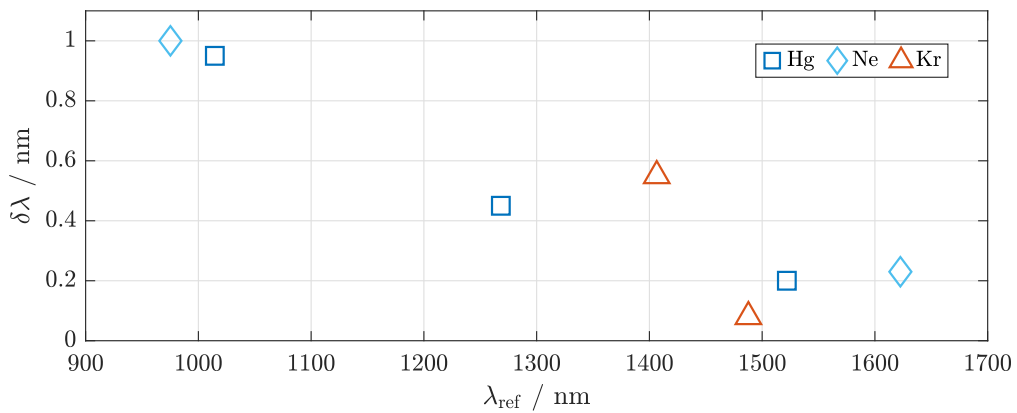


Figura 3.3: Desviación en longitud de onda frente a la longitud de onda de referencia para la anchura de rendija de salida de 2 mm.

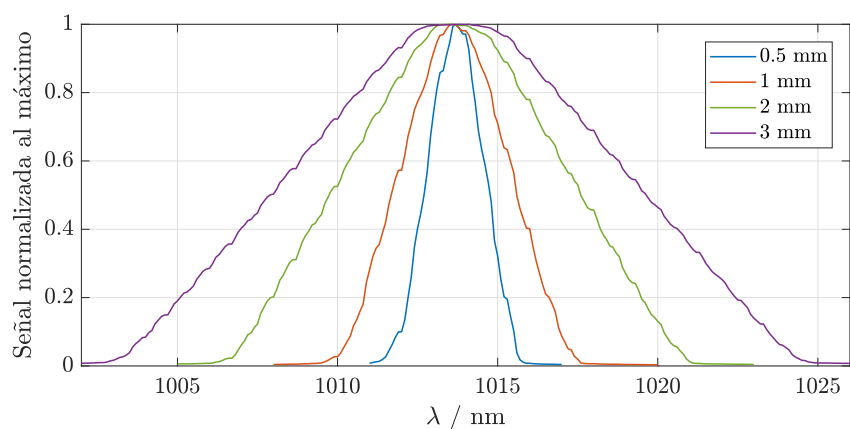


Figura 3.4: Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1014.6 nm.

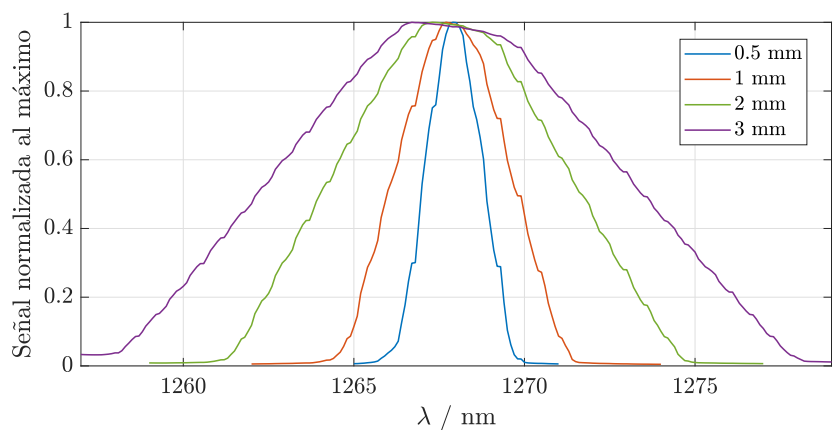


Figura 3.5: Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1268.3 nm.

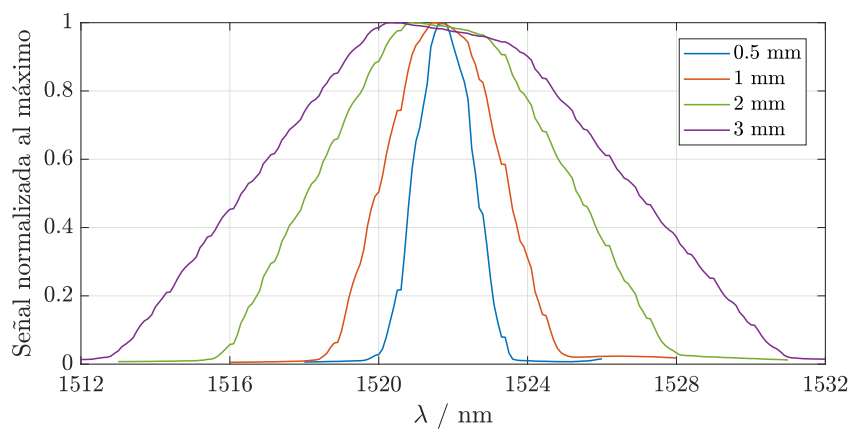


Figura 3.6: Distribuciones espectrales normalizadas de los valores de señal registrados para cada uno de los 4 tamaños de rendija evaluados correspondientes a la longitud de onda de 1521.9 nm.

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

Como se puede observar en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6, para anchuras de rendija mayores que 1 mm, las distribuciones registradas tienen forma trapezoidal, lo cual significa que la mancha luminosa en el plano de la rendija de entrada es menor que la anchura de esta rendija. Este efecto también se observa con menor extensión para la anchura de rendija de 1 mm en las longitudes de onda de 1268.3 nm y 1521.9 nm. Este cambio es propio del monocromador, puesto que la fuente de radiación es la misma en las tres longitudes de onda estudiadas, la lámpara de lápiz de Hg. Para las anchuras menores, la distribución presenta un máximo claro. Por otra parte, en dos de las tres longitudes de onda la base superior de los trapecios no es paralela a la base inferior, lo cual puede deberse a un desalineamiento de la mancha respecto a la rendija de entrada o a un desplazamiento asimétrico de las aristas de la misma al abrirse. En los casos en que la distribución de la respuesta es trapezoidal, se debe usar la longitud de onda media de la base superior como longitud de onda indicativa del equipo en lugar del máximo de respuesta.

En base a los resultados obtenidos, se decidió seleccionar para las medidas del coeficiente de radiancia un tamaño de rendija de 2 mm, tanto en la entrada como en la salida, ya que permite recoger toda la radiación incidente en la rendija de entrada del monocromador en la configuración AN, dado que las dimensiones del área de la mancha luminosa calculada para este caso se encontrarían por debajo de 2 mm, y la anchura de banda es menor que 10 nm, que es un valor habitual en las medidas espectrofotométricas en la región espectral de interés en este trabajo.

En la Tabla 3.2 se recogen los valores calculados de la anchura de banda (FWHM) de cada distribución espectral correspondientes a cada anchura de rendija para cada una de las líneas de emisión. Se puede observar que la anchura de banda crece al aumentar la anchura de la rendija de salida, aunque no en la misma proporción que ésta, y disminuye ligeramente al aumentar la longitud de onda para una anchura de rendija de salida dada.

Tabla 3.2: Valores de anchura de banda en función de la anchura de la rendija de salida para tres longitudes de onda correspondientes a distintos órdenes de líneas de una lámpara de lápiz de Hg.

$\lambda_{\text{ref}} / \text{nm}$	FWHM / nm			
	0.5 mm	1 mm	2 mm	3 mm
1014.60	2.1	4.1	8.1	12.4
1268.25	1.9	3.8	7.7	11.2
1521.90	1.8	3.6	7.2	10.6

Como para el tamaño de rendija seleccionado el valor de desviación espectral está muy por debajo de la anchura de banda del monocromador, el impacto de la incertidumbre de la desviación espectral sobre la incertidumbre del RC se puede considerar despreciable.

3.2.2. Coeficiente de corrección de la no linealidad C_{NL}

Dado que la BRDF viene dada por la relación entre dos señales del fotodiodo separadas por varios órdenes de magnitud, caracterizar el comportamiento lineal del sistema de detección es un punto clave. Para ello, se ha utilizado el método descrito en [30].

Como ha sido mencionado en el capítulo 2, el radiómetro de esta instalación está formado por un fotodiodo de InGaAs que opera en modo de detección directa, amplificado por un pico-amperímetro. El funcionamiento en detección directa supone un reto para este tipo de medidas, en las que hay que medir un nivel bajo de radiación. Es necesario un control estricto de la luz parásita para que la señal oscura esté lo más cercana posible a la corriente de oscuridad del fotodiodo. De hecho, otros instrumentos de este tipo utilizan radiación modulada para minimizar este problema. Sin embargo, la detección síncrona es más compleja desde el punto de vista de la instrumentación, ya que requiere una mayor labor de programación para controlar automáticamente el proceso de medición y un mayor tiempo de ejecución. Dado que mantener el tiempo de medida en valores razonables es importante para la caracterización de la BRDF, que es inherentemente larga, y esto está relacionado con la simplificación de la instrumentación, se decidió utilizar el modo de detección directa en este sistema.

El funcionamiento lineal de un detector depende de las características del propio detector, como el material del que está hecho o su estructura interna, la forma en que se mide su señal, el nivel de irradiancia [31], la extensión de la zona iluminada [32] y otras características de la radiación incidente, e incluso las condiciones ambientales. Por lo tanto, evaluar el rango de linealidad de la respuesta en las mismas condiciones en las que será utilizado el detector es lo más adecuado siempre que sea posible, especialmente cuando su situación de uso puede estar muy próxima a uno de los límites, como es el caso de esta instalación.

Para caracterizar la linealidad, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomienda tres métodos principales [33]. Entre ellos, el método de respuesta espectral diferencial (DSR por sus siglas en inglés *Differential Spectral Responsivity*) presenta las ventajas de no requerir de una referencia conocida o calibrada ni un montaje experimental complejo. Además, la diferencia de respuesta se puede ajustar casi a voluntad y se pueden obtener resultados suficientemente precisos. Las diferentes implementaciones que se pueden realizar para el método DSR permiten modificar de forma controlada la irradiancia sobre un instrumento, o el flujo radiante incidente, sin modificar otras características como la distribución espacial o angular de la radiación incidente. Esto también se puede hacer con otros métodos como el de adición de estímulos, pero se requiere un montaje experimental más sofisticado, que no está al alcance de muchos laboratorios. Quizá por ello, este método DSR se utiliza ampliamente en la caracterización de la linealidad de células solares de referencia (véase, por ejemplo, George Koutsourakis et al 2021 Meas. Sci. Technol. 32 055901.)

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

El método DSR es el más apropiado para ser adaptado al gonio-espectrofotómetro GEFE, porque permite caracterizar la linealidad en las mismas condiciones en las que se utiliza el fotodiodo, ya que puede implementarse en GEFE sin perturbar el sistema de irradiación. Además, este método arroja resultados con una incertidumbre suficientemente baja.

Para implementar el método DSR, es necesario un procedimiento que produzca una atenuación constante de la radiación incidente en el detector para diferentes niveles de flujo radiante, de modo que el intervalo de la señal de respuesta del detector pueda barrer todo el rango de interés. En este trabajo hemos optado por utilizar un filtro neutro de atenuación nominal del 50 %, que puede introducirse en el sistema de irradiación de forma repetitiva sin cambiar otras propiedades del haz incidente. La transmitancia de este filtro vendrá dada por:

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} = \frac{S_t(\lambda)/\mathfrak{R}_t(\lambda)}{S_i(\lambda)/\mathfrak{R}_i(\lambda)} = C_{NL}(\lambda) \frac{S_t(\lambda)}{S_i(\lambda)}; \quad (3.8)$$

donde $\Phi_t(\lambda)$ es el flujo radiante transmitido por el filtro, $\Phi_i(\lambda)$ es el flujo radiante que incide en el filtro, $\mathfrak{R}_t(\lambda)$ es la responsividad del radiómetro correspondiente a la señal $S_t(\lambda)$, la del flujo radiante transmitido, y $\mathfrak{R}_i(\lambda)$ es la responsividad del radiómetro correspondiente a la señal $S_i(\lambda)$, la del flujo radiante incidente. El coeficiente de no linealidad C_{NL} se define como la relación entre las responsividades. Si el radiómetro es lineal, la responsividad no depende del flujo radiante y entonces C_{NL} será igual a uno para cualquier valor de señal incidente.

Por tanto, la caracterización de la linealidad de este fotodiodo es efectuada en modo de detección directa, a temperatura ambiente, utilizando el método DSR con un filtro de densidad óptica neutra, con longitudes de onda seleccionadas de 900 nm, 1100 nm, 1300 nm y 1500 nm; y dentro de un rango de señal desde 100 pA hasta 10 μ A, el rango de señales del radiómetro disponibles en el gonio-espectrofotómetro.

3.2.2.1. Procedimiento experimental

Para la caracterización de la linealidad, se decidió emplear una sección del sistema de irradiación del gonio-espectrofotómetro GEFE (ver figura 2.2), que puede ser observada en la figura 3.7.

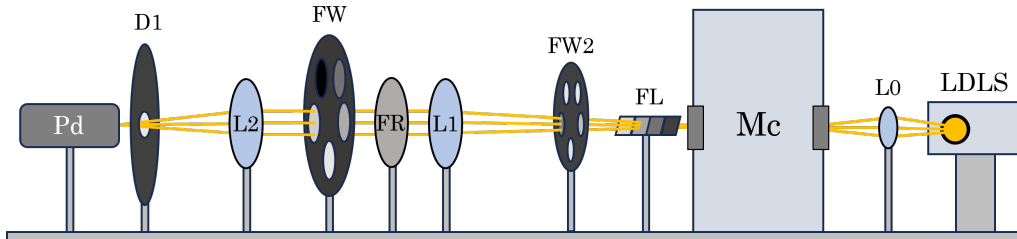


Figura 3.7: Esquema del montaje experimental empleado para caracterizar la linealidad del fotodiodo de InGaAs.

Esta sección es la que incluye a la fuente LDLS, la cual es seleccionada principalmente por el tamaño reducido de la emisión y la ganancia de flujo radiante para alcanzar los niveles de señal más bajos, debido a la presencia del fotodiodo en esta medida. Se emplearon dos lentes para conducir toda la radiación hasta la superficie sensible del fotodiodo. Para ello, se realizó una modificación con respecto a la configuración óptica descrita en la sección 2.1.1, añadiendo entre la rueda de filtros (FW) y el espejo del periscopio (M45) (ver figura 2.2) una lente de 75 mm de focal (L2 en la figura 3.7). L1, de 250 mm de focal se sitúa de forma que su foco coincide con la rendija de salida del monocromador, por lo que se colima la radiación a la salida de ésta. L2 queda situada aproximadamente a 1 metro de L1, y el fotodiodo se coloca en su plano focal imagen, quedando éste situado entre L2 y M45. Esta modificación del gonio-espectrofotómetro permite emplear una sección reducida del sistema, por lo que no se ven alterados los componentes restantes del GEFE.

Para atenuar el flujo radiante incidente sobre el fotodiodo, se combinaron en el camino óptico diferentes filtros neutros: la rueda de filtros FW, ya descrita en el capítulo 2 (también presente en la figura 3.7), que contiene tres filtros con densidades ópticas de 1, 2 y 4, respectivamente; la rueda de filtros FW2 que contiene filtros con densidades ópticas de 0.3 y 0.6, respectivamente; y una placa de sílice fundida con cinco pasos de atenuación (FL en la figura 3.7) de los cuales solo fueron utilizados los de densidad óptica 0.3, 0.6, 1 y 2. La transmitancia espectral de los filtros de atenuación utilizados se muestra en las figuras 3.8 y 3.9.

Como se observa a continuación en las figuras 3.8 y 3.9, la transmitancia de cada filtro tiene una distribución espectral distinta, aunque nominalmente todos son neutros.

Como consecuencia de esto y de la distribución espectral de la fuente LDLS y del propio monocromador, el rango de respuesta evaluado no es uniforme para todas las longitudes de onda. Los sistemas de montaje empleados para los filtros permitieron un posicionamiento muy repetitivo de los mismos. Además, se ha tenido especial cuidado en la orientación de los filtros para que sea lo más cercana posible a incidencia normal, pero evitando interreflexiones.

El filtro de referencia (FR en la figura 3.7), se coloca en la sección en la que el haz se encuentra colimado, entre FW y L1. En esta posición, se maximiza la repetibilidad de la señal del fotodiodo al retirar e insertar el filtro al medir la transmitancia. La transmitancia del filtro de referencia varía con la longitud de onda, desde un valor mínimo de 0.29 a 1100 nm hasta un valor máximo de 0.49 a 1500 nm.

La combinación de filtros neutros permite atenuar la respuesta del fotodiodo hasta en cinco órdenes de magnitud, lo que se corresponde con dieciséis pasos de flujo radiante, cuya atenuación nominal se muestra en la tabla 3.3.

Cada paso de atenuación disminuye la radiación a la mitad con respecto al paso anterior. Téngase en cuenta que la atenuación no es la misma para todas las longitudes de onda, porque los filtros no son totalmente neutros, como se ha comentado antes.

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

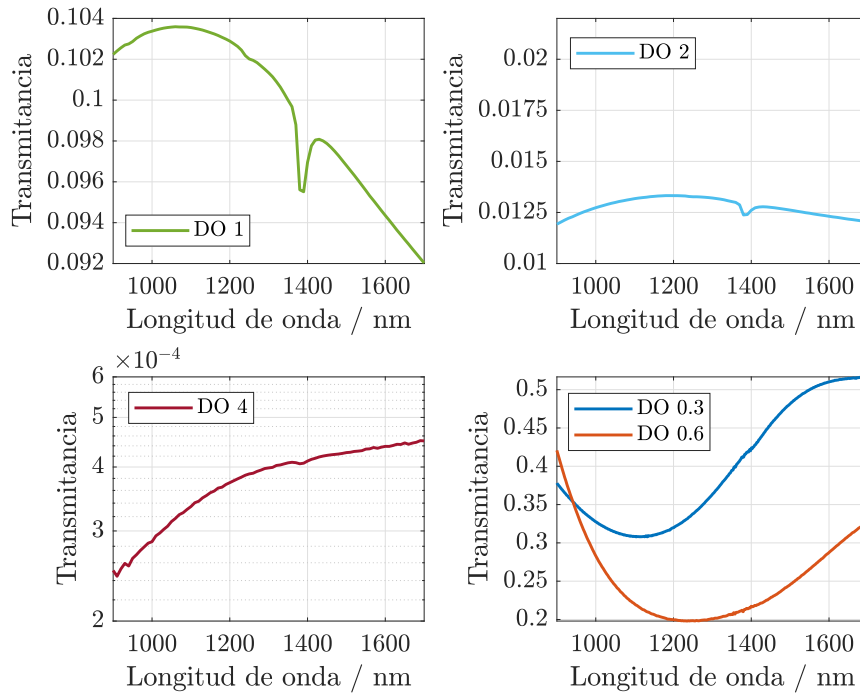


Figura 3.8: Transmitancia espectral de los filtros montados en FW y FW2 y empleados para atenuar la señal.

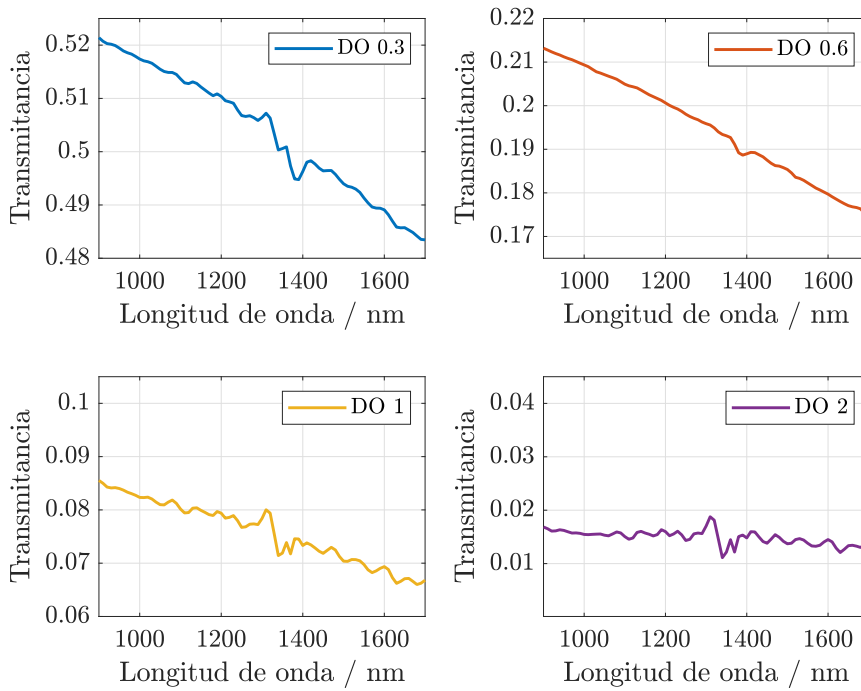


Figura 3.9: Transmitancia espectral de los filtros presentes en FL y empleados para atenuar la señal.

Tabla 3.3: Grado de atenuación nominal de la irradiancia con respecto al primer nivel.

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8
Atenuación	1	0.486	0.266	0.099	0.048	0.027	0.012	5.7×10^{-3}
Nivel	9	10	11	12	13	14	15	16
Atenuación	3.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}	3.3×10^{-4}	1.6×10^{-4}	8.9×10^{-5}	4.1×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.1×10^{-5}

El dispositivo caracterizado es un fotodiodo InGaAs de gran superficie, de la empresa Hamamatsu (Pd en la figura 3.7), con una región fotosensible de 5 mm de diámetro. El rango de detección espectral se extiende desde 900 nm hasta 1700 nm, y está montado en incidencia normal [31]. Para evitar la radiación fuera de la zona sensible del fotodiodo, se coloca una apertura de precisión de 4 mm de diámetro delante del mismo. Ésto es importante porque se ha demostrado que este tipo de fotodiodos tiene un comportamiento no lineal cuando la radiación incide fuera de la zona sensible dentro del anillo colector de portadores de carga [34]. Para minimizar la luz parásita del laboratorio, se monta un deflector junto con un diafragma (D1) cerca del fotodiodo (ver figura 3.7), ajustando su diámetro lo máximo posible a la cintura del haz. Se emplea el picoamperímetro del laboratorio para amplificar y registrar la señal del fotodiodo. El factor de calibración del picoamperímetro (F_{cal}) así como su incertidumbre expandida son calculados para cada escala de amplificación a partir de los datos obtenidos del certificado de calibración del Centro Español de Metrología, y se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Factores de calibración del picoamperímetro y su incertidumbre típica, en el rango de medida usado en esta tesis.

S / A	F_{cal}	$u(F_{\text{cal}})$	S / A	F_{cal}	$u(F_{\text{cal}})$
0.2 mA	0.999890	3.5×10^{-5}	20 nA	0.999790	1.0×10^{-5}
20 μA	0.99996	1.7×10^{-4}	2 nA	0.999540	9.0×10^{-5}
2 μA	0.9998740	5.0×10^{-6}	0.2 nA	1.00046	8.5×10^{-4}
0.2 μA	0.9999150	5.0×10^{-6}	-	-	-

Bajo esta configuración, la señal de fondo rondó los 3 pA, mientras que la respuesta mínima registrada durante las mediciones fue de 70 pA, más de veinte veces por encima del valor de fondo.

La respuesta espectral relativa del fotodiodo en cada paso de atenuación, normalizada al valor máximo, se muestra en la figura 3.10 para algunas longitudes de onda. Para mayor claridad, no se muestran los valores para cada nivel de irradiación y cada longitud de onda, ya que el comportamiento de los no mostrados es similar al de los mostrados.

En el rango de respuesta espectral óptimo de los fotodiodos de InGaAs, la variación máxima de la respuesta está por debajo del 50 %. Por debajo de los 1000 nm, el cambio de respuesta es mayor, ya que la capacidad de respuesta de estos fotodiodos es menor [35].

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

Debido a la variación espectral de la respuesta, el número de adquisiciones para calcular una señal promedio con una alta relación señal-ruido (SNR por sus siglas en inglés) depende de la longitud de onda. Se asume un número mínimo de 5 adquisiciones para lograr una SNR adecuada para cualquier longitud de onda. Por lo tanto, se realizaron 5 adquisiciones para los niveles del 1 al 7, 10 para los niveles del 8 al 10, y 160 para los niveles del 11 al 16. Este procedimiento permite lograr una SNR del mismo orden.

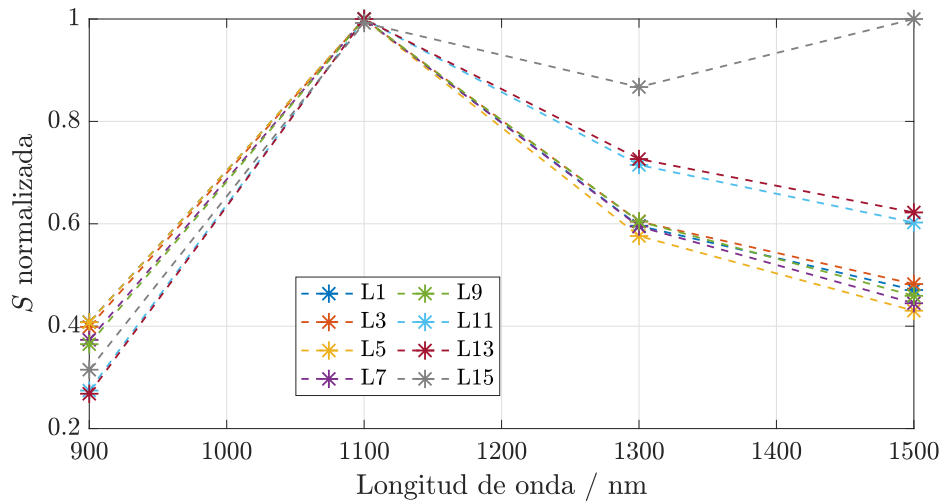


Figura 3.10: Respuesta espectral del fotodiodo normalizada al valor máximo para los niveles impares de atenuación y algunas longitudes de onda.

La SNR para los distintos niveles de flujo radiante transmitidos por el filtro de referencia puede verse en la figura 3.11, y oscila entre 145 y 10^5 . El comportamiento observado para niveles de señal bajos puede estar relacionado con el ruido de fondo.

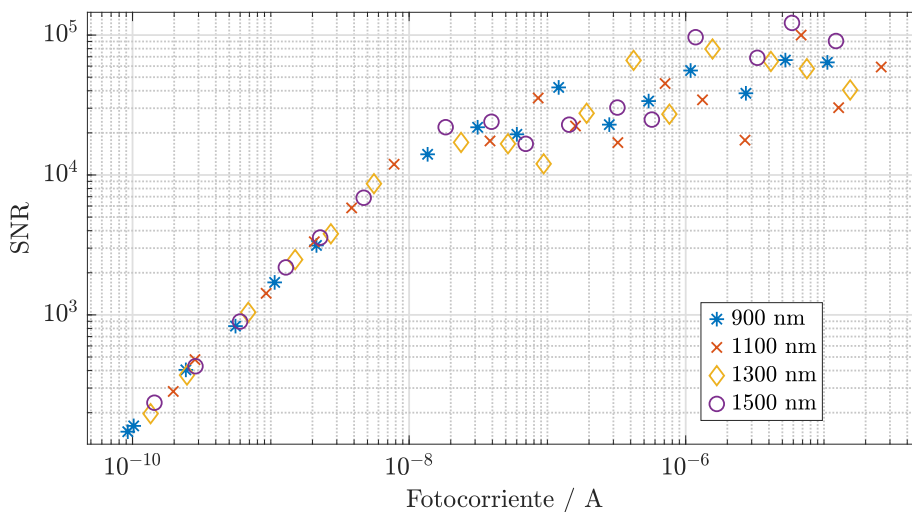


Figura 3.11: SNR en función de la señal correspondiente al flujo transmitido por el filtro de referencia para cuatro longitudes de onda evaluadas: 900 nm, 1100 nm, 1300 nm y 1500 nm.

La respuesta en oscuridad se mide para cada nivel de flujo radiante y se resta a la señal, tanto para la señal con filtro de referencia como sin él. Para tal fin, se emplea el obturador de FW. La señal registrada varía desde 10^{-10} A hasta 3×10^{-5} A.

La luz esparcida del laboratorio procede principalmente de la reflexión y la dispersión en los distintos elementos ópticos del sistema y, por tanto, cambia con el flujo incidente. Modular la radiación incidente y utilizar una técnica de detección síncrona no mejoraría significativamente esta situación, ya que, debido a la configuración del montaje experimental, la modulación tendría que realizarse en una zona que también produciría radiación reflejada o dispersa modulada de la misma manera.

3.2.2.2. Ecuación de medida de la linealidad y propagación de incertidumbres

Según la ecuación 3.8, la transmitancia del filtro de referencia medida en cada nivel de irradiación, n , se puede expresar como:

$$\tau_n(\lambda) = C_{\text{NL},n}(\lambda) \frac{S_{t,n}(\lambda)}{S_{i,n}(\lambda)} = \tau = \text{cte. } \forall n, \quad (3.9)$$

donde las respuestas del fotodiodo $S_{i,n}$ y $S_{t,n}$ se corresponden con los valores después de sustraer la señal de oscuridad.

Dado que para el primer nivel de irradiación la respuesta del fotodiodo tanto para el flujo radiante incidente como para el reflejado es mayor que $1 \mu\text{A}$, se puede suponer, en base a los datos de la literatura [36], que para este nivel de flujo radiante la respuesta del fotodiodo es lineal. Si luego se divide cada valor de transmitancia espectral calculado por el valor espectral obtenido en este primer nivel:

$$\frac{\tau_n(\lambda)}{\tau_1(\lambda)} = \frac{C_{\text{NL},n}(\lambda)S_{t,n}(\lambda)/S_{i,n}(\lambda)}{C_{\text{NL},1}(\lambda)S_{t,1}(\lambda)/S_{i,1}(\lambda)} = 1. \quad (3.10)$$

De donde se puede obtener que la C_{NL} en el paso n vendrá dada por la siguiente ecuación, ya que $C_{\text{NL},1}(\lambda) = 1$:

$$C_{\text{NL},n}(\lambda) = \frac{S_{t,1}(\lambda)S_{i,n}(\lambda)}{S_{i,1}(\lambda)S_{t,n}(\lambda)}. \quad (3.11)$$

Si se considera el factor de calibración del picoamperímetro utilizado para cada nivel de respuesta del fotodiodo, $F_{\text{cal},i,n}$ para el flujo incidente o $F_{\text{cal},t,n}$ para el flujo transmitido, la ecuación de medida quedaría de la siguiente manera:

$$C_{\text{NL},n}(\lambda) = \frac{F_{\text{cal},t,1}S_{t,1}(\lambda)F_{\text{cal},i,n}S_{i,n}(\lambda)}{F_{\text{cal},i,1}S_{i,1}(\lambda)F_{\text{cal},t,n}S_{t,n}(\lambda)}. \quad (3.12)$$

De acuerdo con la “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición” [37] y considerando que las variables de entrada no están correlacionadas, la incertidumbre típica

3.2 Caracterización de los coeficientes de corrección

relativa combinada de $C_{NL,n}$ estará dada por:

$$u_r(C_{NL,n}) = \frac{u(C_{NL,n})}{C_{NL,n}} = \left\{ \left[\frac{u(F_{cal,t,1})}{F_{cal,t,1}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_{t,1})}{S_{t,1}} \right]^2 + \left[\frac{u(F_{cal,i,n})}{F_{cal,i,n}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_{i,n})}{S_{i,n}} \right]^2 + \left[\frac{u(F_{cal,i,1})}{F_{cal,i,1}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_{i,1})}{S_{i,1}} \right]^2 + \left[\frac{u(F_{cal,t,n})}{F_{cal,t,n}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_{t,n})}{S_{t,n}} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (3.13)$$

En este caso, se ha omitido la dependencia espectral para facilitar la escritura. La incertidumbre típica del factor de calibración del picoamperímetro se obtiene a partir de su certificado de calibración, mientras que la incertidumbre típica de la respuesta de los fotodiodos se da en todos los casos mediante:

$$u(S) = [\sigma^2(S) + u_{res}^2(S)]^{1/2} + [\sigma^2(S_0) + u_{res}^2(S_0)]^{1/2}, \quad (3.14)$$

donde $\sigma(S)$ es la desviación estándar de la media para las lecturas de respuesta del fotodiodo, $\sigma(S_0)$ es la desviación estándar de la media para la lectura de oscuridad del fotodiodo, y $u_{res}(S_r)$ y $u_{res}(S_0)$ son los valores de incertidumbre estándar debido a la resolución de las lecturas. Nótese que, como las lecturas están correlacionadas, no se suman en cuadratura las componentes de incertidumbre de la señal de oscuridad y de la señal luminosa. Otros componentes de incertidumbre como la variación de la transmitancia del filtro de referencia con la temperatura o la repetibilidad en el posicionamiento del filtro de referencia son despreciables en comparación con los considerados.

3.2.2.3. Resultados

Los valores del factor de no linealidad espectral obtenidos para cada nivel de flujo radiante se muestran en función de la fotocorriente transmitida, $S_{t,n}$, en la figura 3.12. Se utiliza una escala logarítmica para el eje X.

Como se ve en la figura 3.12, a excepción de un par de valores a 900 nm, todos los factores de corrección de no linealidad están incluidos dentro de $\pm 0.2\%$, y la mayor parte de ellos dentro de un rango aún más pequeño $[0,999, 1,001]$, $\pm 0.1\%$. A 900 nm, la capacidad de respuesta típica del fotodiodo es mucho menor, lo que produce valores señal-ruido más bajos que para las otras longitudes de onda para niveles de flujo radiante similares. Por esta razón, la medición en esa longitud de onda tiene una mayor incertidumbre y se registra una mayor desviación de linealidad para los niveles de respuesta más bajos. Por otro lado, no se observa dependencia entre el factor de corrección de no linealidad y la longitud de onda. Se observa un desempeño similar para las longitudes de onda no mostradas. Por tanto, no se ha detectado ningún patrón de dependencia espectral.

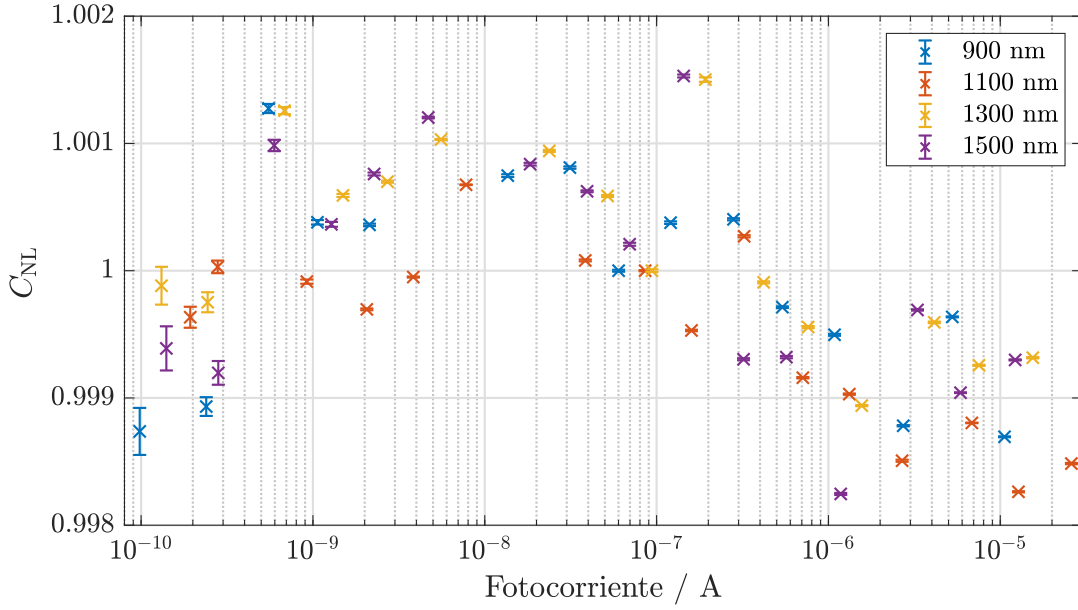


Figura 3.12: Coeficiente de no linealidad espectral frente a la señal transmitida para cuatro longitudes de onda evaluadas: 900 nm, 1100 nm, 1300 nm y 1500 nm.

Estos resultados concuerdan con resultados anteriores publicados sobre la linealidad de fotodiodos de InGaAs de región excitable grande [36] en el rango por encima de $0,1 \mu\text{A}$. Hasta donde estos autores saben, no se han publicado resultados de linealidad para estos fotodiodos de InGaAs de área grande por debajo de $0,1 \mu\text{A}$, por lo que no ha sido posible corroborar el desempeño lineal encontrado en este trabajo con otros autores.

Los valores combinados de incertidumbre expandida del factor de no linealidad se muestran en la figura 3.13, de la misma forma que los mostrados en la figura 3.12 para el factor de corrección de no linealidad. Estos valores se obtienen de la ecuación 3.13, multiplicando el valor de incertidumbre estándar por un factor de cobertura de 2.

La incertidumbre en la medición de la respuesta del fotodiodo es la mayor contribución a la incertidumbre combinada. La incertidumbre del factor de calibración del picoamperímetro es despreciable en comparación con la anterior, al igual que la resolución de lectura, por lo que es fiable realizar estas medidas en modo de detección directa con equipos de este tipo hasta valores de fotocorriente tan bajos como 100 pA .

Se puede observar en la Fig. 3.13 que cuanto menor es el nivel de flujo radiante, mayor es la incertidumbre, a pesar del mayor número de repeticiones en la respuesta del fotodiodo de lectura. Por tanto, si se quiere reducir la incertidumbre para los niveles inferiores, es necesario ver cómo sustituir el sistema de amplificación mencionado por otro de mayor sensibilidad.

En base al análisis anterior, no se va a efectuar una corrección de la no linealidad del fotodiodo para las medidas del RC que son efectuadas en este capítulo, por lo que el coeficiente de no linealidad será 1. Se tomará por incertidumbre de la linealidad la

variación de ésta.

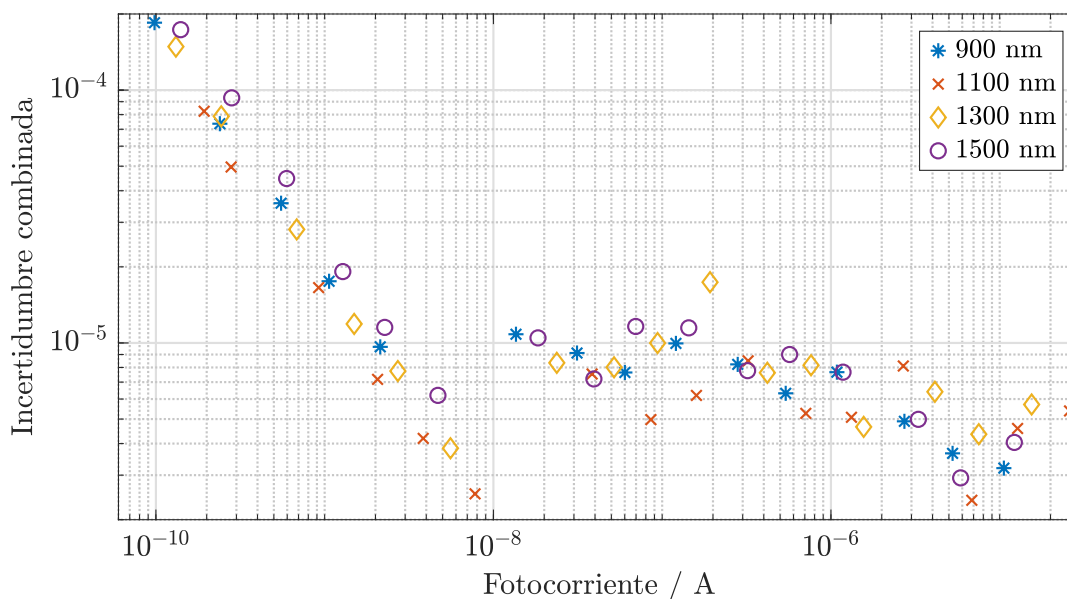


Figura 3.13: Incertidumbre combinada frente a la señal incidente para las cuatro longitudes de onda evaluadas.

El contenido presentado en este apartado ha sido publicado durante la realización de esta tesis [38].

3.3. Descripción de las muestras a caracterizar

Entre los patrones de reflectancia más empleados por presentar propiedades más óptimas de reflexión y lambertianidad [13], se encuentran los fabricados a partir de un compuesto cerámico, de politetrafluoroetileno (PTFE), de vidrio opal (concretamente las muestras con certificado de referencia BCR-406) y de sulfato de bario (BaSO_4) prensado o en pintura.

De entre todos ellos, las muestras de compuesto cerámico son los patrones más robustos y estables en el tiempo; motivo por el cual se disponía en el laboratorio de varias muestras de este tipo, en particular una de la marca CERAM Research identificada como AH14, de forma cuadrada y con 100 mm de lado, que puede apreciarse en la Figura 3.14.

De esta muestra se tienen datos previos de factor de radiancia espectral $0^\circ:45^\circ$ para la región espectral de interés en este trabajo medidos en el *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* de Alemania, conocido por sus siglas PTB. El principal inconveniente de este tipo de muestras es que presentan una reflectancia inferior al del resto de patrones citados.

También se dispone en el laboratorio de una pareja de muestras de PTFE, fabricadas a partir del material «ODM98» de la empresa «Gigahertz Optics» (patrones identificados

en este trabajo como G97 y G97p). La reflectancia declarada por el fabricante es superior a un 93 % en el intervalo espectral comprendido entre 250 nm y 2500 nm. Debido a la antigüedad de estas muestras, y dada la posibilidad de degradación que pueden sufrir con el tiempo, se decidió adquirir otra pareja de muestras de PTFE, de la marca «Zenith Polymer» de la empresa «Sphere Optics», identificados en este trabajo como ZP1 y ZP2, respectivamente. Éstas muestras se pueden emplear como referencia para estimar la degradación con el paso del tiempo de la reflectancia y/o lambertianidad de la anterior pareja de muestras mencionadas, aunque no son del mismo material exactamente, mediante la comparación directa de los valores del factor de reflectancia bidireccional espectral y angular. El fabricante de las muestras ZP declara unos valores de reflectancia por encima del 99 % en el intervalo espectral comprendido entre 250 nm y 2450 nm, además de tener un comportamiento casi lambertiano.

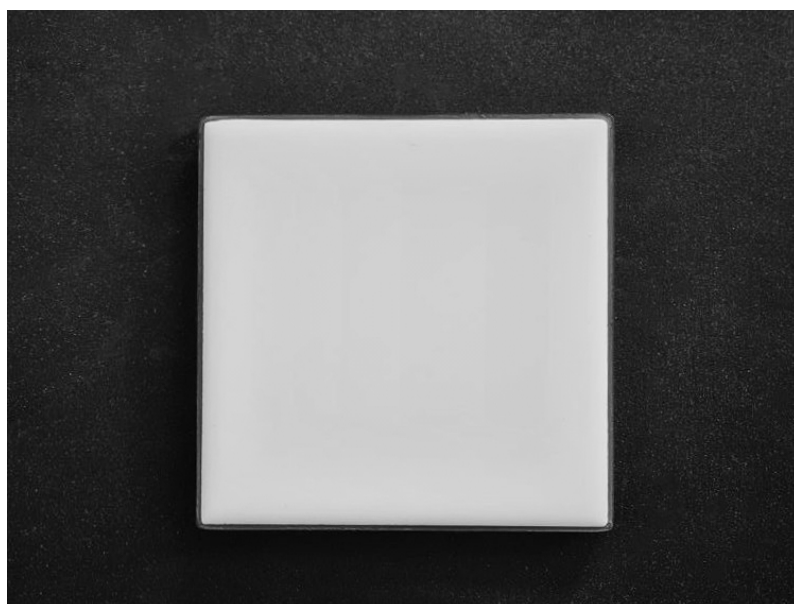


Figura 3.14: Patrón de reflectancia cerámico AH14.

Se decidió adquirir también otra pareja de muestras con mayor estabilidad que las muestras de PTFE, que fueran menos sensibles a la acción de agentes externos, pero con unas propiedades de reflectancia y lambertianidad similares. Las muestras de vidrio opal cumplen este criterio, pero no se pueden adquirir por haber cesado su producción, por lo que se decidió seleccionar un material distinto, el cual es ofrecido en sustitución del mismo. Este material, «AluWhite98», de la empresa «Avian Technologies», es un compuesto cerámico de vidrio y aluminio, declarando el fabricante unas características de reflectancia superiores al 97 % para el intervalo espectral comprendido entre 400 nm y 2100 nm, y de nuevo con un comportamiento casi lambertiano. Se adquirieron dos muestras de este material que se identifican en este trabajo como patrones AW1 y AW2. Según el fabricante,

3.4 Montaje experimental para la medida del RC $0^\circ:45^\circ$

estas muestras pueden ser limpiadas lijándolas con papel de carburo de silicio resistente al agua, bajo un chorro de agua, teniendo que ser secadas posteriormente a 150°C .

Estas tres parejas de muestras son pastillas cuadradas de 50 mm de lado, y pueden ser observadas en la Figura 3.15. Como se puede apreciar en dicha figura, ZP1 no lleva una montura acoplada, aspecto que no afecta a la realización de las medidas.

Debido a la dificultad de fabricación en el laboratorio de los patrones de reflectancia con polvo prensado de BaSO_4 con las mejores propiedades ópticas, de forma repetitiva y por su inestabilidad temporal a corto plazo, se decidió prescindir de la caracterización de este tipo de muestras en este trabajo.



Figura 3.15: Ejemplares de cada tipo de muestra que va a ser caracterizada como patrón del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ en este trabajo, de izquierda a derecha: G97, AW1 y ZP1.

3.4. Montaje experimental para la medida del RC $0^\circ:45^\circ$

Para la caracterización del coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$, se hace necesario modificar la configuración óptica del sistema de irradiación del gonio-espectrofotómetro descrita en el capítulo 2, debido al empleo del fotodiodo InGaAs como elemento de detección para esta medida.

En el empleo de fotodiodos como dispositivos de detección en medidas radiométricas, la señal generada por el dispositivo y su responsividad están directamente relacionadas con el flujo radiante que incide sobre la superficie del sensor, como ha sido introducido al principio de este capítulo (ver ecuación 3.1). Debido a esto, para la medida de la radiación incidente, el posicionamiento de la superficie de detección de estos dispositivos ha de estar situado en el plano de incidencia de la radiación. Adaptar las dimensiones de este haz para que sea registrado en su totalidad por el elemento de detección es imperativo. Para

lograr tal fin, en primer lugar, se escogió la fuente LDLS como elemento de irradiación del sistema, por los mismos motivos mencionados en el apartado correspondiente al cálculo del coeficiente de no linealidad (ver apartado 3.2.2). Además, se modificó la configuración óptica del sistema de irradiación para obtener un área de irradiación sobre el plano de la muestra lo suficientemente reducida para que sea recogida en su totalidad por la superficie sensible del fotodiodo, teniendo en cuenta las reducidas dimensiones de la emisión de la fuente LDLS. Para ello, las lentes L2 y L4 del sistema GEFE, de igual longitud focal, son colocadas a esta distancia, 250 mm, con respecto a la rendija de salida del monocromador para la primera, y con respecto al plano de la muestra para la segunda. El montaje óptico del sistema de irradiación mencionado puede ser observado en la Figura 3.16. Bajo esta configuración, la imagen que produce L4 tiene las mismas dimensiones que el objeto para L2. Se ha de tener en cuenta que este sistema óptico parte de un objeto para la primera lente del sistema, L2, que está en la rendija de salida del monocromador, y es equivalente a su vez a la imagen producida por L0 en la rendija de entrada de éste. La imagen producida por L0 en el plano de la rendija de entrada del monocromador es más grande que la emisión de la fuente, como se comenta en el Anexo A de esta tesis, por lo que el objeto para L2, y la imagen resultante de L4 sobre el plano de la muestra también lo son. Teniendo en cuenta el tamaño sobre el plano de la muestra y el tamaño del punto de emisión de la fuente, el aumento lateral resultante del sistema empleando esta configuración es aproximadamente 12.5. Para la selección de la longitud de onda se emplea el monocromador de la instalación, dado que el dispositivo de detección carece de resolución espectral.

El sistema de detección está compuesto por un fotodiodo de InGaAs ya descrito en este capítulo, que es el detector que presenta mejor relación señal/ruido en el intervalo espectral de interés, además de baja señal de oscuridad, amplio rango de linealidad y una mayor estabilidad temporal [31, 39–42]. Se utiliza un fotodiodo en lugar de un array de detectores porque permite obtener una incertidumbre de medida menor. El fotodiodo lleva acoplada una apertura calibrada de 4 mm de diámetro para evitar que incida radiación fuera del área sensible del mismo. Este elemento es amplificado por un picoamperímetro Keithley 6485. La linealidad de este conjunto ha sido evaluada como se ha mostrado en la sección 3.2.2 de este capítulo. Para realizar la medida de la señal de oscuridad, se emplea la posición de obturación del haz incidente de la rueda de filtros de la instalación (FW en la Figura 3.16).

Para efectuar la caracterización del valor del coeficiente de radiancia, se realizaron tres ciclos de medida. En cada uno se hace una medida del flujo radiante incidente en cada una de las longitudes de onda seleccionadas, comprendiendo desde 900 nm a 1700 nm, en pasos de 50 nm; y luego se mide el flujo reflejado por cada una de las tres muestras en el ángulo sólido definido por la apertura del fotodiodo. De esta forma sólo es necesario realizar un proceso de alineamiento completo de las posiciones de incidencia y reflexión del detector en lugar de tres, minimizando así la mayor fuente de error de esta medición, que es el

3.4 Montaje experimental para la medida del RC $0^\circ:45^\circ$

alineamiento. Para medir el flujo incidente, el fotodiodo se sitúa en el plano de incidencia sobre la muestra, como ha sido mencionado, recibiendo directamente la radiación de la fuente que pasa a través del sistema óptico; mientras que en la posición de reflexión el fotodiodo se sitúa en el anillo de desplazamiento del GEFE, recibiendo por tanto la luz reflejada por la muestra, situada en el plano de medida, en el ángulo sólido de detección.

Para efectuar la medida del flujo incidente, se monta el fotodiodo en el brazo robot, de forma que el plano que comprende la apertura del fotodiodo es perpendicular a la dirección del eje óptico (véase la Figura 3.16).

En primer lugar, se usa un espejo que, posicionado sobre la apertura, es desplazado a lo largo del eje óptico hasta que los haces de los láseres de alineamiento se cortan en el centro de su superficie. A continuación, éste es orientado con el brazo robot de forma que estos láseres, situados a 45° y -45° del eje óptico, sean copropagantes. La disposición de los láseres y su emisión se pueden observar en la Figura 2.10 de la sección correspondiente del capítulo 2. De esta manera, quedan ajustadas las rotaciones en torno a los ejes Y y Z del sistema. La rotación con respecto al eje X no se ajusta debido a que el fotodiodo registra la radiación sin importar el ángulo de rotación del detector en dicho eje con respecto al eje óptico. Luego, se retira el espejo y se desplaza de nuevo el detector a lo largo del eje óptico hasta que los haces de los láseres vuelven a intersectar en el plano de la apertura, ajustando de esta forma la posición de medida para el eje X . Para comprobar que toda la radiación queda comprendida dentro de la apertura, se emplea una cámara de infrarrojo, ajustando finalmente así la posición de medida en los ejes Y y Z .

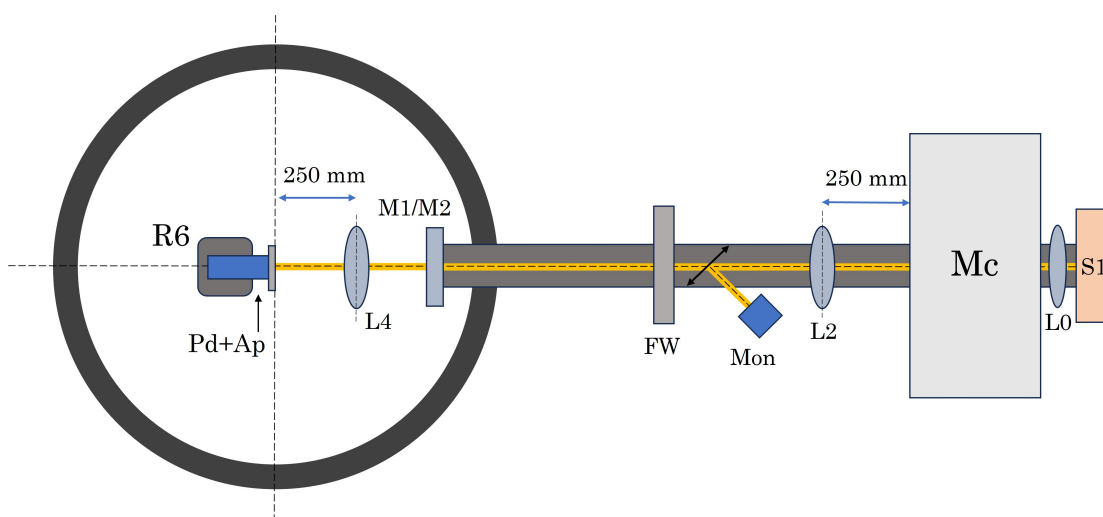


Figura 3.16: Esquema de la configuración del gonio-espectrofotómetro GEFE para la posición de registro del flujo incidente en la medida del coeficiente de radiancia a la geometría de referencia $0^\circ:45^\circ$.

Para efectuar la medida del flujo reflejado, se coloca el fotodiodo en la plataforma giratoria del gonio-espectrofotómetro GEFE (véase la Figura 3.17).

Para ajustar la posición correspondiente al ángulo de reflexión, se emplea como referencia la incidencia de uno de los láseres de alineamiento sobre la apertura del fotodiodo. Se emplea el láser situado a $\phi_A = -45^\circ$ debido a que su emisión incide sobre la parte del anillo en la que se realizará la medida. En segundo lugar, la distancia entre el centro de la muestra y el centro de la apertura del fotodiodo se determina empleando una barra patrón de extremos de 40 cm de longitud, y desplazando el fotodiodo a lo largo de la dirección de reflexión hasta que la apertura del mismo justo toca el extremo de la barra patrón. Para dicho ajuste se hizo uso de una superficie plana en lugar de los patrones para evitar el posible deterioro de los mismos por el contacto con el extremo de la barra patrón. La superficie de la muestra y la de la apertura han de ser paralelas entre sí durante este ajuste. Esta distancia, en relación al radio de la apertura, define el ángulo sólido de reflexión.

Seguidamente se alinea la muestra siguiendo el mismo procedimiento usado para alinear el fotodiodo en la medida del flujo incidente, pero ajustando exclusivamente la posición en la dirección del eje óptico. La posición dentro de los ejes restantes y sus rotaciones correspondientes está preconfigurada en el programa del brazo robot, para muestras planas como las habituales en el laboratorio. Por último se apantalla el detector para evitar que llegue al mismo radiación de direcciones distintas a la reflexión. Entre las medidas de flujo reflejado por cada muestra se repite el ajuste del centro de las mismas al centro de giro, desplazando la muestra a lo largo del eje óptico, pues cada una tiene un espesor diferente.

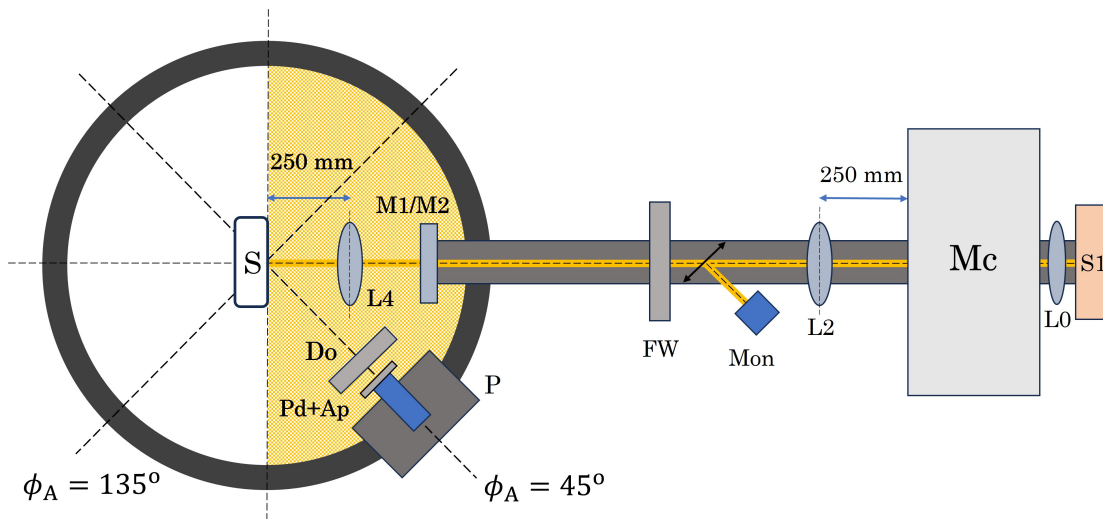


Figura 3.17: Esquema de la configuración del sistema GEFÉ para la medida del flujo reflejado a la geometría de referencia $0^\circ:45^\circ$.

Durante el transcurso de todo el proceso de medida, se controla el flujo radiante emitido por la fuente LDLS, registrando la señal del detector monitor del gonio-espectrofotómetro, que recoge el flujo radiante reflejado por una lámina situada en el camino óptico entre L2 y FW. Con ello se busca compensar posteriormente la deriva temporal de dicha fuente.

El número de adquisiciones efectuado para la señal fue de 100, tanto para la posición de

3.5 Caracterización de las variables geométricas

incidencia como para la de reflexión. Se registró adicionalmente con cada medida la señal de oscuridad correspondiente, empleando el obturador de FW y realizando 20 lecturas de la señal. La temperatura de la sala durante el proceso de medida estuvo entre 20°C y 21°C. Como se ha comentado anteriormente, la anchura de banda espectral es 8 mm aproximadamente, la correspondiente a una rendija de entrada y salida del monocromador de 2 mm.

Se utilizó sólo un ejemplar de cada tipo de muestra para optimizar el tiempo de caracterización. Cabe suponer una alta similitud entre las del mismo fabricante al pertenecer al mismo lote de fabricación. AH14 y G97p no fueron seleccionadas para la caracterización del valor de reflectancia 0°:45°, pero sí serán incluidas en la caracterización de la BRDF del capítulo siguiente. La primera por presentar una reflectancia inferior al resto de muestras, y la segunda debido a una imperfección en su superficie, aspectos que pueden tener un impacto en la incertidumbre del coeficiente de radiancia calculado.

3.5. Caracterización de las variables geométricas

3.5.1. Coseno del ángulo polar de reflexión

El valor del ángulo polar de reflexión es fijo en estas medidas con un valor de 45°. En el cálculo de la incertidumbre del ángulo polar de reflexión interviene el motor de pasos de la plataforma, cuya incertidumbre típica de posicionamiento es 0.1°. Este valor viene dado fundamentalmente por la resolución del motor y su repetibilidad. Su valor en radianes, por tanto, es expresado de la siguiente manera:

$$u(\theta_r) = \frac{0.1\pi}{180}; \quad (3.15)$$

La incertidumbre del coseno de θ_r (véase la ecuación 3.6) es por tanto:

$$u(\cos \theta_r) = \frac{\partial \cos \theta_r}{\partial \theta_r} = \text{sen } \theta_r u(\theta_r); \quad (3.16)$$

Tabla 3.5: Valores e incertidumbres para el cálculo de $\cos \theta_r$.

Variables	Valor /rad	Incertidumbre /rad
θ_r	0.7854	1.8×10^{-3}
$\text{sen } \theta_r$	0.7071	-
$\cos \theta_r$	0.7071	1.2×10^{-3}

3.5.2. Ángulo sólido de reflexión

El ángulo sólido de reflexión (ω_r) se calcula mediante una aproximación de Taylor, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\omega_r = \frac{A_a}{d_c^2}; \quad (3.17)$$

siendo A_a el área de la apertura del detector y d_c la distancia entre la muestra y la apertura de precisión del detector. La distancia entre el centro de la apertura de precisión y el origen de coordenadas del plano de la muestra se midió experimentalmente empleando un conjunto de barras calibradas, eligiendo las necesarias para dar como resultado la longitud deseada (40 cm), y siendo colocadas entre una muestra de prueba y la apertura de precisión haciendo contacto con ambas superficies. La incertidumbre de la combinación de los segmentos utilizados se obtiene del certificado de calibración de las barras emitido por el Centro Español de Metrología. El valor del área de la apertura, así como su incertidumbre fue calibrado también por el Centro Español de Metrología. A partir de los valores anteriores y según la guía GUM, la incertidumbre típica combinada del ángulo sólido de reflexión puede ser expresada como:

$$u(\omega_r) = \sqrt{\left[\frac{1}{d_c^2}\right]^2 u^2(A_a) + \left[\frac{2A_a}{d_c^3}\right]^2 u^2(d_c)}. \quad (3.18)$$

Los valores de los parámetros involucrados en el cálculo del ángulo sólido de reflexión y su incertidumbre, así como el resultado de dichos cálculos, se pueden observar en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Variables e incertidumbres típicas de los parámetros involucradas en el cálculo de ω_r y su incertidumbre.

Variables	Valor	Incertidumbre
d_c	$4,00000 \times 10^{-1} \text{ m}$	$1.4 \times 10^{-5} \text{ m}$
A_a	$1.26848 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$1.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2$
ω_r	$7.92800 \times 10^{-5} \text{ sr}$	$9.5 \times 10^{-9} \text{ sr}$

3.6. Resultados del RC

Los resultados del coeficiente de radiancia espectral son calculados según la ecuación 3.6, en la cual se añade, además, el factor de calibración del picoamperímetro. Se omite la corrección espectral por lo explicado al final del apartado 3.2.1, debido a que la desviación

3.6 Resultados del RC

espectral máxima es muy inferior a la anchura de banda con el tamaño de rendija fijado, además de que las muestras empleadas en la caracterización del RC son espectralmente neutras. Por tanto, la expresión para el cálculo del RC quedaría reescrita como:

$$q_{0:45}(\lambda) = \frac{S_r F_{\text{cal},r}}{S_i F_{\text{cal},i}} \frac{1}{\omega_r \cos \theta_r} C_{\text{NL}} C_{\Phi}, \quad (3.19)$$

y su incertidumbre típica relativa asociada se calcula como ya ha sido introducido en el apartado 3.2.2 (ecuación 3.13) como:

$$u_r(q_{0:45}) = \frac{u(q_{0:45})}{q_{0:45}} = \left\{ \left[\frac{u(F_{\text{cal},r})}{F_{\text{cal},r}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_r)}{S_r} \right]^2 + \left[\frac{u(F_{\text{cal},i})}{F_{\text{cal},i}} \right]^2 + \left[\frac{u(S_i)}{S_i} \right]^2 + \left[\frac{u(\omega_r)}{\omega_r} \right]^2 + \left[\frac{u(\cos \theta_r)}{\cos \theta_r} \right]^2 + \left[\frac{u(C_{\text{NL}})}{C_{\text{NL}}} \right]^2 + \left[\frac{u(C_{\Phi})}{C_{\Phi}} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (3.20)$$

Nótese que cada coeficiente de linealidad y de corrección del flujo radiante aparece dividido en la expresión según la configuración: incidente o reflejada, ya que su incertidumbre depende de la configuración de medida. La incertidumbre para las señales se expresa según la ecuación 3.14 (apartado 3.2.2), pero en este caso el número de repeticiones para la señal y la oscuridad no es el mismo, por tanto se calcula como:

$$u(S) = \left[\frac{\sigma^2(S)}{n_{\text{rep}}} + u_{\text{res}}^2(S) \right]^{1/2} + \left[\frac{\sigma^2(S_0)}{n_{\text{rep},0}} + u_{\text{res}}^2(S_0) \right]^{1/2}. \quad (3.21)$$

La incertidumbre para la resolución de la señal se calcula según la guía GUM asumiendo una distribución de probabilidad rectangular. El factor de calibración del picoamperímetro y su correspondiente incertidumbre se obtienen de su certificado de calibración emitido por el Centro Español de Metrología (tabla 3.4, apartado 3.2.2) para el rango de medición usado en esta tesis.

Las señales reflejada e incidente y sus respectivas señales de oscuridad, y el coeficiente de radiancia calculado a partir de todos los parámetros descritos en esta sección e involucrados en la ecuación de medida, se muestran en las tablas contenidas en el Anexo B, junto con la incertidumbre expandida $k = 2$ de cada variable y del coeficiente de radiancia; para los tres ciclos de medida y cada uno de los patrones evaluados.

En las Figuras 3.18, 3.20 y 3.22 se muestra el coeficiente de radiancia calculado y su incertidumbre expandida $k = 2$ para los patrones G97, AW1 y ZP1 respectivamente. En las Figuras 3.19, 3.21 y 3.23 se representan la incertidumbre relativa expandida $k = 2$ y las contribuciones a la incertidumbre de cada variable involucrada en la medida del coeficiente de radiancia para cada patrón mencionado, respectivamente.

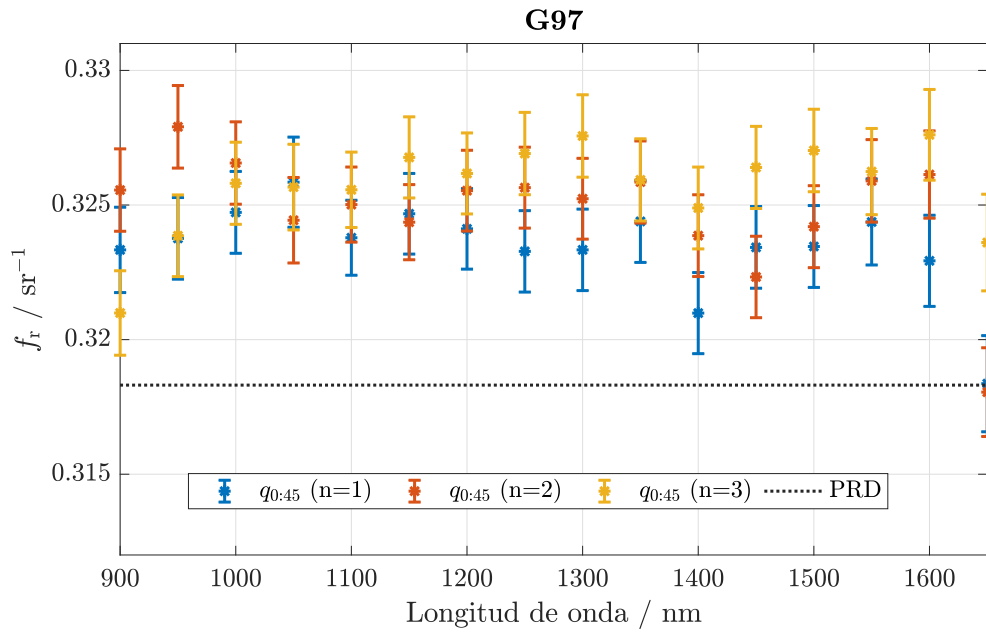


Figura 3.18: Coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón G97.

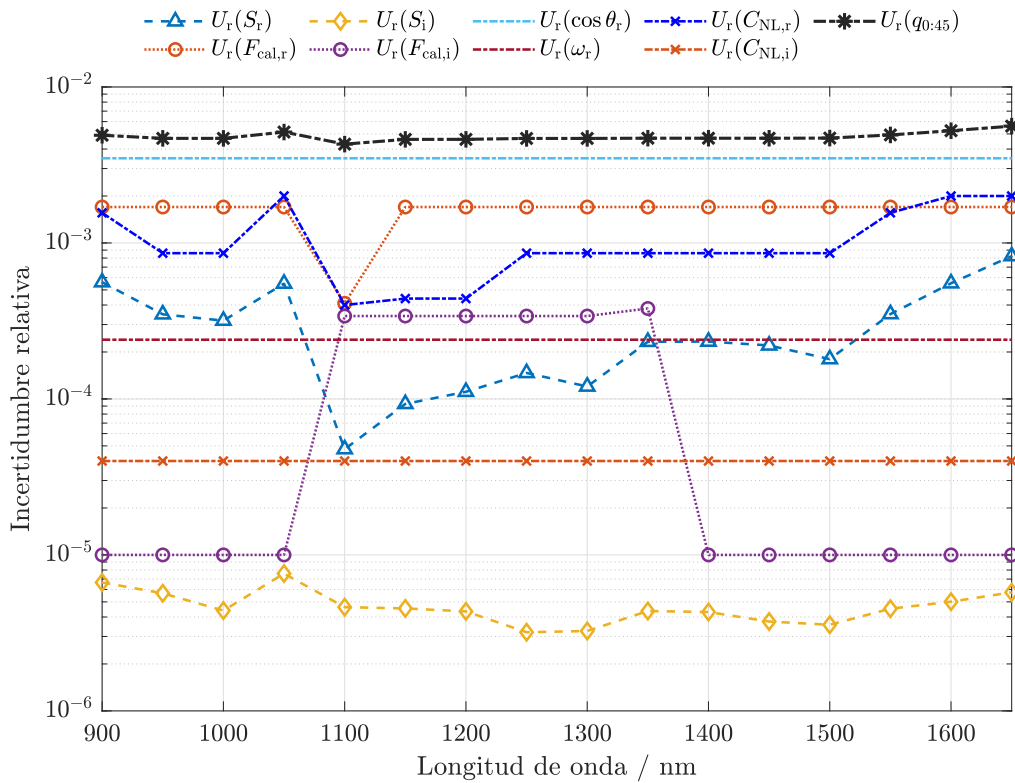


Figura 3.19: Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra G97, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.

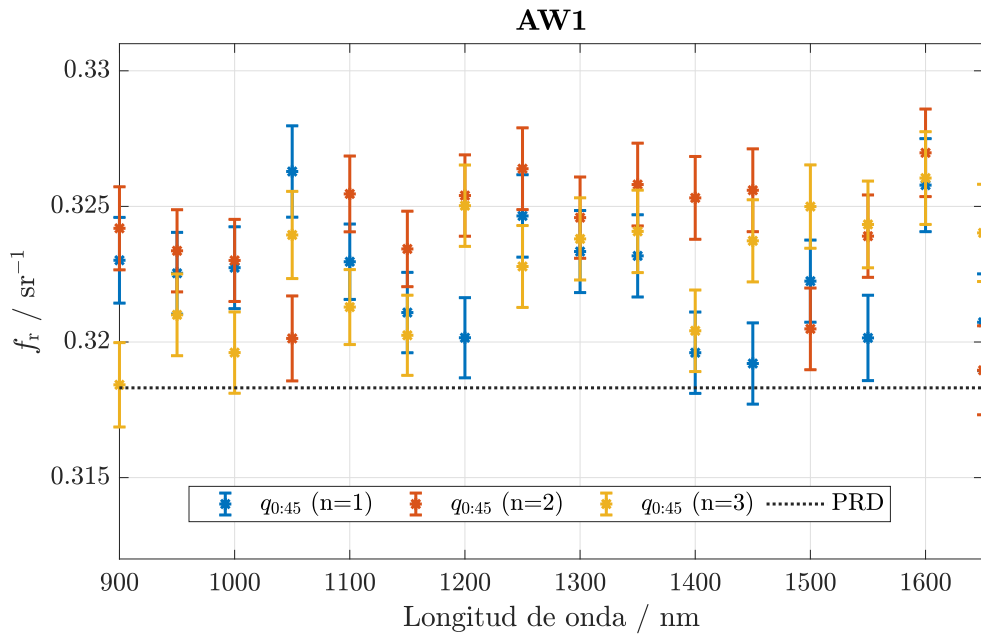


Figura 3.20: Coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón AW1.

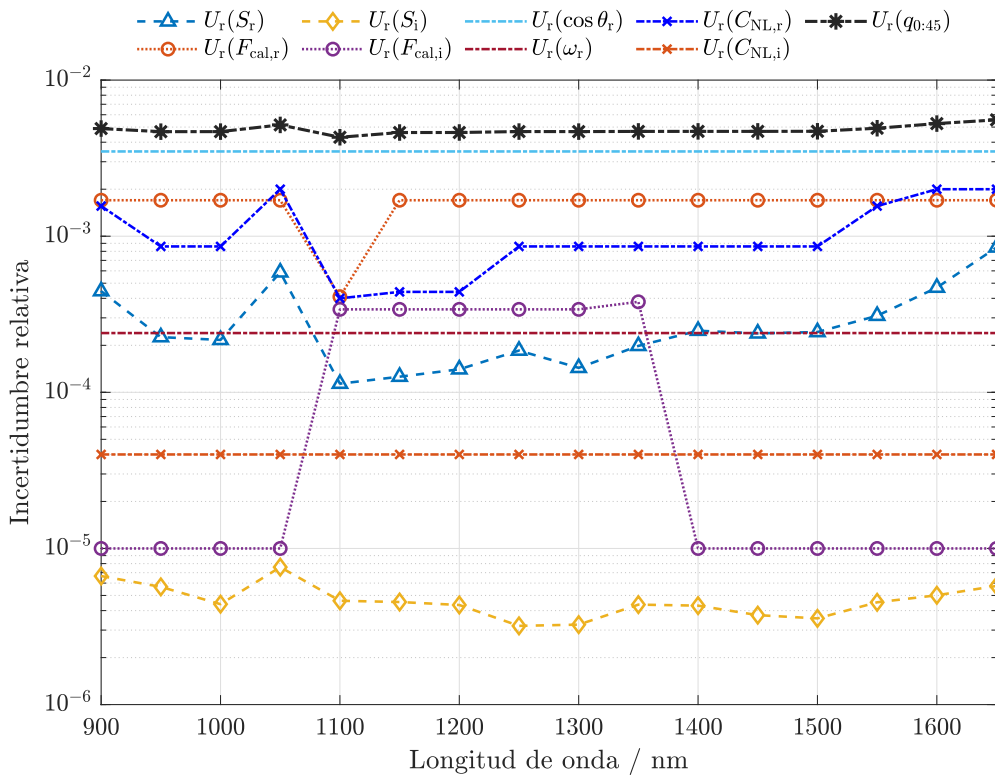


Figura 3.21: Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra AW1, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.

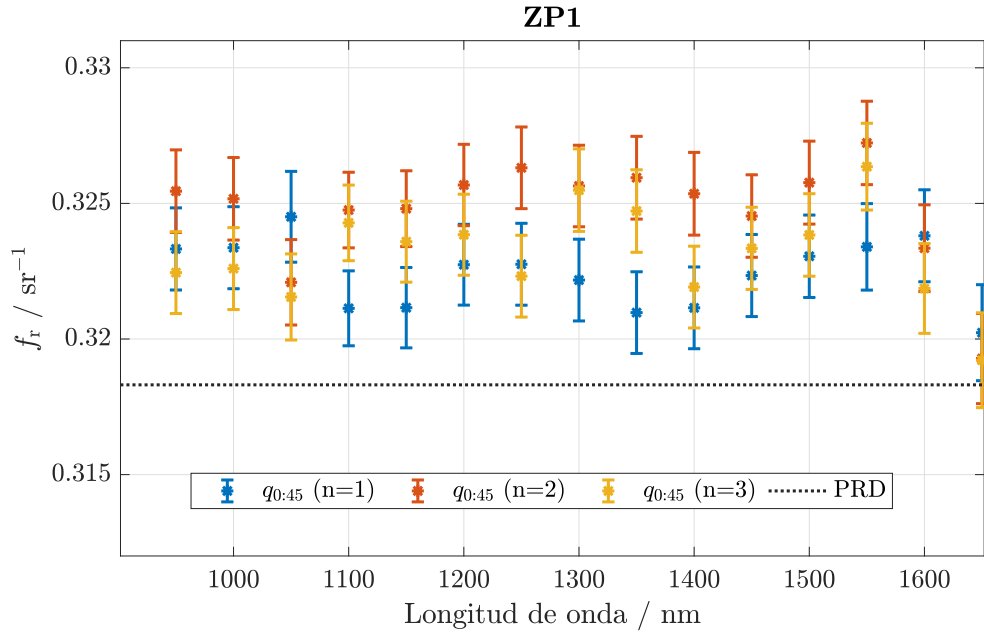


Figura 3.22: Coeficiente de radiancia a $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre expandida correspondiente (mostrada en las barras de error), para el patrón ZP1.

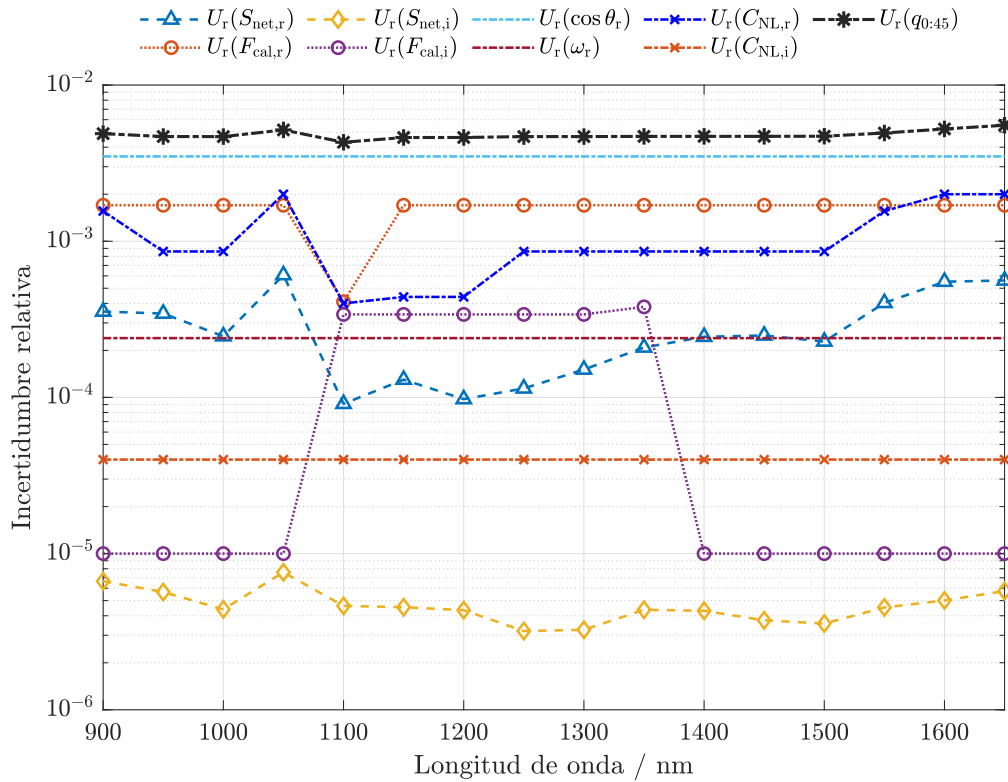


Figura 3.23: Incertidumbre relativa expandida del RC para las medidas de RC de la muestra ZP1, así como las incertidumbres relativas expandidas de cada variable involucrada en la ecuación del RC para el primer ciclo de medida.

Los resultados son mostrados omitiendo los valores de 1700 nm, debido al elevado ruido registrado para la señal a esa longitud de onda. La incertidumbre para la señal del monitor no se incluye en las representaciones para las contribuciones a la incertidumbre, ya que es proporcional a la de la señal incidente.

Para los resultados del RC, se observa que casi la totalidad de los valores calculados están por encima del valor del PRD para todas las muestras. Esto tiene relación con el fenómeno de «super reflexión» [13], que está relacionado con las diferencias en la distribución angular de la radiación reflejada por los patrones. Para que suceda este fenómeno es necesario que las muestras tengan un valor alto de factor de reflectancia, aspecto que sucede en esta tesis por seleccionar las muestras buscando las mejores propiedades de reflexión (apartado 3.3); y dependerá también de la geometría de medida, ya que la reflectancia varía con la dirección de reflexión, y aumenta para posiciones de medida más cercanas a la geometría de reflexión especular, que en este caso sería $0^\circ:0^\circ$. Por ello, el coeficiente de radiancia estará por encima de $1/\pi$ para algunas direcciones de reflexión, y para otras por debajo. Sin embargo, el valor integrado para todo el hemisferio nunca puede superar el del PRD.

La reducción del valor de incertidumbre observado para las longitudes de onda de 1100 nm y 1150 nm está relacionada con las incertidumbres correspondientes a los valores aplicados de corrección para el picoamperímetro. Como se observa en la Tabla 3.4, la diferencia entre las incertidumbres del valor mínimo de corrección aplicado y del inmediatamente superior se corresponde con las diferencias observadas en el valor de incertidumbre del RC calculado.

El aumento del valor de incertidumbre de las señales para la longitud de onda de 1050 nm en las figuras está relacionado con el funcionamiento del monocromador, el cual cambia las redes de difracción empleadas en función de la longitud de onda. Este cambio entre las redes de difracción se produce en 1100 nm. Al estar la rejilla de difracción correspondiente próxima a su límite de funcionamiento en 1050 nm, sus propiedades ópticas podrían verse reducidas, lo que explicaría el aumento de incertidumbre.

Con objeto de tener la posibilidad de reducir la incertidumbre de la medida en caracterizaciones del coeficiente de radiancia futuras, sería necesario disminuir la contribución limitante para la medida, que en este caso es la correspondiente al ángulo polar de colección. Seleccionar un valor inferior del ángulo para el procedimiento de medida reduciría dicha incertidumbre, ya que la incertidumbre depende de la función seno, la cual aumenta entre 0° y 90° . Si se consiguiese reducir esta contribución lo suficiente, la incertidumbre limitante pasaría a ser la asociada al factor de corrección del picoamperímetro, y correspondiente a los niveles de señal más bajos. Esto es debido a que el sistema no puede seguir adaptando el nivel de amplificación para niveles de señal por debajo de 2 nA. Una forma inmediata de reducir esta incertidumbre sería incrementar el nivel de señal reflejada, o en caso de imposibilidad intercambiar el sistema de amplificación de la señal por otro con

mayor intervalo de amplificación. En caso de poder reducirla, la incertidumbre limitante de la medida pasaría a ser la de la señal reflejada, la cual puede ser reducida aproximando el detector a la muestra, al aumentar el nivel de señal registrado por la reducción de la distancia; pero de esta manera incrementaría el valor de la contribución a la incertidumbre correspondiente al ángulo sólido de reflexión, debido a su dependencia con dicha distancia. Para que la reducción de la incertidumbre sea posible, habría que comprobar qué valor de distancia muestra-sensor fuese el óptimo para reducir la incertidumbre de la señal sin perjudicar significativamente la del ángulo de reflexión. Además, para que la reducción de la incertidumbre asociada a la señal reflejada sea efectiva, en primer lugar, sería necesario emplear un método para estimar la distancia muestra-sensor con menor incertidumbre; y por otra, diseñar un nuevo sistema de montaje y alineamiento para el fotodiodo, ya que al posicionarse éste a una distancia próxima a la muestra, se elimina la posibilidad del alineamiento empleando el anillo de la instalación como soporte del elemento de detección empleado.

3.6.1. RC ponderado e incertidumbre asociada

Para determinar el valor del RC de cada muestra a cada longitud de onda, se ha realizado una media ponderada de las tres medidas por cada muestra. La ponderación se hace de forma inversa a la incertidumbre de cada determinación usando:

$$\bar{x}_p = \frac{\sum x_{n,p} w_{n,p}}{\sum w_{n,p}}, \quad (3.22)$$

en la que x representa $q_{0:45}$ y w el peso de la ponderación, que es igual a la inversa del cuadrado de la incertidumbre de $q_{0:45}$. Los índices n y p representan el número de medición y la muestra, respectivamente. El cálculo de la incertidumbre de \bar{x} se realiza por propagación de errores según la guía GUM, cuya expresión simplificada resultante es:

$$u(\bar{x}_p) = \sqrt{\frac{\sum u^2(x_{n,p}) w_{n,p}^2}{(\sum w_{n,p})^2}}. \quad (3.23)$$

Para el cálculo de la incertidumbre combinada del RC ponderado, $u(\bar{q}_{0:45})$, se tiene en cuenta no sólo $u(\bar{x})$, sino que en la expresión se incluyen de nuevo las contribuciones tipo B presentes en la ecuación 3.19, para evitar que su valor se vea reducido al ser tratado de forma exclusivamente estadística. Por ello, $u(\bar{q}_{0:45})$ será igual a la raíz cuadrada de la suma cuadrática de $u(\bar{x})$ y cada contribución tipo B, como su incertidumbre relativa por \bar{x} . En la Tabla 3.7 se recogen los resultados para la media ponderada del RC $0^\circ:45^\circ$ ($\bar{q}_{0:45}$), así como la incertidumbre expandida $k = 2$ de esta. Los resultados para $\bar{q}_{0:45}$ de las tres muestras se representan también en la Figura 3.24 junto con el valor del PRD.

3.6 Resultados del RC

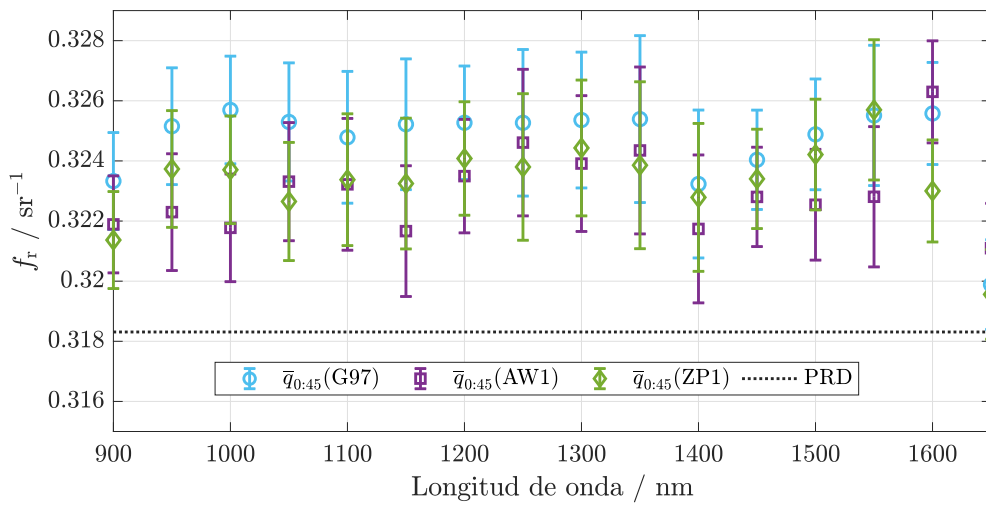


Figura 3.24: RC ponderado e incertidumbre expandida asociada $k = 2$ para cada muestra.

Para $\bar{q}_{0:45}$, se observa que casi la totalidad de los valores calculados están por encima del valor del PRD para todas las muestras, como ha sido comentado en el apartado anterior y por el mismo motivo.

En la Figura 3.25 se muestra la incertidumbre relativa expandida de $\bar{q}_{0:45}$ de los tres patrones de reflectancia.

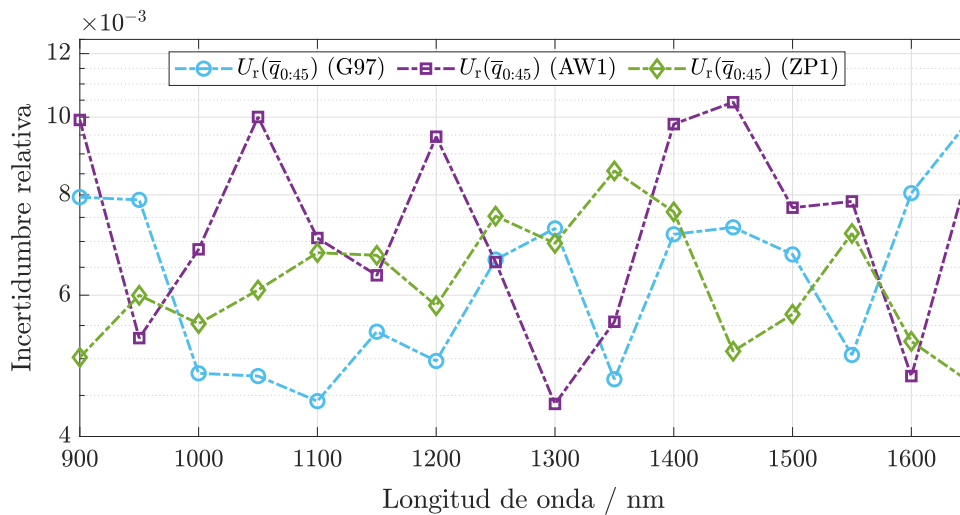


Figura 3.25: Incertidumbre realtiva expandida $k = 2$ del RC ponderado para cada muestra.

El comportamiento en reflexión de los patrones es similar, siendo G97 el que presenta un mayor valor de RC. El valor de incertidumbre relativa expandida para el RC observado se sitúa siempre por debajo del 1.1%. La muestra con menor incertidumbre es G97. Por tanto, la muestra que se emplea en el capítulo siguiente como referencia para la caracterización de la escala de BRDF es G97.

Tabla 3.7: RC ponderado e incertidumbre expandida asociada $k = 2$, para las tres muestras evaluadas.

λ / nm	G97		AW1		ZP1	
	$\bar{q}_{0:45}$ / sr ⁻¹	$U(\bar{q}_{0:45})$ / sr ⁻¹	$\bar{q}_{0:45}$ / sr ⁻¹	$U(\bar{q}_{0:45})$ / sr ⁻¹	$\bar{q}_{0:45}$ / sr ⁻¹	$U(\bar{q}_{0:45})$ / sr ⁻¹
900	0.3233	2.6×10^{-3}	0.3219	3.2×10^{-3}	0.3214	1.6×10^{-3}
950	0.3252	2.6×10^{-3}	0.3223	1.7×10^{-3}	0.3237	1.9×10^{-3}
1000	0.3257	1.6×10^{-3}	0.3218	2.2×10^{-3}	0.3237	1.8×10^{-3}
1050	0.3253	1.5×10^{-3}	0.3233	3.2×10^{-3}	0.3227	2.0×10^{-3}
1100	0.3248	1.4×10^{-3}	0.3232	2.3×10^{-3}	0.3234	2.2×10^{-3}
1150	0.3252	1.8×10^{-3}	0.3217	2.0×10^{-3}	0.3232	2.2×10^{-3}
1200	0.3253	1.6×10^{-3}	0.3235	3.1×10^{-3}	0.3241	1.9×10^{-3}
1250	0.3253	2.2×10^{-3}	0.3246	2.1×10^{-3}	0.3238	2.4×10^{-3}
1300	0.3254	2.4×10^{-3}	0.3239	1.4×10^{-3}	0.3244	2.3×10^{-3}
1350	0.3254	1.5×10^{-3}	0.3243	1.8×10^{-3}	0.3239	2.8×10^{-3}
1400	0.3232	2.3×10^{-3}	0.3217	3.2×10^{-3}	0.3228	2.5×10^{-3}
1450	0.3240	2.4×10^{-3}	0.3228	3.4×10^{-3}	0.3234	1.7×10^{-3}
1500	0.3249	2.2×10^{-3}	0.3225	2.5×10^{-3}	0.3242	1.8×10^{-3}
1550	0.3255	1.6×10^{-3}	0.3228	2.5×10^{-3}	0.3257	2.3×10^{-3}
1600	0.3256	2.6×10^{-3}	0.3263	1.6×10^{-3}	0.3230	1.7×10^{-3}
1650	0.3199	3.2×10^{-3}	0.3211	2.8×10^{-3}	0.3196	1.5×10^{-3}

3.6.2. Validación de los resultados del RC

Para confirmar la consistencia de los resultados obtenidos para la medida del RC de este capítulo se realizó de manera complementaria una medida del RC a $0^\circ:45^\circ$ empleando un espectrofotómetro PerkinElmer modelo Lambda 9 con un accesorio para medir la reflectancia, proporcionado por la empresa Labsphere; pero en este caso el procedimiento

3.6 Resultados del RC

de medida es el de la BRDF relativa, que es descrito a lo largo de esta tesis. Este espectrofotómetro cubre espectralmente las medidas de RC realizadas en este capítulo. Se midió el RC a $0^\circ:45^\circ$ de las muestras de manera relativa empleando los resultados de calibración proporcionados por el PTB del factor de reflectancia $0^\circ:45^\circ$ para el patrón AH14, de forma análoga al procedimiento de medida de la BRDF descrito en esta tesis. Los datos para el factor de reflectancia se convirtieron a la escala de BRDF mediante su relación por el factor de π [1]. Este procedimiento consiste en obtener el RC $0^\circ:45^\circ$ de las muestras deseadas a través de la medida del RC de manera relativa, a la que se le aplica un factor de ajuste correspondiente a la medida absoluta del RC $0^\circ:45^\circ$ de uno de los patrones. En este caso, se realizó la medida relativa del RC $0^\circ:45^\circ$ para las muestras G97, AW1 y ZP1, y se empleó la medida absoluta del RC del PTB para el patrón AH14 como factor de ajuste. Los resultados de la medida y su incertidumbre expandida $k = 2$, junto con los obtenidos para el RC $0^\circ:45^\circ$ ponderado en el apartado previo, son mostrados en las Figuras 3.26, 3.27 y 3.28 para las muestras G97, AW1 y ZP1, respectivamente.

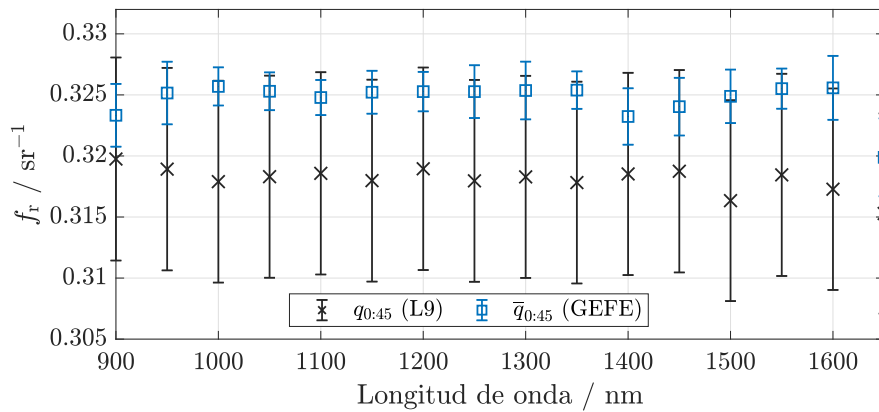


Figura 3.26: RC $0^\circ:45^\circ$ obtenido para Lambda 9 y GEFE, y para el patrón G97. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.

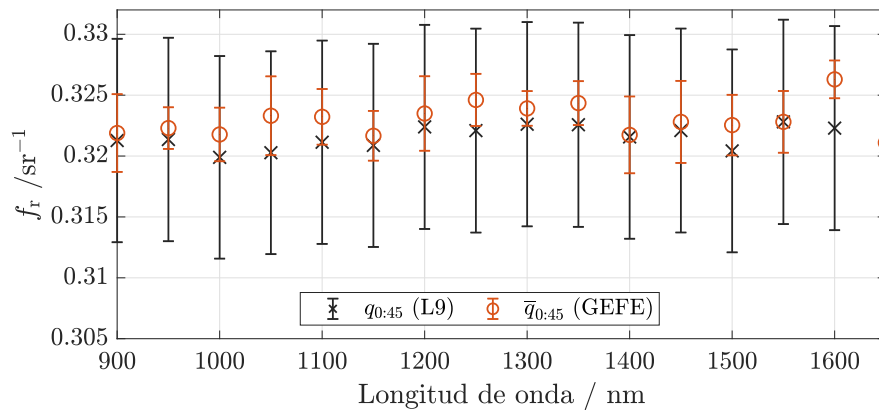


Figura 3.27: RC $0^\circ:45^\circ$ obtenido para Lambda 9 y GEFE, y para el patrón AW1. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.

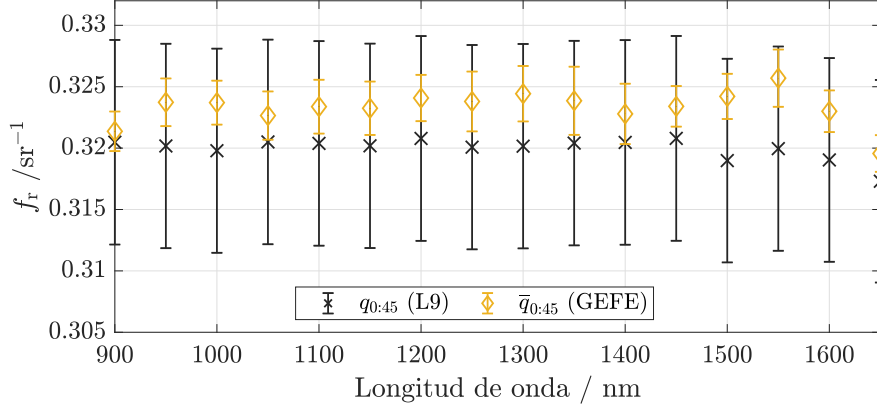


Figura 3.28: RC 0°:45° obtenido para Lambda 9 y GEFE, y para el patrón ZP1. En las barras de error se representa la incertidumbre expandida $k = 2$ para cada medida.

La concordancia entre las mediciones se evaluó a través del cálculo de la diferencia normalizada entre las medidas con cada dispositivo y para todos los patrones. Este parámetro se calcula según:

$$D_n = \frac{|\bar{q}_{0:45}(\text{GEFE}) - q_{0:45}(\text{L9})|}{\sqrt{U^2(\bar{q}_{0:45}(\text{GEFE})) + U^2(q_{0:45}(\text{L9}))}}, \quad (3.24)$$

donde $\bar{q}_{0:45}(\text{GEFE})$ es el RC 0°:45° ponderado medido en el gonioprotómetro y $q_{0:45}(\text{L9})$ el RC 0°:45° medido en el espectrofotómetro Lambda 9. Los resultados del cálculo para los tres patrones se pueden observar en la Figura 3.29.

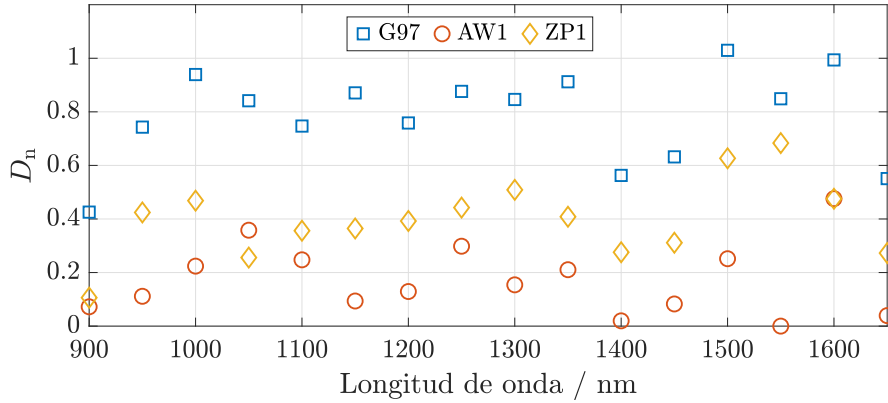


Figura 3.29: Diferencia normalizada calculada entre las medidas del RC para GEFE y Lambda 9, y para los patrones G97, AW1 y ZP1.

Para que las medidas sean compatibles, la diferencia entre estas ha de ser inferior a la raíz de la suma cuadrática de sus incertidumbres, es decir, inferior a 1. Todos los valores calculados están por debajo de 1, salvo uno de los datos para G97 que es un 3% superior con respecto a 1, lo que no implica una variación significativa. Debido a esto se puede afirmar que todas las medidas del RC 0°:45° incluidas en este apartado son compatibles, por lo que se validan las medidas del RC 0°:45° realizadas en este capítulo.

Capítulo 4

Realización de la escala de BRDF

Contenido

4.1. Ecuación de medida	58
4.2. Caracterización del sistema	61
4.2.1. Espectrorradiómetro NIR	61
4.2.1.1. Caracterización espacial	62
4.2.1.2. Calibración en longitud de onda	63
4.2.1.3. Aplicación del algoritmo de alto rango dinámico	66
4.2.1.4. Calibración de la linealidad	69
4.2.1.5. Caracterización de la repetitividad	76
4.2.1.6. Caracterización del error residual de descentramiento	78
4.2.2. Uniformidad del área irradiada	79
4.2.3. Uniformidad de los patrones de reflectancia	81
4.3. Procedimiento experimental	85
4.4. Resultados de la BRDF relativa	88

En este capítulo se efectúa el cálculo de la BRDF, relativa a la geometría $0^\circ:45^\circ$ del conjunto completo de patrones de reflectancia, empleando como instrumento de detección el espectrorradiómetro de infrarrojo ya introducido en el capítulo 2. La motivación de emplear un método de medida de la BRDF relativo es simplificar la realización de esta

medida, en comparación con métodos de medida absolutos, proceso de por sí largo y complejo. De esta manera es posible caracterizar un mayor número de muestras en el mismo tiempo, además de que el proceso es menos susceptible a introducir errores, precisamente porque se garantiza una mayor estabilidad de la irradiancia en un menor tiempo de medida. El procedimiento se fundamenta en que la distancia entre detector y muestra no cambia entre las distintas geometrías, y por tanto tampoco se modifica el ángulo sólido de detección para cada geometría. De este modo, se obtendrá la BRDF espectral relativa, donde cada geometría se hace relativa al valor en $0^\circ:45^\circ$ del patrón escogido en el capítulo previo. El valor absoluto a $0^\circ:45^\circ$ de este patrón, obtenido en el capítulo anterior, se multiplicará a la BRDF relativa de cada muestra para dar trazabilidad a la medida (BRDF absoluta).

A continuación se expresa la ecuación de medida usada para el cálculo de la BRDF relativa, en la que intervienen parámetros adicionales relacionados con distintos elementos de la instalación. Por ello, seguidamente se aborda la caracterización radiométrica de estos elementos. Una de las incertidumbres que intervienen en la medida de la BRDF relativa, relacionada con el instrumento de detección, se obtiene en este capítulo. Por último, se detallan el montaje experimental y el procedimiento de medida empleados.

Los resultados de la BRDF y su comparación con los valores de referencia de la misma función medidos en el PTB se abordan en el capítulo siguiente.

4.1. Ecuación de medida

Para obtener la ecuación de medida de la BRDF relativa, se parte de la expresión de la BRDF descrita en el capítulo 1 (ecuación 1.1), y se relacionan las variables presentes en esta fórmula con la magnitud que representa la señal registrada por el sistema de detección [43]. Teniendo en cuenta que la señal que registra el espectroradiómetro está relacionada, por una parte, con la irradiancia incidente sobre la muestra, que se determinará a partir de la radiancia de la mancha sobre la misma, situación denominada de incidencia, (L_i), y por otra con la radiancia de la muestra irradiada, situación denominada reflejada (L_r), la expresión de la BRDF quedaría:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{E_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)} = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{L_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)\omega_i \cos \theta_i}. \quad (4.1)$$

Como se ha dicho anteriormente, la realización de la escala de BRDF se lleva a cabo a partir de la medida de reflectancia bidireccional espectral en la geometría $0^\circ:45^\circ$ y la medida, relativa a la misma, de la distribución espectral de la BRDF; es decir, para las demás configuraciones geométricas. Según la ecuación anterior, el RC $0^\circ:45^\circ$ vendría dado por la expresión:

$$q_{0:45}(\lambda) = \frac{L_r(0^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 0^\circ; \lambda)}{L_i(0^\circ, 0^\circ; \lambda)\omega_i}. \quad (4.2)$$

De la ecuación anterior se obtiene la que denominamos radiancia incidente, L_i :

$$L_i(0^\circ, 0^\circ; \lambda)\omega_i = \frac{L_r(0^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 0^\circ; \lambda)}{q_{0:45}(\lambda)}. \quad (4.3)$$

Sustituyendo la ecuación 4.3 en 4.1, se obtiene la expresión para la función de distribución de reflectancia bidireccional. Debido a que los parámetros de incidencia son comunes para todas las muestras, la expresión para el cálculo de la BRDF se expresa para la radiancia reflejada del patrón empleado como referencia y su correspondiente RC $0^\circ:45^\circ$, y se expresa como:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)q_{0:45,\text{ref}}}{L_{r,\text{ref}}(0^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 0^\circ; \lambda) \cos \theta_i}, \quad (4.4)$$

donde $L_{r,\text{ref}}$ es la radiancia reflejada del patrón empleado como referencia y $q_{0:45,\text{ref}}$ su correspondiente RC $0^\circ:45^\circ$. Por último, la expresión para la BRDF relativa ($f_{r,\text{rel}}$) se obtiene dividiendo la ecuación anterior entre $q_{0:45,\text{ref}}$, como sigue:

$$f_{r,\text{rel}}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{L_{r,\text{ref}}(0^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 0^\circ; \lambda) \cos \theta_i}. \quad (4.5)$$

El elemento sensible del espectrorradiómetro es un detector matricial de InGaAs que responde a la exposición radiante sobre el mismo. Debido a que el dispositivo lleva acoplado un sistema óptico, la respuesta del equipo es proporcional a la radiancia que emerge del plano de la muestra, ya que el espectrorradiómetro se encuentra enfocado en él. Para conocer la radiancia (L_0) que emerge del plano de la muestra y establecer su relación con la respuesta del equipo, se parte de su relación con la irradiancia que incide sobre el sensor (E_i) [44](Figura 4.1), como:

$$E_i(\lambda) = \pi L_0 \frac{dA_0}{dA_1} \sin^2 \varepsilon_0, \quad (4.6)$$

donde A_0 y A_1 son el área sobre el plano de la muestra y el área sobre el sensor del dispositivo, respectivamente. ε_0 es el semiángulo que abarca desde la superficie A_0 hasta la lente.

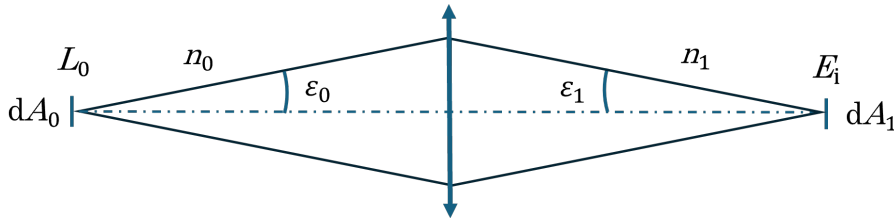


Figura 4.1: Irradiancia de la imagen sobre el sensor de un dispositivo de detección con sistema óptico acoplado.

El cambio en el área de cada superficie está relacionado con el índice de refracción y

4.1 Ecuación de medida

el ángulo mitad desde cada superficie a la lente según:

$$\frac{dA_0}{dA_1} = \frac{n_1^2 \operatorname{sen}^2 \varepsilon_1}{n_0^2 \operatorname{sen}^2 \varepsilon_0}. \quad (4.7)$$

Si suponemos que el índice de refracción es igual a 1 para los medios sensor-lente y lente-plano de la muestra y sustituimos en la Ecuación 4.6, la radiancia en el plano de la muestra sería:

$$L_0 = \frac{E_i}{\pi \operatorname{sen}^2 \varepsilon_1}. \quad (4.8)$$

La respuesta del sensor viene determinada por el número de cuentas generado (N) en el tiempo de integración fijado (t_{int}) para cada exposición. La relación entre estas dos variables y el nivel de excitación sobre el sensor viene determinada por:

$$N(\lambda) = \mathfrak{R}(\lambda)\Phi(\lambda)t_{\text{int}}, \quad (4.9)$$

donde \mathfrak{R} es la responsividad del dispositivo de detección. Si relacionamos el flujo radiante con la irradiancia sobre el sensor, y por consiguiente, con la radiancia emergente del plano de la muestra:

$$N(\lambda) = \mathfrak{R}(\lambda)A_p E_i(\lambda)t_{\text{int}} = \mathfrak{R}(\lambda)A_p \pi L_0(\lambda) \operatorname{sen}^2 \varepsilon_1 t_{\text{int}}, \quad (4.10)$$

donde A_p es el área del píxel; y se agrupan los términos puramente geométricos bajo la variable G :

$$N(\lambda) = \mathfrak{R}(\lambda)L_0(\lambda)t_{\text{int}}G, \quad (4.11)$$

se obtiene la expresión que relaciona la radiancia de un objeto con los parámetros del instrumento, incluyendo su responsividad:

$$L_0(\lambda) = \frac{N(\lambda)}{t_{\text{int}}\mathfrak{R}(\lambda)G}. \quad (4.12)$$

Entonces, si sustituimos la expresión anterior en la ecuación 4.5, obtenemos la expresión que permite calcular la función de distribución de reflectancia bidireccional relativa para cualquier muestra como:

$$f_{r,\text{rel}} = \frac{N_r(\lambda)/t_{\text{int},r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{\text{int},0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \frac{\mathfrak{R}_{0:45}(\lambda)}{\mathfrak{R}_r(\lambda)} = \frac{N_r(\lambda)/t_{\text{int},r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{\text{int},0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \times C_{\text{NL}}, \quad (4.13)$$

en la que C_{NL} es el coeficiente de corrección de la no linealidad del espectrorradiómetro. Teniendo en cuenta la variación de la emisión de la fuente para la radiancia reflejada entre cada una de las geometrías y la geometría a 45° , que es controlado, como fue descrito en

el capítulo anterior, con un detector-monitor, la expresión anterior quedaría entonces:

$$f_{r,rel} = \frac{N_r(\lambda)/t_{int,r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{int,0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \times C_{NL} \times \frac{S_{mon,0:45}(\lambda)}{S_{mon,r}(\lambda)}, \quad (4.14)$$

siendo S_{mon} la señal del fotodiodo detector monitor. Los subíndices 0:45 y r denotan la situación para la radiancia a la geometría 0°:45° y a la geometría seleccionada, respectivamente. Si se sustituyen estas señales por el correspondiente coeficiente de corrección:

$$f_{r,rel} = \frac{N_r(\lambda)/t_{int,r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{int,0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \times C_{NL} \times C_{\Phi}, \quad (4.15)$$

siendo C_{Φ} el coeficiente de corrección para la variación de la señal de la fuente de irradiación. Dado que todos los píxeles no tienen la misma responsividad exactamente y que la irradiación de la muestra y la propia muestra no son totalmente uniformes, se introduce un tercer coeficiente de corrección en la ecuación anterior:

$$f_{r,rel} = \frac{N_r(\lambda)/t_{int,r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{int,0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \times C_{NL} \times C_{\Phi} \times C_U, \quad (4.16)$$

donde C_U es el coeficiente de corrección para las no-uniformidades registradas por el espectrorradiómetro.

4.2. Caracterización del sistema

4.2.1. Espectrorradiómetro NIR

Para efectuar la caracterización de la reflectancia bidireccional relativa de las muestras se emplea el espectrorradiómetro de infrarrojo incluido en la instalación, como se describe en el capítulo 2. La matriz del elemento detector cuenta con 640 píxeles \times 520 píxeles. La primera dimensión se utiliza para el análisis longitudinal de la muestra. Este detector forma parte de un sistema hiperespectral, del que se ha quitado la etapa de desplazamiento espacial. La segunda dimensión se dedica al análisis espectral de la radiación incidente. Para las medidas de BRDF el dispositivo se ha programado para obtener un valor único de señal que se obtiene promediando los valores de señal de una región central que abarca un total de 35 píxeles espaciales. Para seleccionar la extensión de esta región se tiene en cuenta que el número de valores sea suficiente para dar un valor promedio con una desviación típica estable, así como no escoger demasiados valores para que la uniformidad de la radiación sobre el plano de la muestra pueda tener la mínima incidencia sobre el promedio.

Adicionalmente es necesario conocer, por una parte, qué distancia cubre longitudinalmente, y por otra cuál es el intervalo de longitudes de onda detectadas por el instrumento. El empleo de este instrumento en la medida de la BRDF aconseja, por una parte, la utili-

zación de un método de alto rango dinámico, ya que la respuesta espectral en este intervalo de longitudes de onda presenta variaciones importantes; y por otra, la caracterización de la repetitividad, que permite realizar una sola medición por geometría.

4.2.1.1. Caracterización espacial

Para analizar las medidas realizadas con el instrumento es necesario conocer la longitud de la muestra que observa cada píxel. Para conocer esta longitud, se suelen aplicar métodos en los que se registran objetos con elementos de estructura periódica cuya extensión puede obtenerse externamente mediante calibración. De esta manera, se puede obtener una relación directa entre la longitud de una estructura de dicho objeto y la cantidad de píxeles que abarca, pudiendo extraer la extensión que comprende cada píxel del instrumento sobre el plano del objeto. En este caso, se colocó en el plano de medida del GEFE un papel con un patrón de franjas impreso, formado por franjas negras equiespaciadas. El patrón fue colocado orientando el eje que forman las líneas perpendicularmente a la dirección de registro del instrumento, para poder visualizarlas. Se registró una sola adquisición, ajustando el tiempo de integración para controlar el ruido y así discernir de forma óptima el contorno de las franjas. Se empleó un sistema Köhler para la iluminación del patrón, por lo que la región iluminada presenta una alta uniformidad espacial.

La imagen del patrón de franjas mostrada por el instrumento puede observarse en la Figura 4.2.

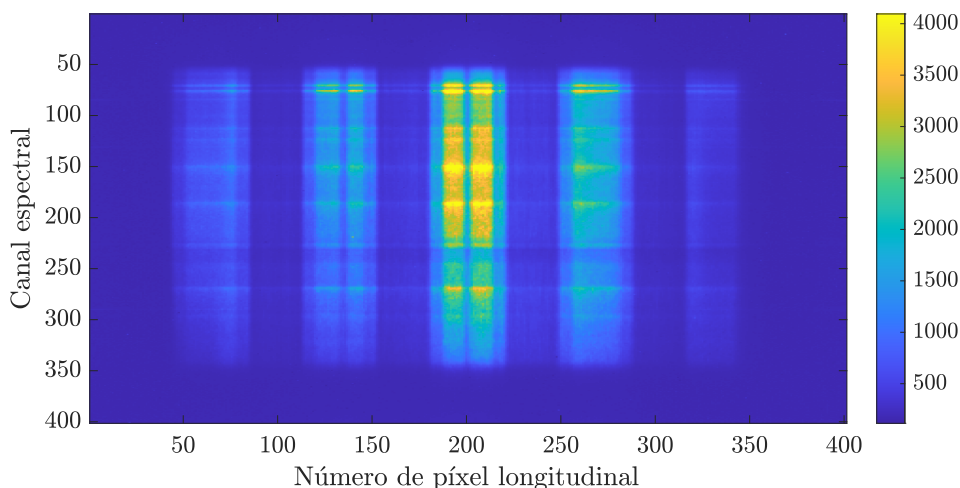


Figura 4.2: Imagen del patrón de franjas registrada por el espectrorradiómetro. La barra de color representa el nivel de señal en cuentas (saturación a 4095 cuentas, 12 bits).

Las líneas que se observan dentro de cada franja en el eje de abscisas pueden ser debidas a patrones del papel en el que se imprimieron las franjas que no fueron apreciados a simple vista. La diferencia de señal de los píxeles centrales a los laterales para la dimensión longitudinal puede ser debida a la falta de uniformidad del patrón o la heterogeneidad de

responsividad de los píxeles espaciales. Ésto se ha de tener en cuenta para la realización de la medida de la BRDF, seleccionando una región con una responsividad uniforme, pero no influye en esta medición, puesto que aquí lo que se mide se basa en el contraste; es decir número de píxeles con señal y de píxeles sin señal. Sobre la imagen se contó el número de píxeles correspondientes a la dimensión longitudinal existentes entre el contorno exterior de una de las franjas y el mismo de la siguiente, un total de 68. A continuación se midió la misma distancia sobre el propio patrón, en este caso empleando un calibre, para obtener la relación entre las medidas. El calibre empleado es de la empresa Mitutoyo modelo CD-15S (500-110), con una resolución de 10 μm . La distancia medida sobre el patrón fue de 7.110 mm. Se asume una resolución de dos píxeles en cada dirección debido a la dificultad de visualización de la posición exacta del borde de la franja. Las ecuaciones empleadas para calcular la longitud del píxel y la correspondiente al valor de su incertidumbre son:

$$l_{\text{px}} = \frac{l_{\text{m}}}{n_{\text{m}}}, \quad (4.17)$$

$$u(l_{\text{px}}) = \sqrt{\left[\frac{1}{n_{\text{m}}}\right]^2 \times u_{\text{res}}^2(l_{\text{m}}) + \left[\frac{l_{\text{m}}}{n_{\text{m}}^2}\right]^2 \times u_{\text{res}}^2(n_{\text{m}})}, \quad (4.18)$$

donde l_{px} es la longitud observada por el píxel, l_{m} la longitud medida de la estructura periódica y n_{m} el número de píxeles que abarca la misma estructura sobre la imagen. La incertidumbre de calibración del calibre está determinada por su resolución y, por ello, se toma sólo la incertidumbre de resolución.

El tamaño estimado observado por el píxel fue de 104.60 μm , con una incertidumbre típica de 0.89 μm . La longitud total que puede registrar el instrumento será entonces aproximadamente 67 mm.

4.2.1.2. Calibración en longitud de onda

La respuesta espectral del espectrorradiómetro de infrarrojo está dividida en 512 canales según los datos del fabricante, comprendidos entre las longitudes de onda de 900 nm y 1700 nm. Para la utilización correcta del espectrorradiómetro es necesario relacionar la respuesta de cada canal espectral (píxel) con el valor real de longitud de onda correspondiente; es decir, realizar una calibración espectral.

El método escogido fue el mismo empleado para la caracterización espectral del monocromador de la instalación, que consiste en irradiar el espectrorradiómetro con lámparas espectrales de lápiz y comparar el canal donde se obtiene respuesta con la longitud de onda correspondiente de referencia. En este caso, se escogieron lámparas de Ne, Kr, Xe y Ar. Atendiendo al procedimiento de medida, cada lámpara fue situada en la posición más próxima con respecto al objetivo del espectrorradiómetro, orientando perpendicularmente el eje del bulbo de cada lámpara con respecto al plano de incidencia, de forma que la lámpara está en la dimensión longitudinal que analiza el instrumento, y configurando el

4.2 Caracterización del sistema

enfoque de éste en infinito. Para cada lámpara, fueron registradas varias adquisiciones a distintos tiempos de integración, con objeto de ser combinadas y discernir las líneas de emisión con un nivel de señal bajo. Las adquisiciones compuestas registradas para cada lámpara se muestran en la Figura 4.3, donde se representa el número de cuentas digitales por microsegundo en función del canal espectral, ya que se ha usado un algoritmo de alto rango dinámico que se explicará más adelante.

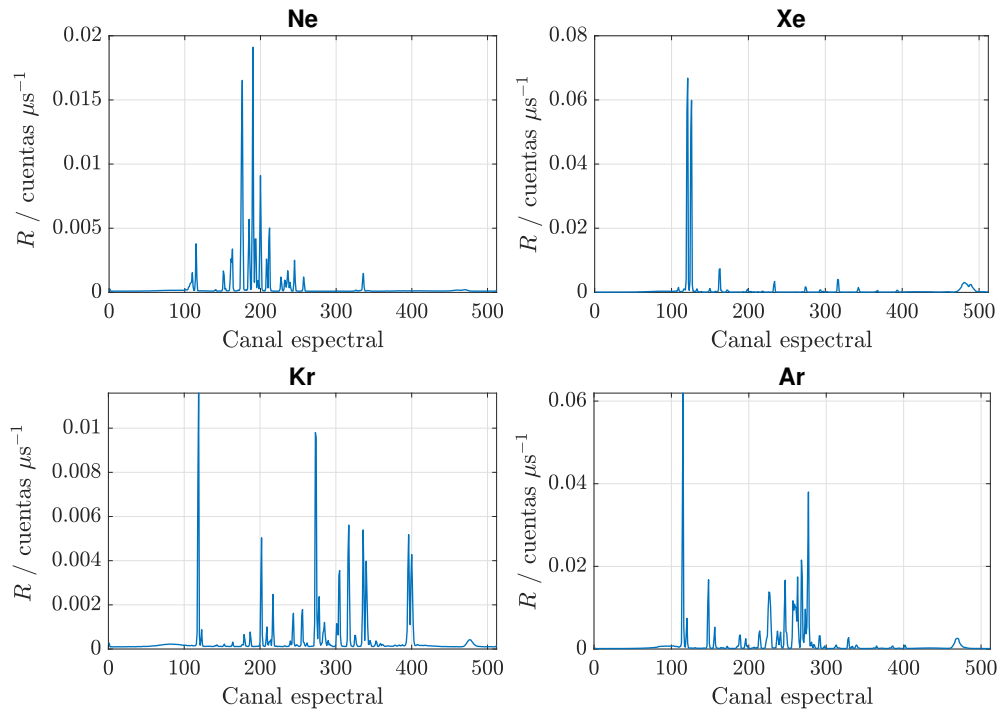


Figura 4.3: Distribuciones de respuesta espectral correspondientes a cada lámpara espectral evaluada.

Para representar y analizar estos datos se selecciona la misma línea de píxeles espaciales para todas las lámparas evaluadas, pues el cambio de respuesta de unas posiciones a otras no influye en la longitud de onda.

Se seleccionaron un total de 17 líneas de emisión buscando cubrir la totalidad del intervalo espectral de registro del dispositivo, evitando las líneas espectrales muy próximas entre sí o con señal muy baja. Se usaron como longitudes de onda de referencia entre los valores de las líneas de emisión de cada lámpara proporcionados por el fabricante los correspondientes a los de máxima respuesta del espectrorradiómetro. Estos datos son mostrados en la Tabla 4.1.

Esta misma información se representa en la Figura 4.4, donde se puede observar que existe una relación monótona entre ambos valores. Se decidió efectuar un ajuste al conjunto completo de los datos. Se aplicó un ajuste polinómico de segundo grado, ya que la tendencia apreciada de los valores era lineal.

Tabla 4.1: Líneas de emisión escogidas y su canal espectral de máxima respuesta para las lámparas evaluadas.

Lámpara	$\lambda_{\text{ref}}/\text{nm}$	Canal	Lámpara	$\lambda_{\text{ref}}/\text{nm}$	Canal
Ar	965.80	115	Ne	1321.92	257
Kr	975.20	119	Kr	1345.02	268
Ar	1047.10	148	Kr	1363.40	273
Ne	1114.30	176	Kr	1442.70	305
Ne	1152.27	190	Kr	1523.90	336
Ne	1176.67	200	Kr	1533.40	340
Ne	1206.63	212	Kr	1689.68	396
Xe	1262.30	234	Kr	1693.58	400
Ne	1291.20	245	-	-	-

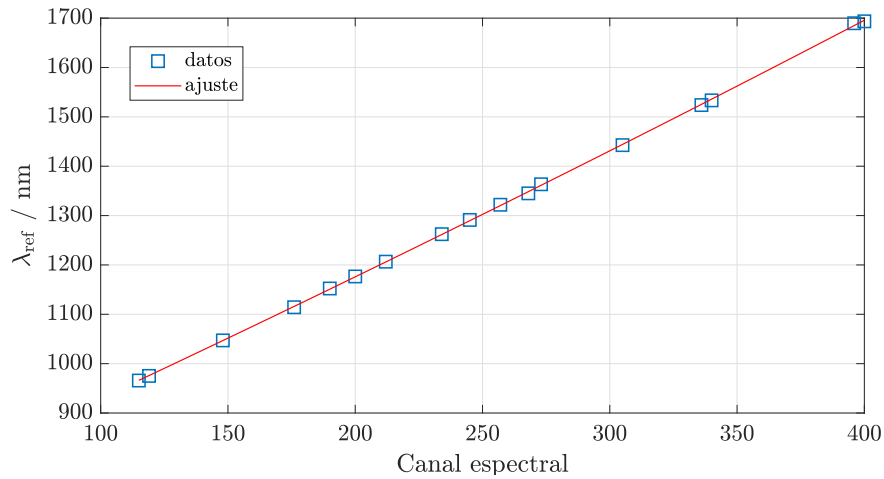


Figura 4.4: Ajuste obtenido para la relación entre las líneas de emisión de referencia y los canales de respuesta espectral del espectrorradiómetro correspondientes.

En la tabla 4.2 se incluyen los parámetros de ajuste y sus incertidumbres correspondientes. En esta tabla, $p1$ es el término independiente, $p2$ es el coeficiente de primer grado y $p3$ el del segundo grado. Entre los valores del ajuste se puede observar que el coeficiente de la pendiente, $p2$, que es el de mayor peso, se encuentra cercano a 1, por lo que la relación es casi lineal.

Tabla 4.2: Valores de cada parámetro de la ecuación de ajuste.

Parámetro	Valor	$U(k = 2)$
$p1$	4.63×10^{-4}	1.49×10^{-4}
$p2$	2.32	0.08
$p3$	693.1	9.6
RMSE	2.17	-

Como se puede observar en la Figura 4.4, los canales por debajo del 100 y por encima del 400 se corresponderían con respuesta a longitudes de onda fuera del intervalo espectral

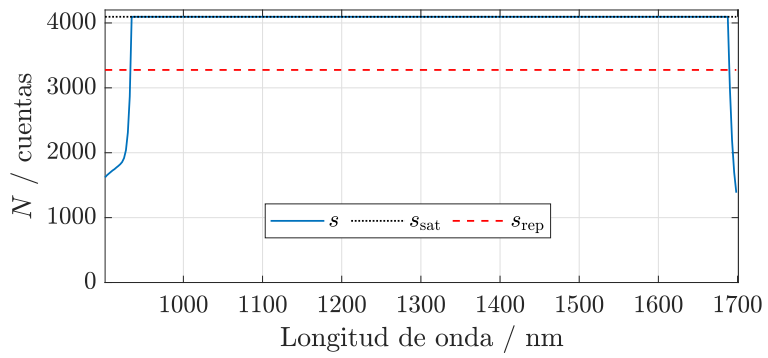
comprendido entre 900 nm y 1700 nm, que es el de respuesta propio de la matriz de detectores, pues son píxeles de InGaAs. Según este ajuste, la resolución espectral, definida como la diferencia en longitud de onda entre dos elementos consecutivos del canal, varía entre 2.4 nm/canal para el canal número 100 y 2.7 nm/canal para el número 400, por lo que la distribución espectral dada por el dispositivo se puede considerar homogénea.

El ancho de banda se determina como el FWHM de los picos para las distribuciones espectrales de la Figura 4.3. El ancho de banda varía a lo largo del intervalo espectral de respuesta por la misma razón que la resolución espectral. La FWHM calculada varía desde 3.5 nm hasta 4 nm, desde el valor más cercano a 900 nm hasta el más cercano a 1700 nm, respectivamente. Estos valores son muy próximos a la resolución espectral, lo cual es un buen índice de calidad en el diseño del espectrorradiómetro.

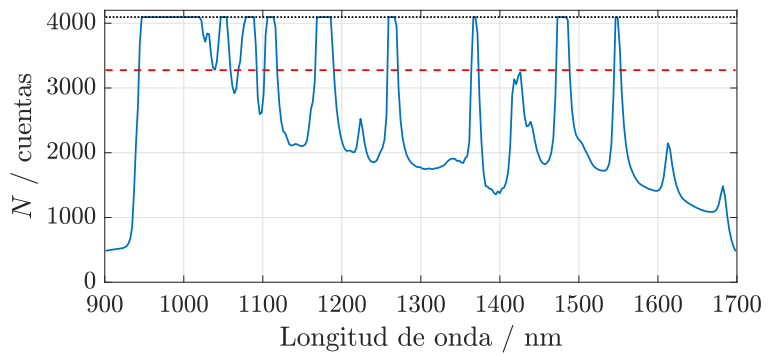
4.2.1.3. Aplicación del algoritmo de alto rango dinámico

Se diseñó un algoritmo de composición de adquisiciones de respuesta del instrumento que permite realizar de forma automatizada un número de adquisiciones a distintos tiempos de integración en función del número de cuentas registrado para cada valor espectral. El objetivo de la aplicación de este algoritmo es poder detectar con la mejor relación señal/ruido cualquier valor espectral para un nivel dado de exposición radiante, registrando la cantidad de adquisiciones necesaria.

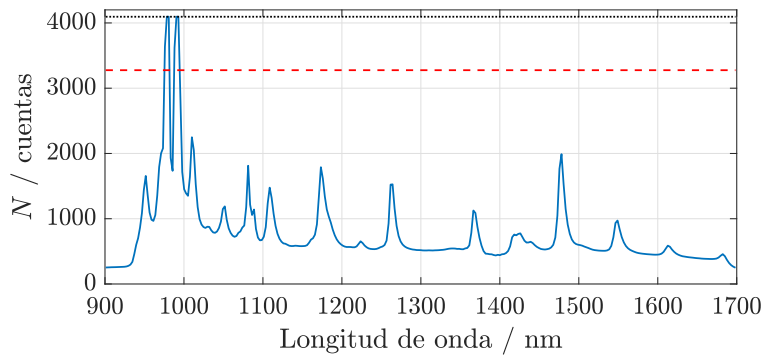
En el algoritmo aplicado, se fija manualmente un valor de tiempo de integración máximo, con el que se realiza una adquisición. Conocer la respuesta espectral del instrumento a la radiación incidente en cada medida efectuada es importante para poder ajustar adecuadamente el tiempo de integración máximo. A continuación se compara el valor máximo de número de cuentas para el espectro registrado con un valor de referencia correspondiente al 85 % del umbral de saturación, que se encuentra en aproximadamente 3500 cuentas. El límite de 85 % se toma porque la respuesta de los conversores analógico digitales suele ser lineal para valores inferiores o iguales a ese valor del fondo de escala. Si el valor registrado es superior al valor de referencia, se toma una segunda adquisición, pero en este caso el programa de control del instrumento fija de forma automática un tiempo de integración 4 veces inferior con respecto al inicial; en caso contrario la medida termina sin registrar adquisiciones adicionales. Se decidió seleccionar un factor 4 para la división de los valores de tiempo de integración para evitar un sobregistro de adquisiciones con un número suficiente de tiempos que recogiesen un valor de exposición alto de todos los canales espectrales. Se realizan tantas adquisiciones como veces el valor máximo de cuentas registrado para el tiempo de integración seleccionado continúa siendo superior al de referencia, obteniendo mayor número de adquisiciones registradas cuanto mayor sea la diferencia entre el número de cuentas digitales de unas longitudes de onda con respecto a otras. En la Figura 4.5 se representa un ejemplo del algoritmo descrito.



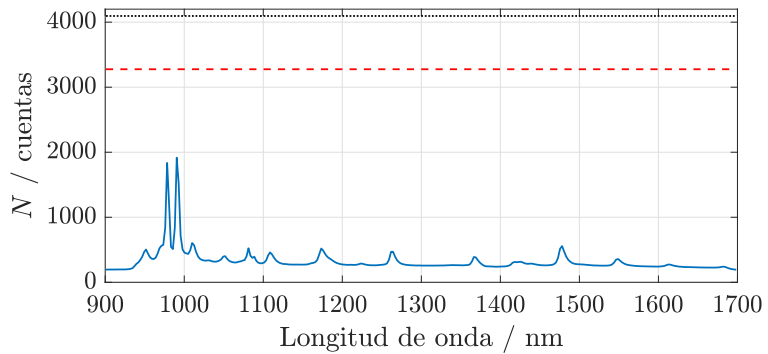
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5: Adquisiciones registradas en el procedimiento de alto rango dinámico empleado para tiempos de integración de 500 ms (a), 125 ms (b), 31 ms (c) y 8 ms (d).

4.2 Caracterización del sistema

Las medidas de oscuridad son realizadas bajo los mismos tiempos registrados durante la medida de la señal, para poder ser sustraídas de los respectivos valores de señal. Para ejemplificar el proceso, se utilizó una muestra blanca muy difusora, irradiada por la lámpara de xenón. Como se aprecia en la Figura 4.5 y debido a la distribución espectral de la lámpara en el intervalo evaluado, se registraron hasta cuatro adquisiciones durante el proceso. El ruido de fondo registrado por el dispositivo fue de unas 750 cuentas para el tiempo de integración máximo. Es importante fijar un tiempo de integración inicial suficiente que permita obtener un nivel de señal separado del ruido de fondo para las longitudes de onda con un bajo nivel de cuentas; pero teniendo en consideración que fijar un tiempo de integración excesivamente alto aporta exclusivamente valores de saturación, y la adquisición será por tanto descartada. Esto último es significativo, ya que incrementa innecesariamente el tiempo de la medida.

En la figura mencionada, la señal está indicada con línea continua (s), el valor de saturación se corresponde con la línea de puntos (s_{sat}), y el valor de repetición está marcado como una línea discontinua (s_{rep}). Como se puede comprobar en la Figura 4.5d, todos los valores espectrales se encuentran por debajo del valor de repetición, por lo que no son registradas adquisiciones adicionales. A la vista de las cuatro representaciones de dicha figura, se evidencia la utilidad del empleo de este método cuando se usan fuentes de iluminación con diferencias de emisión espectral importantes.

En la Figura 4.6 se representa en la misma gráfica, los valores de respuesta en cuentas digitales de las 4 adquisiciones HDR representadas en la Figura 4.5, en función de la longitud de onda. Además, usando un eje de ordenadas auxiliar mostrado a la derecha, se representa el tiempo de integración empleado para cada canal espectral para adquirir ese número de cuentas.

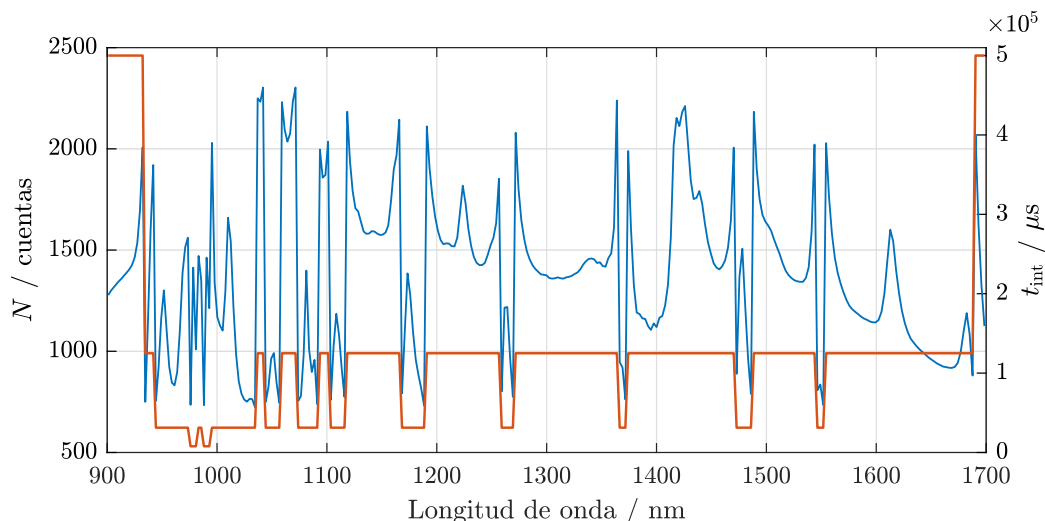


Figura 4.6: Espectro compuesto a partir de las adquisiciones HDR mostradas previamente en la Fig.4.5. Nótese que la señal de cada canal espectral se ha obtenido con el tiempo de integración más apropiado a su valor.

Como se puede observar, el tiempo de integración usado es bastante uniforme. Disminuye en las zonas donde la fuente tiene bandas de emisión y aumenta en los extremos, donde la respuesta del detector del espectrorradiómetro es menor.

En la Figura 4.7 se representa en función de la longitud de onda el cociente N/t_{int} que corresponde a la composición de las adquisiciones HDR.

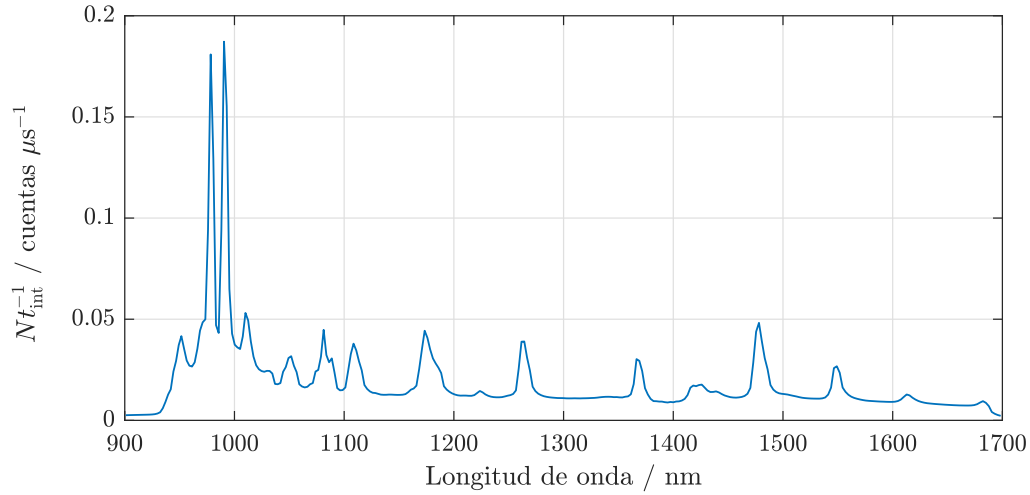


Figura 4.7: Respuesta compuesta a partir de las adquisiciones previas mostradas expresada como el cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración.

Este método será aplicado en la medida de la BRDF, así como en caracterizaciones posteriores utilizando tanto la lámpara LDLS como la de xenón presentes en la instalación, debido a las diferencias de emisión espectral presentes en el intervalo de longitudes de onda del infrarrojo cercano.

4.2.1.4. Calibración de la linealidad

Como se ha mostrado anteriormente en este capítulo, la relación entre la respuesta en cuentas digitales del espectrorradiómetro y la radiancia que se mide viene dada por la ecuación 4.11:

$$N(\lambda) = \mathfrak{R}(\lambda)L_0(\lambda)t_{\text{int}}G,$$

Esta ecuación indica que, para un tiempo de integración dado, la respuesta del instrumento es proporcional a la radiancia del objeto, siendo el producto de la responsividad espectral y el tiempo de integración, y la constante geométrica G esa constante de proporcionalidad. Por otro lado, también indica que, para una radiancia dada, la respuesta del equipo es proporcional al tiempo de integración que se utilice, siendo el producto de la responsividad espectral y la radiancia, y la constante de proporcionalidad la misma que en el caso anterior. Teniendo en cuenta que la constante geométrica G no cambia ni con el tiempo de integración ni con la radiancia del objeto, se concluye que la relación de proporcionalidad

entre respuesta y exposición L_0 por t_{int} se mantendrá siempre que la responsividad de los píxeles sea constante.

Como en cualquier sistema de detección, la responsividad sólo es constante dentro de determinados límites, que definen el intervalo de respuesta lineal o intervalo de linealidad del instrumento, por lo que es necesario determinar ese intervalo. En el caso de este tipo de espectrorradiómetros cuya respuesta viene dada en cuentas digitales, la responsividad no sólo es la relación entre la excitación de cada píxel y su respuesta eléctrica, sino que incluye también la amplificación de la señal eléctrica, su procesado y su digitalización, por lo que hay elementos puramente electrónicos que también influyen en el comportamiento lineal.

Puesto que la respuesta N depende de dos variables independientes entre sí según la ecuación 4.11, para analizar la linealidad habrá que estudiar su influencia de forma independiente. Para ello, se analiza cómo cambia la respuesta manteniendo una de ellas constante, mientras se varía la otra y viceversa [45].

No linealidad con respecto a la exposición.

Para analizar esta contribución a la no linealidad de respuesta, se estudia el cambio de respuesta manteniendo la radiancia del objeto constante. Si partimos de la ecuación 4.11 y se mide la respuesta a n tiempos de integración distintos para el mismo nivel de radiancia, se debe cumplir, si la respuesta es lineal, que:

$$\frac{N_1(\lambda)}{t_{\text{int},1}\mathfrak{R}(\lambda)} = \frac{N_2(\lambda)}{t_{\text{int},2}\mathfrak{R}(\lambda)} = \dots = \frac{N_n(\lambda)}{t_{\text{int},n}\mathfrak{R}(\lambda)} = L_0(\lambda)G. \quad (4.19)$$

Si los cocientes calculados entre el número de cuentas y el tiempo de integración permanecen constantes, entonces se puede decir que la responsividad para cada tiempo de integración también lo es, por lo que el dispositivo es lineal con respecto al tiempo de integración, lo que es lo mismo que afirmar que lo es con respecto a la exposición radiante, el producto entre el tiempo de integración y la irradiancia sobre el píxel. Esta exposición radiante debe ser también proporcional a la respuesta directa del detector, N .

En el montaje experimental para esta caracterización se empleó la lámpara LDLS como fuente de emisión. Se eligió una muestra espectralmente neutra, que se situó en el centro del goniómetro y se irradió uniformemente. El espectrorradiómetro se situó sobre el anillo del sistema de detección en una dirección de observación cercana a la perpendicular a la muestra, para evitar estar detrás del divisor de haz del sistema periscópico. El nivel de irradiación de la muestra se mantuvo constante durante todo el experimento.

Los tiempos de integración empleados para registrar la respuesta se escogieron según una distribución de potencias de la forma 3^n , donde n es el orden de medición. Este factor se escogió porque permite obtener dos valores por orden de magnitud de tiempo de

integración. Los valores de n usados dependen de la longitud de onda, pues la respuesta del instrumento depende de esa variable. Estos se situaron entre 8 y 14, lo que se corresponde con tiempos de integración de 6561 μs y 4782969 μs . Para valores de tiempo de integración por debajo de $n = 8$ la señal quedaba enmascarada por el ruido de fondo para todas las longitudes de onda. Para valores de tiempo de integración por encima de $n = 12$ se produce saturación de la señal. Se realizaron 20 repeticiones por cada tiempo de integración fijado, tanto para la señal como para la oscuridad, que se resta de la señal en todo el análisis que sigue a continuación.

En la Figura 4.8 se muestra el cociente entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro en función del tiempo de integración, para ciertas longitudes de onda en el intervalo espectral entre 900 nm y 1650 nm, escogiendo los valores espectrales en pasos de 100 nm. La división de los valores espectrales en dos representaciones es debido a la diferencia de señal entre las longitudes de onda, lo que produce una agrupación de valores espectrales bajo tiempos de integración distintos. La normalización de los cocientes representados se efectúa con respecto al segundo tiempo de integración para la primera representación y con respecto al tercer tiempo de integración para la segunda representación de la Figura 4.8. Se observa que el cociente entre el número de cuentas digitales y el tiempo de integración aumenta conforme crece el tiempo de integración, si bien de forma diferente para cada longitud de onda, observándose que para una de ellas el cociente disminuye para el tiempo de integración más alto. La variación con la longitud de onda es esperable, puesto que la responsividad depende de esta magnitud como se ve en la ecuación 4.11. También se observa que la desviación máxima del cociente N/t_{int} normalizado está en torno al 45 %.

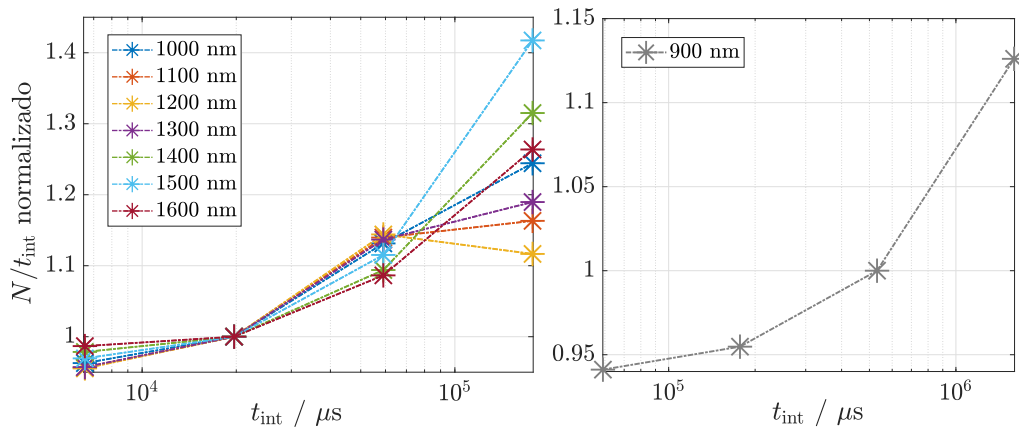


Figura 4.8: Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración del espectrorradiómetro frente al tiempo de integración para las longitudes de onda mencionadas, manteniendo constante la radiancia del objeto.

El cociente normalizado no solo varía con el tiempo de integración, sino también con respecto a N . Se estudió adicionalmente el cociente N/t_{int} en función de N para encontrar una tendencia ajustable que permitiese corregir todos los valores independientemente de

4.2 Caracterización del sistema

la longitud de onda. La representación gráfica de estos valores se muestra en la figura 4.9.

En este caso, la normalización del cociente N/t_{int} se realiza con respecto al valor de respuesta más próximo a 200 cuentas. Como se puede comprobar en la representación, el cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración empieza a disminuir a partir de 3600 cuentas, aproximadamente. Los valores de señal por debajo de 500 cuentas no siguen de forma clara la tendencia del resto de valores hasta 3600 cuentas, lo que puede estar relacionado con el comportamiento del conversor analógico-digital del instrumento. Pero parece evidente que es posible modelar, para valores intermedios de N , la no linealidad en función de N , mientras que no existe forma de hacerlo con respecto al tiempo de integración. Esto parece indicar que el origen de esta no linealidad está relacionado con un efecto asociado con el número de fotoelectrones generados durante el proceso de detección.

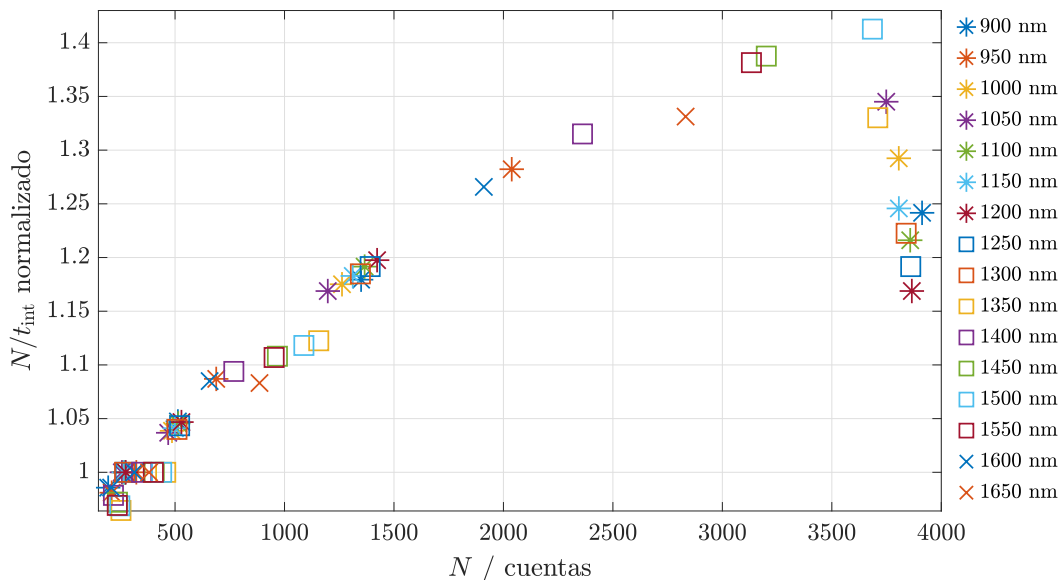


Figura 4.9: Cociente entre la respuesta y el tiempo de integración, normalizado a 200 cuentas, del espectrorradiómetro frente al número de cuentas digitales para los tiempos de integración utilizados. Los datos de cada longitud de onda se diferencian de los demás por el símbolo y el color.

Si se excluyen los valores de ambos extremos (< 500 y > 3600), se observa que la relación entre el cociente N/t_{int} y la respuesta es monótona creciente y con variación suave, por lo que se puede ajustar una función polinómica que establezca una relación entre ambas. La desviación máxima del cociente N/t_{int} normalizado se sitúa en torno al 45 %, como se observaba ya en la Figura 4.8. Si se ajusta un polinomio de segundo grado a los datos anteriores, se obtiene lo que se muestra en la Figura 4.10.

Los coeficientes del polinomio ajustado se pueden observar en la Tabla 4.3, donde $p1$ es el término independiente, $p2$ es el coeficiente de primer grado y $p3$ el del segundo grado. La función de ajuste mostrada en la Figura 4.10 fue usada para ajustar el cociente N/t_{int} . El resultado de esta corrección se muestra en la Figura 4.11.

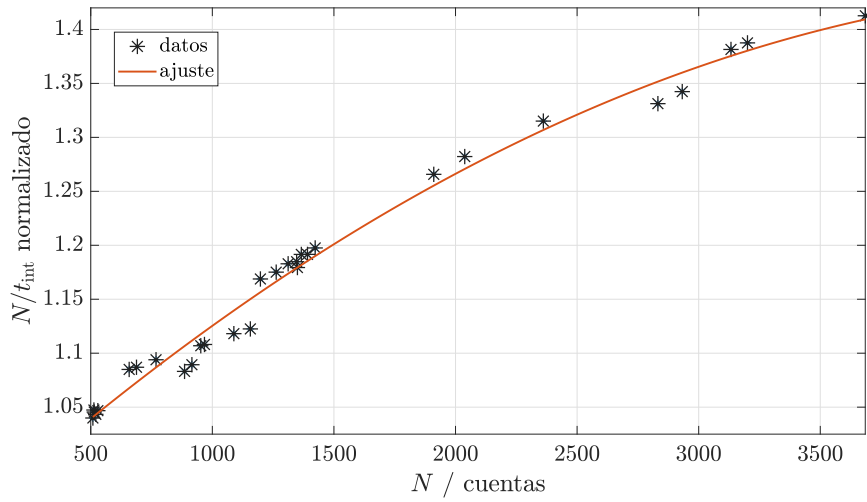


Figura 4.10: Ajuste polinómico de segundo grado del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración frente al número de cuentas digitales, excluidos los valores menores que 500 cuentas y mayores que 3600.

Tabla 4.3: Parámetros obtenidos tras el ajuste.

Parámetro	Valor	U ($k = 2$)
$p1$	-2.4×10^{-8}	4.9×10^{-9}
$p2$	2.2×10^{-4}	1.7×10^{-5}
$p3$	0.93	8.8×10^{-3}
RMSE	0.0133	-

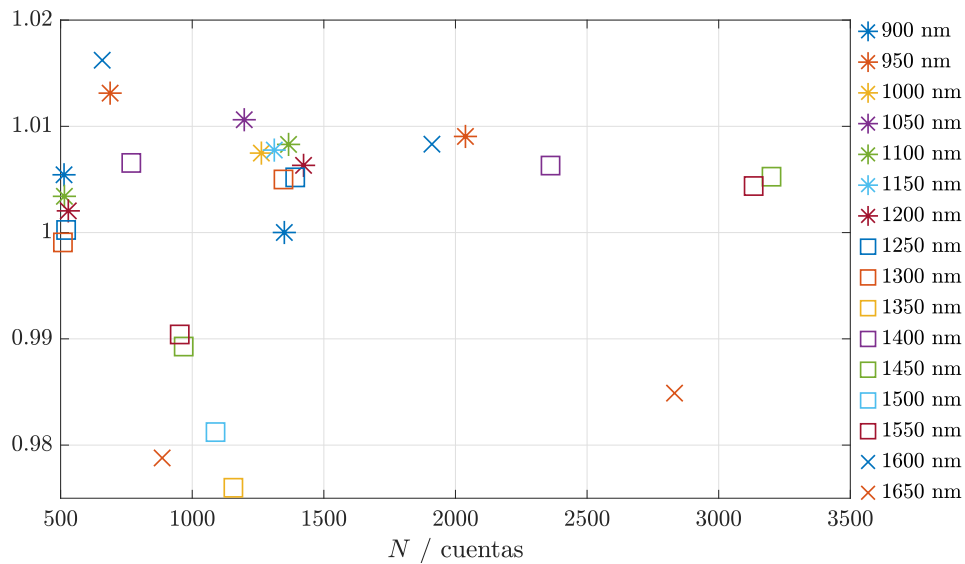


Figura 4.11: Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración frente al número de cuentas digitales tras efectuar el ajuste.

Mientras que la variación de la respuesta previa al ajuste se situaba en torno al 45%

(Figura 4.9), tras aplicar la corrección la variación disminuye hasta valores inferiores al 5 % para los valores de N/t_{int} entre 500 cuentas y 1250 cuentas (Figura 4.11). Para la región comprendida entre 1250 y 3500 cuentas la desviación apreciada es inferior al 3 %.

En segundo lugar, para verificar la bondad del ajuste, se vuelve a representar en la Figura 4.12 el cociente N/t_{int} frente al tiempo de integración, pero en este caso con el ajuste aplicado.

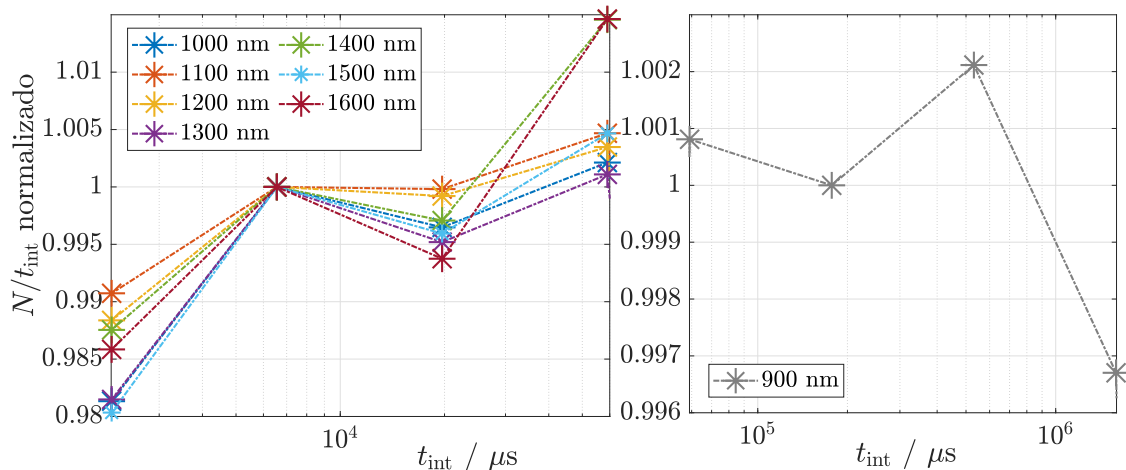


Figura 4.12: Cociente normalizado entre la respuesta y el tiempo de integración frente al tiempo de integración tras efectuar el ajuste.

Los resultados fueron normalizados con respecto al segundo tiempo de integración para cada representación. Se evidencia que tras aplicar el ajuste la desviación total de los valores de N/t_{int} se sitúa por debajo del 3.5 %, de manera análoga a lo apreciado en la Figura 4.10. A la vista de estos resultados, no se deben utilizar tiempos de integración inferiores a 1000 μs , para minimizar el impacto sobre la no linealidad del tiempo de integración.

No linealidad debida a la radiancia

En este caso, la variación de la radiancia sobre el plano de la muestra debe generar un cambio proporcional en el cociente N/t_{int} del instrumento (una vez corregido el anterior efecto) para que este sea lineal. Para caracterizar la proporcionalidad entre este cociente y los cambios en el nivel de radiancia de la muestra se aplicó el método DSR utilizado en el apartado 3.2.2 del capítulo 3. Se empleó de nuevo el filtro del 40 % de transmitancia nominal como referencia de atenuación constante para la caracterización, así como el filtro neutro rectangular para la igualación de la señal, obteniendo cuatro niveles de radiancia de la muestra con transmitancias a través del sistema óptico del gonioprotómetro del 100 %, 50 %, 25 % y 8 %. En este caso, la transmitancia del filtro de referencia se obtiene como el cociente entre la radiancia de la muestra cuando el filtro está interpuesto en el camino óptico de irradiación y la radiancia cuando se retira el filtro. Si se tiene en cuenta

la ecuación 4.12, la transmitancia (τ) se puede escribir como:

$$\tau_n = \frac{L_{t,n}(\lambda)}{L_{i,n}(\lambda)} = \frac{N_{t,n}(\lambda)t_{\text{int},i,n}\mathfrak{R}_{i,n}(\lambda)}{N_{i,n}(\lambda)t_{\text{int},t,n}\mathfrak{R}_{t,n}(\lambda)} = \tau = \text{cte. } \forall n. \quad (4.20)$$

Para calcular la transmitancia para cada nivel de radiancia, se corrige el cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración según se ha explicado en el apartado anterior, evitando la no linealidad debida al tiempo de integración.

Se realizaron 20 repeticiones para la señal de radiancia y 10 para la oscuridad.

Los resultados de la transmitancia calculada se muestran en la Figura 4.13, mostrando las mismas longitudes de onda que en el apartado previo y normalizando los valores respecto al valor de transmitancia del valor de radiancia más alto. Como se observa, la respuesta del instrumento no es lineal con la variación del nivel de radiancia.

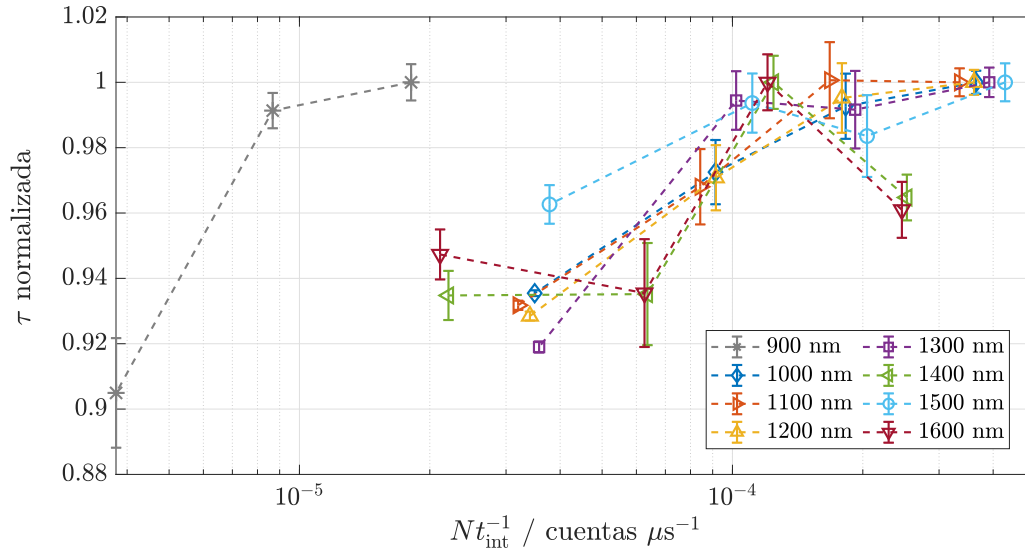


Figura 4.13: Transmitancia normalizada frente al cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración ya corregido de no linealidad para cuatro niveles de radiancia evaluados.

Para la longitud de onda de 900 nm se presenta un valor menos de transmitancia, ya que para el nivel de radiancia más bajo la señal registrada para esta longitud de onda quedaba enmascarada con el fondo. Se puede observar que de manera general, la transmitancia aumenta con el nivel de radiancia, o lo que es lo mismo, la responsividad disminuye al disminuir la radiancia, pues son magnitudes inversas según la ecuación 4.20. El comportamiento para el resto de longitudes de onda, con diferencias respecto al comportamiento observado de la tendencia general comprendida entre las longitudes de onda de 1000 nm y 1200 nm, puede ser debido al residuo resultante del ajuste del cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración, y la diferencia de sensibilidad espectral del espectrorradiómetro.

La desviación máxima apreciada en la Figura 4.13 es inferior al 10 % para las longitudes

de onda comprendidas entre 1000 nm y 1600 nm, e inferior al 13% para 900 nm. Los patrones evaluados en este capítulo presentan reflectancias similares, por lo que se estima que esto no tenga un impacto significativo en la variación de la responsividad, ya que las diferencias de reflectancia entre los patrones tienen relación directa con las diferencias entre las transmitancias evaluadas en este apartado. La variación de θ_i sí que puede tener incidencia en la variación de la responsividad del instrumento, dado que si tenemos en cuenta que la zona de registro del instrumento sobre el plano de la muestra es siempre la misma, e inferior en dimensiones al haz proyectado sobre dicha muestra, el cambio en la dirección de incidencia producirá una disminución de la radiancia de la muestra registrada por el instrumento. Por esto, se hace necesario configurar geometrías de medida con direcciones de incidencia que eviten posiciones muy tangenciales a la muestra cuando sea efectuada la caracterización de la BRDF.

4.2.1.5. Caracterización de la repetitividad

Para la medida de la BRDF sería deseable realizar una sola adquisición por cada posición de medida, pero en este caso es necesario realizar una caracterización previa para estimar la incertidumbre de esa adquisición. Esta evaluación consiste en estudiar la distribución de probabilidad de un número elevado de adquisiciones, de manera que se pueda definir la distribución y estimar la incertidumbre. Para la caracterización, el montaje experimental se configuró como fue descrito en el apartado previo. Se registró la señal de la radiancia de una muestra altamente reflectante, la cual se irradia uniformemente. Para el procedimiento de medida se usa el algoritmo HDR descrito, y se va registrando un número creciente de adquisiciones en cada registro. La desviación típica de cada registro en función del número de adquisiciones se muestra en la Figura 4.14a para una longitud de onda, si bien se obtiene el mismo comportamiento para todas. El número de adquisiciones elegido es suficiente ya que se puede observar una estabilización de la desviación típica de la respuesta para un número elevado de adquisiciones.

Si se ordena el conjunto de los valores del cociente entre el número de cuentas digitales y el tiempo de integración en un histograma, agrupando estos en 12 intervalos de señal (Figura 4.14b), se puede ver que la distribución de valores no tiene una forma característica. Por ello, se asume una distribución de probabilidad rectangular para el conjunto de valores estudiado, y la incertidumbre típica para esta distribución se calcula como: $(b - a)/\sqrt{12}$. Siendo b el valor máximo de la distribución y a el valor mínimo.

Puesto que en la medida de la BRDF el cociente N/t_{int} no tiene un valor único se ha estudiado cómo se comporta la incertidumbre relativa de este cociente tomando 25 adquisiciones para cuatro niveles de radiancia generados por 4 de las 5 posiciones de la rueda de filtros de la instalación (FW en la Fig. 2.2): la posición vacía de esta y los tres filtros montados de transmitancias nominales del 10%, 1% y 0.01%. Para cada nivel de radiancia se usó el algoritmo HDR descrito. Los resultados de la incertidumbre relativa,

calculada según una distribución de probabilidad rectangular, en función del cociente entre la respuesta y el tiempo de integración para todas las longitudes de onda registradas (un punto para cada longitud de onda) se muestran en la Figura 4.15. Cada color corresponde con un nivel de radiancia diferente.

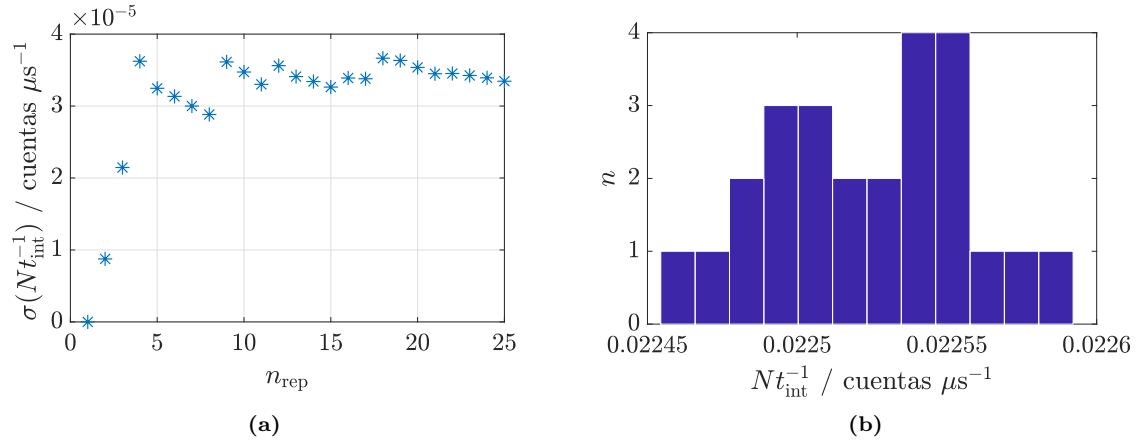


Figura 4.14: Desviación típica para cada conjunto de adquisiciones HDR en función del número de repeticiones registrado (a) y frecuencia de aparición de cada valor del cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración para la adquisición de 25 repeticiones usando 12 intervalos de respuesta (b).

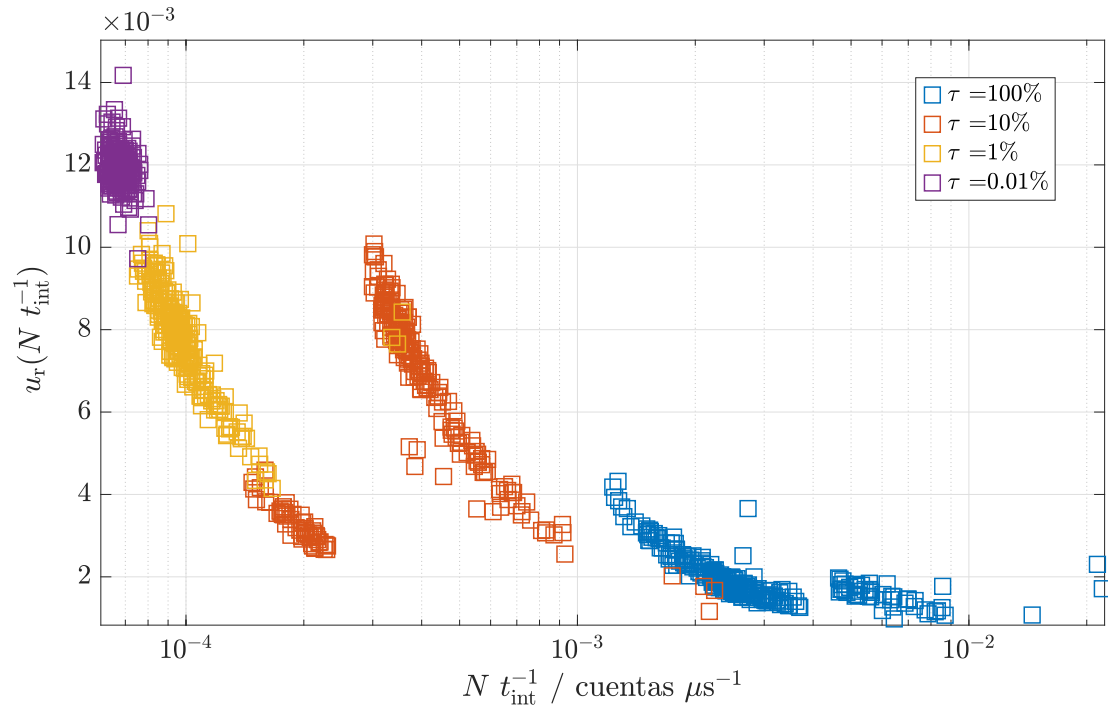


Figura 4.15: Incertidumbre relativa del cociente entre el número de cuentas y el tiempo de integración en función de dicho cociente. Cada punto corresponde a una longitud de onda diferente. Cada color representa un nivel de radiancia diferente obtenido atenuando con filtros neutros de transmitancias nominales 10%, 1% y 0.01%

4.2 Caracterización del sistema

En la Tabla 4.4 se resume este valor de incertidumbre relativa, que se corresponde con el máximo valor de la Figura 4.15 para dicho intervalo.

Tabla 4.4: Incertidumbre calculada para los intervalos de respuesta.

$Nt_{\text{int}}^{-1} / \text{cuentas } \mu\text{s}^{-1}$	$u_r(Nt_{\text{int}}^{-1}) / \text{cuentas } \mu\text{s}^{-1}$
$x \geq 10^{-3}$	4.3×10^{-3}
$10^{-4} < x < 10^{-3}$	10^{-2}

En la Figura 4.15, la incertidumbre relativa de la respuesta varía en función del nivel de radiancia y la longitud de onda. Al objeto de simplificar y puesto que se observa un agrupamiento según el nivel de radiancia, se puede asignar un único valor de incertidumbre relativa a una adquisición según el valor del cociente entre el número de cuentas digitales y el tiempo de integración con el que se obtienen.

Los valores de incertidumbre mostrados en la Tabla 4.4 serán empleados como la incertidumbre relativa tipo A de L_r (ecuación 4.4) para calcular la incertidumbre relativa combinada de la BRDF relativa.

4.2.1.6. Caracterización del error residual de descentramiento

Al llevar reorientar la muestra para las distintas geometrías de medida, se produce inevitablemente un error de descentramiento que hay que considerar en el balance de incertidumbres. Esto significa que el eje de registro del dispositivo, en orientación vertical, se desplaza en la dirección horizontal con el ángulo de observación polar. Esto indica un error residual de alineamiento del dispositivo que ha de ser tenido en cuenta. Los resultados de esta comprobación para la longitud de onda de 1320 nm, normalizados a su valor máximo, se muestran en la Figura 4.16 para tres posiciones angulares distintas, las cuales coinciden con algunas de las seleccionadas para el procedimiento de medida de la BRDF. En la representación de la Figura 4.16, se puede observar un incremento de la longitud de la distribución registrada.

La extensión registrada del haz, medida entre los píxeles cuya señal a media altura varía aproximadamente 3 píxeles para las posiciones de observación más externas, se corresponde a un aumento de la dimensión vertical de aproximadamente 315 μm , de acuerdo al tamaño del píxel espacial del espectrorradiómetro sobre el plano de la muestra.

Ya que la variación de la dimensión vertical registrada por el dispositivo guarda relación con el desplazamiento horizontal producido sobre el plano de la muestra, como se representa en la Figura 4.17, se procedió a calcular dicho desplazamiento, de manera que se conozca la región en la que se calculará la uniformidad de la fuente de irradiación sobre la muestra registrada por el instrumento durante la medida de la BRDF.

Para el cálculo se tomó como posición de referencia la que presenta mayor anchura, que es la que más se aproxima al origen de coordenadas, $\theta_r = 75^\circ$. Como se puede observar

en la representación, y aplicando el teorema de pitágoras se obtuvo el desplazamiento horizontal (x_{dh}) a partir de la variación de la longitud vertical (y_{dh}) y el radio del área de la distribución de irradiación sobre el plano de la muestra ($\phi/2$). La variación del desplazamiento horizontal por el cambio entre las posiciones de reflexión fue de aproximadamente 1 mm.

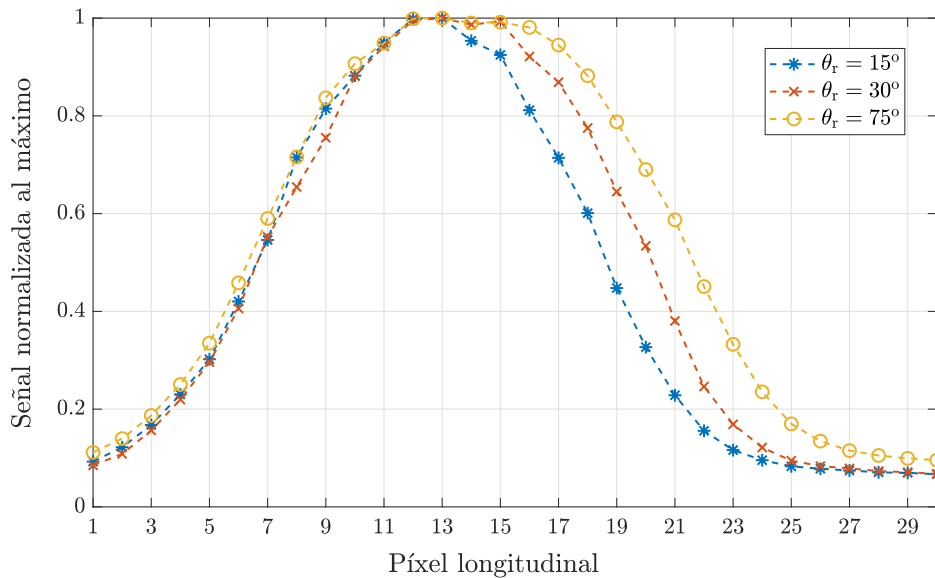


Figura 4.16: Variación de la longitud registrada del haz sobre el plano de la muestra para tres ángulos polares de reflexión.

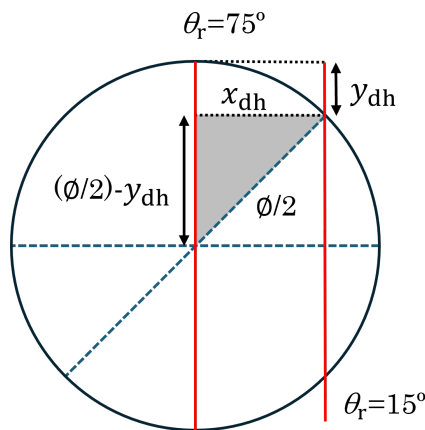


Figura 4.17: Representación del descentramiento con la variación de θ_r . Las líneas rojas representan la longitud registrada por el espectrorradiómetro para el ángulo de 75° y 15° , respectivamente.

4.2.2. Uniformidad del área irradiada

La configuración del sistema óptico empleado para la caracterización de la BRDF relativa permite alcanzar un elevado nivel de uniformidad de la zona irradiada sobre el

plano de la muestra. Se evaluará el grado de uniformidad de este área para seleccionar una sección dentro de esta con la mayor uniformidad posible.

La situación de máxima uniformidad sucede cuando las direcciones de detección e irradiación coinciden y se posicionan perpendiculares al plano de medida del GEFE, es decir, cuando los ángulos polares y azimutales tanto de incidencia como de detección son cero. Al introducir una variación geométrica cambiando la dirección de detección o la de incidencia con respecto al plano de medida la uniformidad puede variar. Si varía la dirección de incidencia, según aumenta el ángulo polar, la dimensión horizontal del haz proyectado sobre la muestra aumenta. En cambio, si varía la dirección de detección, según aumenta el desplazamiento polar, la dimensión horizontal del haz proyectado sobre la muestra no cambia, pero si se emplea un dispositivo de detección con resolución espacial en dos dimensiones, puede comprobarse que la dimensión horizontal iluminada del detector disminuye.

Para que la dirección de detección observe siempre el mismo segmento de la muestra, éste será posicionado de manera que la dirección de registro sea perpendicular al plano definido por el anillo sobre el que se desplaza, por lo que la dirección de registro será vertical.

Para evaluar la no uniformidad del área irradiada sobre la muestra, se muestreó la irradiancia en el plano de la muestra empleando un fotodiodo de InGaAs enmascarado con una apertura de 1.5 mm de diámetro. Se realizó un muestreo en el plano de incidencia, durante el cual se monitorizó la emisión de la fuente empleada, la lámpara de xenón junto con el sistema Köhler de la instalación. Este muestreo consiste en registrar la señal en un número de puntos sobre el plano de la muestra, empleando el brazo robot para posicionar el instrumento de detección en el plano de irradiación de la muestra. Se ha de tener en cuenta que la resolución del muestreo de la uniformidad depende de forma directa del tamaño de la apertura del fotodiodo, por lo que a menor tamaño de la apertura, se debe aumentar la densidad de puntos de registro. En la Figura 4.18 se muestra la señal relativa del fotodiodo en cada posición de medida cubriendo un área de unos 25 mm de diámetro. Los valores representados se normalizaron con respecto al valor máximo de la señal registrada.

En primer lugar, teniendo en cuenta el desplazamiento horizontal relacionado con el descentramiento del espectrorradiómetro, y suponiendo que la posición $\theta_r = 75^\circ$ no coincide exactamente con el eje vertical que pasa por el origen de coordenadas, podremos estimar que el desplazamiento producido con respecto al centro de la distribución de irradiancia será de más de 1 mm.

En segundo lugar, y teniendo en cuenta la distribución mostrada en la Figura 4.18, sabremos que el desplazamiento horizontal por el cambio en la posición de observación puede abarcar una extensión mayor que el píxel central, con respecto al eje vertical que pasa por el centro de la distribución. De esta forma, para la uniformidad calculada, teniendo en cuenta el desplazamiento mencionado, se tendrán en cuenta dos zonas simétricas con respecto al

centro del punto de irradiación sobre el plano de la muestra, la primera correspondiente a la columna central y su adyacente izquierda, y como segunda la columna central y su adyacente derecha (Figura 4.18). Estas zonas tendrán una extensión vertical de 5 píxeles, dado que es el valor que más se acerca a las condiciones dimensionales impuestas por el ángulo sólido de observación ($\varnothing = 7 \text{ mm} \approx 1^\circ$). La uniformidad se calcula obteniendo la media de los valores de señal dentro de cada una de las dos regiones indicadas en la Figura 4.18 por las líneas discontinúas, y a continuación se calcula la desviación típica entre las medias obtenidas. El resultado para la uniformidad de la región seleccionada fue 0.17%. Por lo tanto, se considera que la irradiancia es uniforme midiendo en esa zona con una incertidumbre relativa de 0.0017.

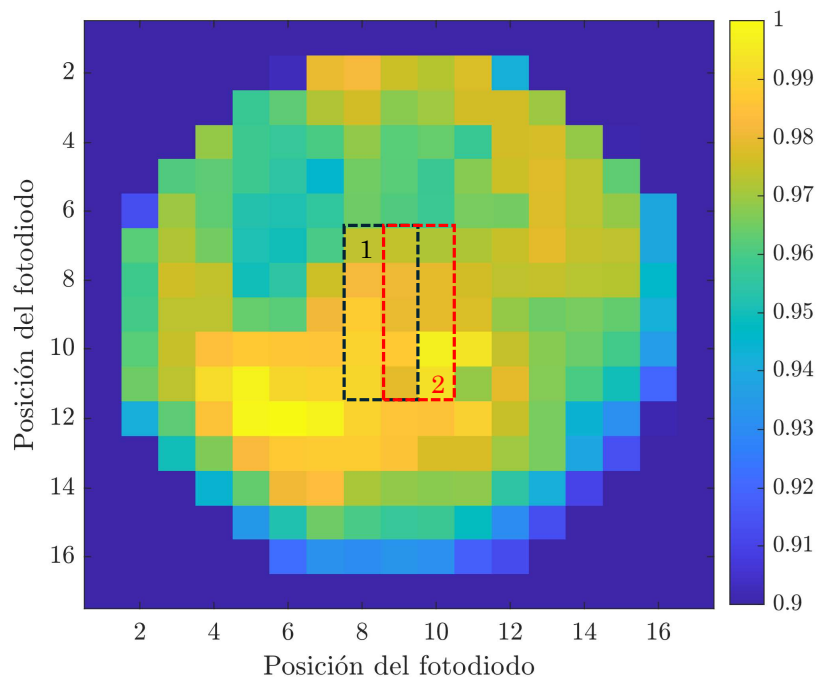


Figura 4.18: Distribución espacial de irradiancia sobre el plano de la muestra registrada empleando un fotodiodo de InGaAs. Las zonas marcadas con línea discontinua indican las regiones seleccionadas para el cálculo de la uniformidad.

4.2.3. Uniformidad de los patrones de reflectancia

La uniformidad de los patrones no se puede caracterizar de forma directa, ya que la señal registrada por el instrumento de detección incluye además de ésta, tanto la no uniformidad de la fuente empleada como la no uniformidad de la distribución espacial de píxeles del sensor de dicho instrumento. Para poder caracterizar la uniformidad de cada patrón de reflectancia, es necesario sustraer la información de las dos restantes. Se ha caracterizado la homogeneidad del conjunto completo de patrones: AH14, AW1, AW2, ZP1, ZP2, G97 y G97p.

4.2 Caracterización del sistema

Para llevar a cabo la caracterización, se emplea un montaje óptico de irradiación similar al configurado para la medida de la BRDF relativa, en concreto, el usado en el apartado previo. El diámetro del área irradiada se mantuvo en 25 mm, de manera que se mantuviese el patrón de uniformidad de la imagen de la fuente sobre el plano de la muestra. Cada patrón de reflectancia fue posicionado en el plano de medida del sistema GEFE, de la forma habitual. Al requerirse información puramente espacial, se empleó la cámara infrarroja descrita en el capítulo 2 para esta caracterización, fijando un tiempo de integración que permitiese obtener un nivel de exposición alto durante la medida, pero sin alcanzar saturación de la señal. Se registraron 25 adquisiciones por patrón, obteniendo el promedio correspondiente. Al no apreciarse variación temporal de la señal de oscuridad, fue registrada una única adquisición ocluyendo el haz incidente, siendo sustraída la señal al promedio correspondiente de cada patrón.

Tras efectuar el promedio de las adquisiciones para cada patrón con la oscuridad sustraída; se realizó un promedio de los promedios de cada patrón, consiguiendo mediante éste minimizar el fenómeno de no uniformidad de los patrones, de manera que predomine la información correspondiente a la suma de las dos no uniformidades restantes ya mencionadas. En la Figura 4.19 se representa la distribución espacial de la uniformidad promedio de los patrones de reflectancia. Se puede apreciar una similitud entre esta figura y la Figura 4.18, lo que es compatible con que la fuente predominante de uniformidad es la de irradiación. La imagen se normalizó con respecto a la media de los valores por encima del 70 % de la señal máxima registrada, para evitar incluir en la normalización valores fuera de la zona irradiada. La señal es mostrada en la figura con un mapa de falso color.

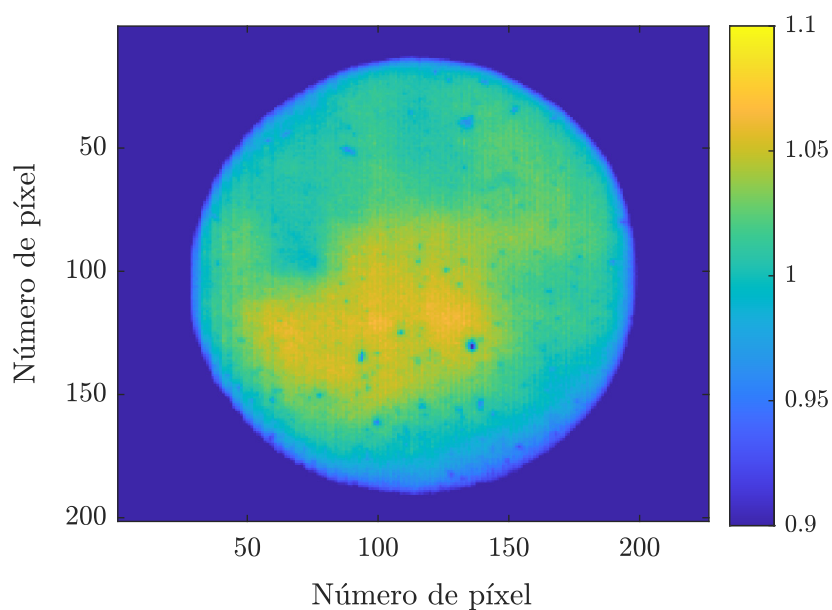


Figura 4.19: Uniformidad promedio de la zona irradiada de los patrones de reflectancia, que se ve afectada por las uniformidades tanto de irradiación en el plano de la muestra como de la distribución espacial de respuesta de los píxeles de la cámara.

A continuación, el promedio neto de adquisiciones de cada patrón fue dividido entre el promedio de promedios correspondiente a la Figura 4.19 sin la normalización aplicada. De esta manera se pretende aplicar una corrección a cada patrón del fenómeno de uniformidad de la fuente de irradiación. En adelante, se denomina imagen corregida a la distribución espacial relativa de señal de cada patrón con la corrección descrita aplicada.

En las Figuras 4.20-4.23 se muestran los resultados para las imágenes corregidas. Se procedió a calcular la desviación típica relativa de cada representación, que guarda relación con la uniformidad de los patrones. Los valores de la desviación típica relativa se muestran en la Tabla 4.5. La uniformidad de cada patrón se define como el cociente entre la desviación típica calculada y su valor medio, expresado en tanto por ciento. Para la representación de estas figuras se aplicó el mismo criterio de normalización que el empleado en la Figura 4.19, así como la representación de la señal relativa en mapa de falso color.

Para el primer grupo de muestras (Figura 4.20), la diferencia de uniformidad es de 0.12 %. ZP1 es la más uniforme de las dos.

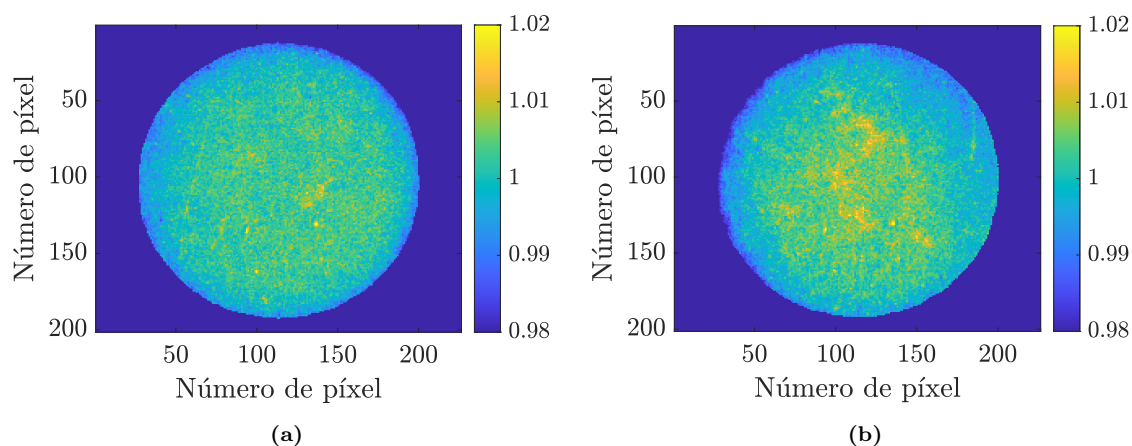


Figura 4.20: Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones ZP1 (a) y ZP2 (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.

Para el segundo grupo de patrones (Figura 4.21), la uniformidad varía menos entre ellos, sólo un 0.01 %, siendo la pareja de muestras con un valor de uniformidad más próximo. Esto podría ser debido a la composición del material, empleado en sustitución al Russian Opal Glass MC-20, y su relación con la degradación de éste con el paso del tiempo con respecto a las muestras de PTFE [13].

Para esta pareja, se puede apreciar una mayor presencia de valores de señal alta, situados en el borde de la distribución mostrada. Este fenómeno puede ser debido a las características del propio material, ya que no es apreciado para la imagen promediada. Para esta pareja, la muestra más uniforme es AW1, y la diferencia es un orden de magnitud menor con respecto a la apreciada para la primera pareja de patrones.

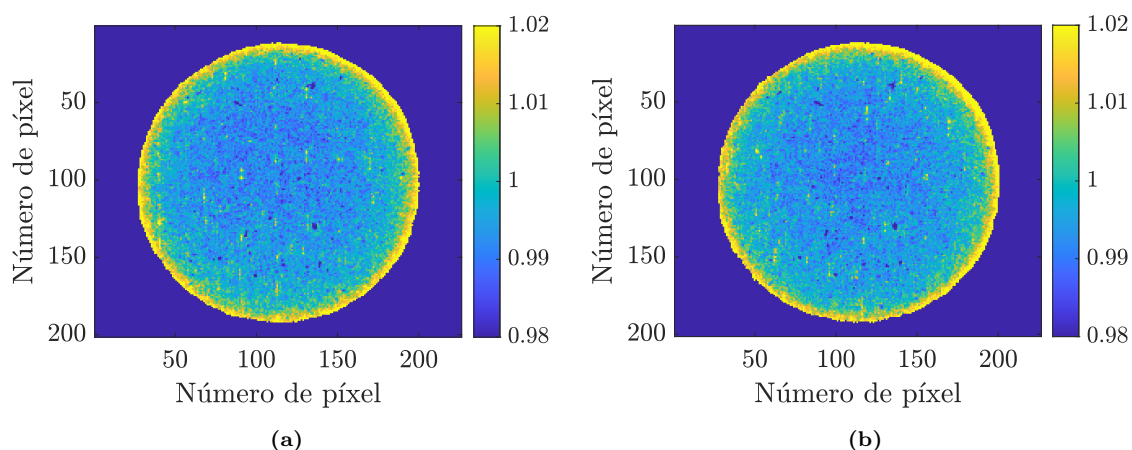


Figura 4.21: Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones AW1 (a) y AW2 (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.

Para el tercer grupo de muestras patrón (Figura 4.22), la diferencia de uniformidad entre ellas es de un 0.42 %, siendo la pareja que presenta la mayor diferencia. Este resultado es esperado, ya que G97p tiene un arañazo en su superficie; y al ser usada como muestra de prueba habitual en caracterizaciones llevadas a cabo en el GEFE ha podido sufrir un mayor deterioro por el uso.

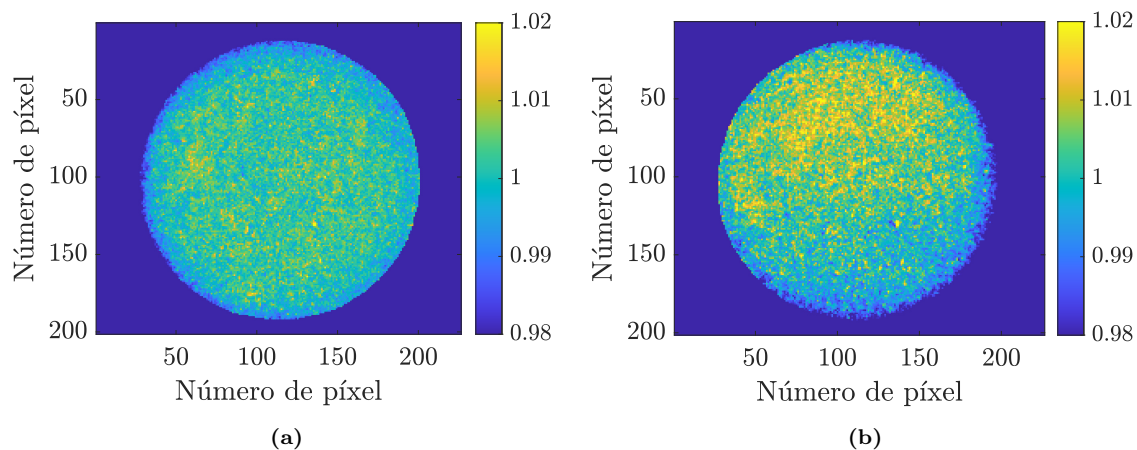


Figura 4.22: Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, de los patrones G97 (a) y G97p (b) que indica la homogeneidad de los mismos. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.

El patrón cerámico AH14 (Figura 4.23) presenta una uniformidad similar a la de los patrones anteriormente mencionados con un mayor grado de uniformidad. Se puede observar un comportamiento similar al observado para las muestras AW en el borde de la zona de irradiación, pero en este caso de forma menos acentuada. Esta semejanza puede ser debida a una similitud entre las propiedades de reflexión del vidrio y la cerámica que los integran.

Si se comparan todas las muestras patrón entre sí se puede observar que las más uniformes son las compuestas por PTFE, las parejas ZP y G97 (omitiendo G97p) y la AH14 con una uniformidad muy similar. En base a la degradación observada por G97p, cabe la posibilidad que con el paso del tiempo y el uso la uniformidad de los patrones de PTFE se sitúe por debajo de los AW y AH14. De entre todas las muestras, ZP1 es que presenta mayor uniformidad en su superficie.

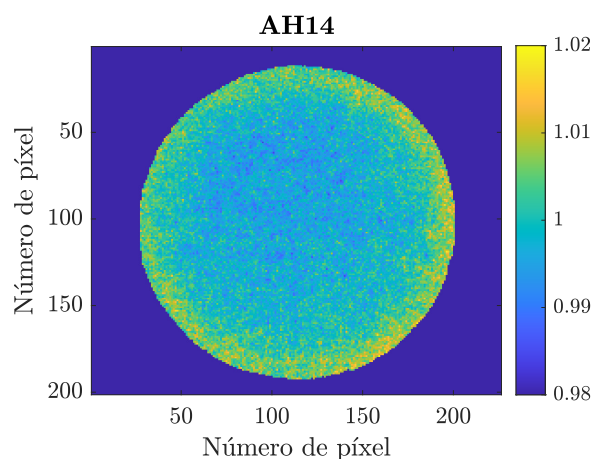


Figura 4.23: Distribución espacial de la imagen corregida, minimizada la uniformidad de irradiación y detección, del patrón AH14 que indica la homogeneidad del mismo. En código de falso color se indica el valor calculado para cada píxel.

Tabla 4.5: Valores de uniformidad de los patrones.

Patrón	Figura	Valor medio	Desviación típica	Uniformidad
ZP1	4.20a	1.0005	0.0044	0.44 %
ZP2	4.20b	1.0005	0.0056	0.56 %
AW1	4.21a	0.9983	0.0089	0.90 %
AW2	4.21b	0.9985	0.0091	0.91 %
G97	4.22a	1.0006	0.0052	0.52 %
G97p	4.22b	1.0013	0.0095	0.94 %
AH14	4.23	0.9998	0.0049	0.49 %

4.3. Procedimiento experimental

Se puede observar una vista superior del goniómetro utilizado para la medida de la BRDF relativa en las Figuras 4.24, para la medida de la irradiancia sobre el plano de la muestra, y 4.25 para la medida de la radiancia de la muestra. Para las dos configuraciones de medida se ha usado la lámpara de xenón (S2) junto a un sistema Köhler con objeto de conseguir una óptima uniformidad de la distribución de la radiación sobre el plano de la muestra. El espejo (M45) se situó en la posición inferior del periscopio del

4.3 Procedimiento experimental

gonio-espectrofotómetro, de la forma indicada en la figura 2.2 del Capítulo 2. El espectrorradiómetro de infrarrojo (SR_{IR}) se emplea como elemento de detección; además de un fotodiodo de InGaAs (Mon) como monitor de control conectado a un picoamperímetro Bentham (no incluido en las figuras).

La configuración de los elementos del GEFE para la posición de medida directa (irradiancia sobre la muestra) puede observarse en la Figura 4.24. En ella, se desplaza la plataforma del espectrorradiómetro sobre el anillo de la instalación hasta la dirección de incidencia para registrar la radiación que incide sobre el plano de la muestra, quedando posicionado a $\phi_A = 180^\circ$. El plano de enfoque del espectrorradiómetro no varía, permaneciendo situado sobre el origen de coordenadas del sistema. El tiempo de integración máximo para el método HDR se ajustó consecuentemente, obteniendo como resultado al finalizar la medida una muestra de tiempos de integración de 1.25 ms, 313 μ s, 78 μ s y 20 μ s. Nótese que los tiempos de integración usados son más cortos que los registrados en las caracterizaciones previas realizadas en este capítulo, ya que para éstas la señal registrada era la de la radiancia de la muestra.

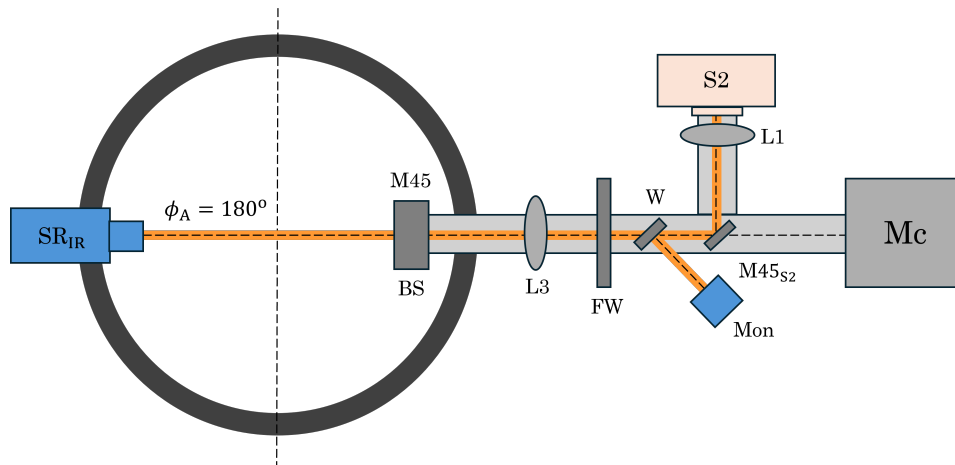


Figura 4.24: Configuración del goniospectrofotómetro GEFE para la medida directa de la irradiancia en el plano de irradiación de las muestras en la medida de la BRDF relativa.

La configuración de los elementos del GEFE para la posición de medida de radiancia de la muestra se observa en la Figura 4.25. En este caso, las geometrías de medida se obtienen mediante el desplazamiento de la plataforma del espectrorradiómetro entre las posiciones $\phi_A = 0^\circ$ y $\phi_A = 75^\circ$ en pasos de 15° , y del giro de la muestra asistido por el brazo robot.

Para esta configuración de medida, se tuvo en cuenta que en direcciones tanto de incidencia como de detección de la muestra que son más tangenciales, la señal registrada es más baja, por lo que el tiempo de integración inicial seleccionado para el método HDR ha de ser más largo. Se seleccionó un tiempo de integración máximo de 500 ms. A pesar de que las muestras son difusas, hay una diferencia de la señal entre las geometrías especulares y el resto de geometrías, por lo que el tiempo de integración máximo registrado en condición

especular es más bajo. Tres tiempos de integración se registraron para las geometrías especulares: 125 ms, 32 ms y 8 ms. Para el resto de geometrías, se registraron 4 tiempos de integración: 500 ms, 125 ms, 32 ms y 8 ms.

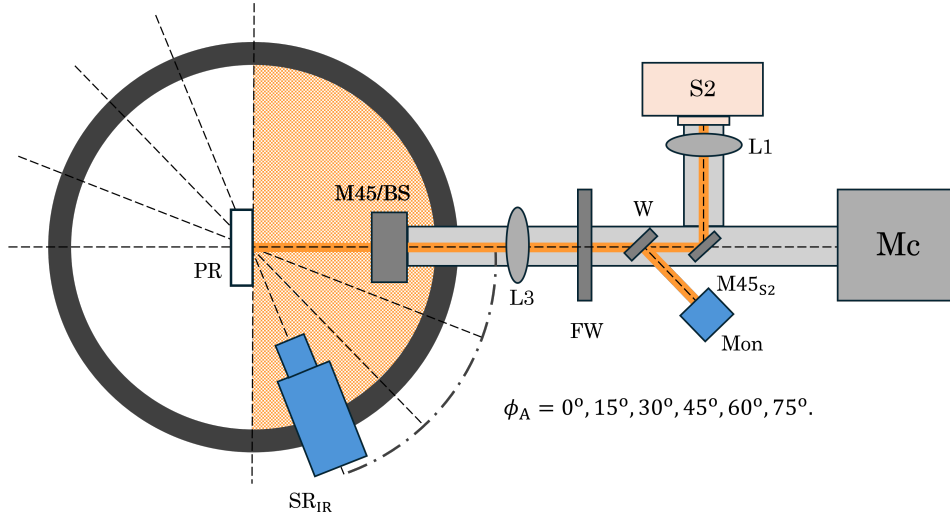


Figura 4.25: Configuración del sistema GEFE para la medida de la radiancia reflejada en la medida de la BRDF relativa.

Una única adquisición se efectuó por cada tiempo de integración registrado para ambas configuraciones de medida, sabido el comportamiento de repetitibilidad del dispositivo. Para el monitor de control fueron realizadas 10 adquisiciones por geometría.

Para los ángulos involucrados en la configuración geométrica de medida, no se modifica ϕ_i porque se asume isotropía con relación a la orientación de la muestra. Se elige $\phi_i=0^\circ$. Para el ángulo azimutal de reflexión, $\phi_r=0^\circ$ define el semiplano que incluye la dirección de incidencia, mientras que $\phi_r=180^\circ$ define el semiplano que incluye la dirección especular. De esta manera, $\phi_r=0^\circ$ y $\phi_r=180^\circ$ definen el plano de incidencia. Para mejor visualización de las geometrías en el espacio, en la Figura 4.26 se pueden observar los semiplanos de incidencia y el semiplano de observación sobre la superficie de la muestra. Nótese que para la configuración geométrica anteriormente mencionada, el semiplano de observación coincidirá con el semiplano de incidencia situado a la izquierda de la Figura 4.26 cuando $\phi_r = 0^\circ$ y con el situado a la derecha cuando $\phi_r = 180^\circ$. De esta manera, se seleccionan $\phi_r = 0^\circ$ y $\phi_r = 180^\circ$ para el procedimiento de medida de la BRDF, por lo que las geometrías elegidas se restringen al plano de incidencia.

El posicionamiento de la plataforma mencionado, expresado como ϕ_A , guarda relación directa con los valores de θ_r escogidos, como fue expresado en la ecuación 2.1 al final del capítulo 2. Los mismos valores fueron seleccionados para θ_i . La totalidad de las geometrías resultantes se puede observar en la Tabla 4.6. Las direcciones de retrorreflexión (no medidas) y especulares se encuentran resaltadas en dicha tabla. Estas direcciones angulares son de retrorreflexión cuando $\phi_r=0^\circ$. La más oscura indica la configuración geométrica en la que la dirección especular y la de retrorreflexión son coincidentes.

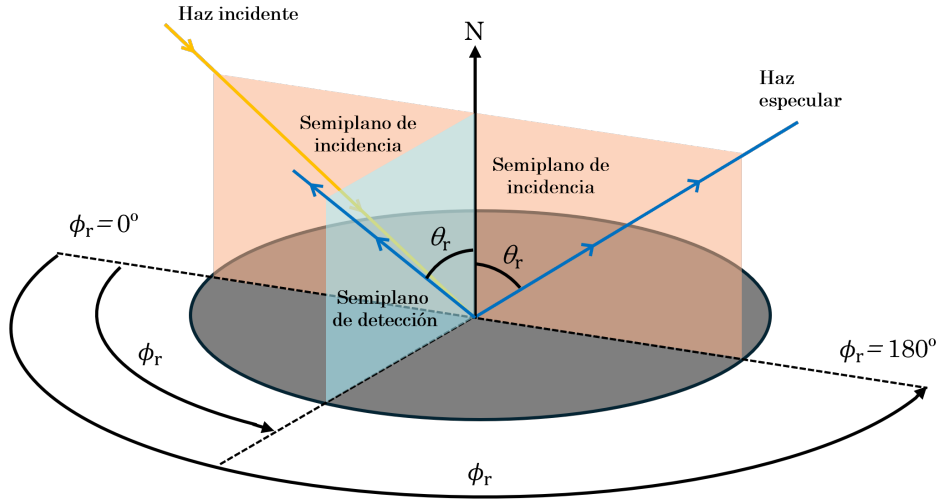


Figura 4.26: Definición del plano de incidencia, así como de un semiplano de detección fuera del plano de incidencia.

Tabla 4.6: Configuración de los ángulos polares, para $\phi_r = 0^\circ$ y $\phi_r = 180^\circ$, empleados en la caracterización de la BRDF.

$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$
0	0	15	0	30	0	45	0	60	0	75	0
0	15	15	15	30	15	45	15	60	15	75	15
0	30	15	30	30	30	45	30	60	30	75	30
0	45	15	45	30	45	45	45	60	45	75	45
0	60	15	60	30	60	45	60	60	60	75	60
0	75	15	75	30	75	45	75	60	75	75	75

4.4. Resultados de la BRDF relativa

Los resultados para la BRDF relativa se calculan según la ecuación 4.16 como:

$$f_{r,rel} = \frac{N_r(\lambda)/t_{int,r}}{N_{0:45}(\lambda)/t_{int,0:45}} \frac{1}{\cos \theta_i} \times C_{NL} \times C_{\Phi} \times C_U.$$

Su incertidumbre típica relativa se calcula como se ha visto a lo largo de este escrito, y se expresa a continuación:

$$u_r(f_{r,rel}) = \frac{u(f_{r,rel})}{f_{r,rel}} = \left\{ \left[\frac{u(N_r/t_{int,r})}{N_r/t_{int,r}} \right]^2 + \left[\frac{u(N_{0:45}/t_{int,0:45})}{N_{0:45}/t_{int,0:45}} \right]^2 + \left[\frac{u(\cos \theta_i)}{\cos \theta_i} \right]^2 + \left[\frac{u(C_{NL})}{C_{NL}} \right]^2 + \left[\frac{u(C_{\Phi})}{C_{\Phi}} \right]^2 + \left[\frac{u(C_U)}{C_U} \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (4.21)$$

Los resultados para la BRDF relativa comprenden el intervalo espectral entre 900 nm y 1650 nm. Para las longitudes de onda situadas entre 925 nm y 975 nm se aplica una interpolación lineal de los resultados, ya que se observaron valores muy alejados de la tendencia espectral con el dispositivo a esas longitudes de onda, que puede ser debido a una región defectuosa de los píxeles espaciales de la matriz del dispositivo que son usados para el promedio espacial. La incidencia de este fenómeno puede ser significativa al seleccionar una cantidad de píxeles espaciales (35 píxeles) baja en relación al total de la matriz del sensor (640 píxeles).

Debido al volumen de los datos generados en la medida de la BRDF relativa, estos, junto con su incertidumbre relativa expandida $k = 2$, se presentan en el Anexo C de esta tesis y están publicados en el repositorio digital.csic.es. A continuación se muestra un ejemplo de la BRDF relativa y su incertidumbre relativa expandida $k = 2$ para la geometría de medida $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón G97.

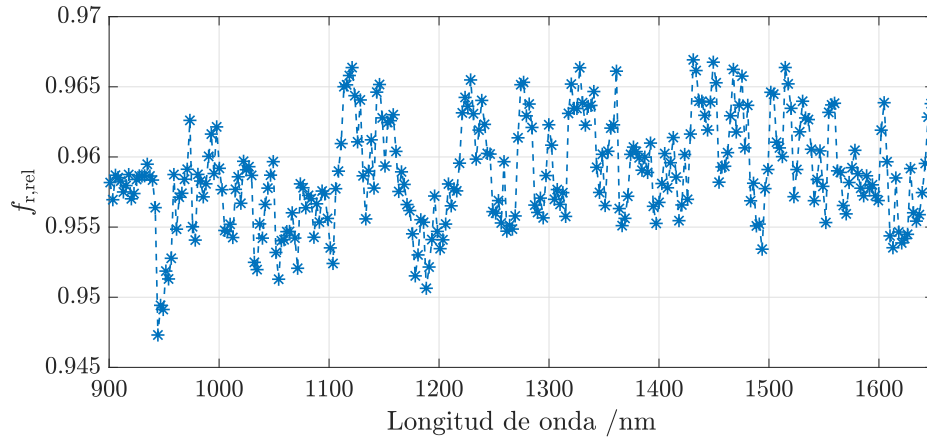


Figura 4.27: Distribución espectral de la BRDF relativa de la muestra G97 para una dirección de incidencia y detección, $f_r(0^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 0^\circ)$.

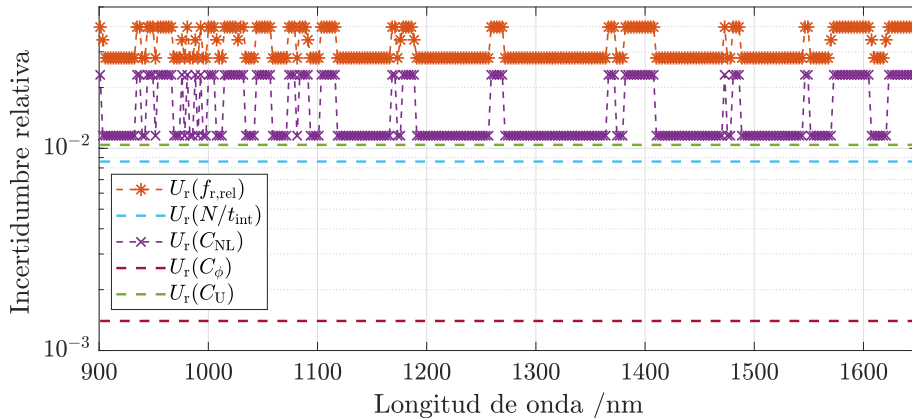


Figura 4.28: Distribución espectral de la incertidumbre relativa expandida de la BRDF relativa para la misma dirección de incidencia y detección anterior, $f_r(0^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 0^\circ)$.

4.4 Resultados de la BRDF relativa

Como se puede observar en la Figura 4.27, la distribución espectral que se observa se corresponde a una normalización del cociente N/t_{int} con respecto al valor a la geometría de referencia $0^\circ:45^\circ$. Para la representación de la BRDF relativa se evitó mostrar la medida a esta geometría de referencia, ya que la BRDF relativa sería 1 para todos los valores espectrales. Esto es debido a que en este caso la geometría sería la misma que la de referencia, y la muestra coincidiría con el patrón de medida empleado para el cálculo de la BRDF. Para $\theta_i = 0^\circ$ y $\theta_r > 45^\circ$, la BRDF relativa está por debajo de 1 y para $\theta_r < 45^\circ$ se sitúa por encima, debido a que la reflectancia bidireccional aumenta con θ_r en este intervalo angular cuando $\theta_i = 0^\circ$.

Como se observa en la Figura 4.28, la incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF relativa alcanza valores cercanos al 4% para algunas longitudes de onda, lo que es debido al predominio de la contribución a la incertidumbre del coeficiente de no linealidad (C_{NL}), como se mostró en los resultados del ajuste (Figura 4.11) para la calibración de la linealidad del espectrorradiómetro (apartado 4.2.1.4) tras compensar la no linealidad de respuesta del instrumento. No obstante, en la mayor parte de la región espectral estudiada, la incertidumbre se mantiene por debajo del 3%. Esta componente de incertidumbre es la limitante para la medida de la BRDF relativa, por lo que en el caso de que se desee reducir la incertidumbre de la medida es necesario encontrar otro método de corrección de la linealidad para el espectrorradiómetro que permita efectuar un ajuste con un residuo menor. En el caso de que se consiguiese reducir esta incertidumbre a valores inferiores al 1% y dejase de ser la limitante de la medida, se habría de reducir la correspondiente a la no uniformidad, escogiendo una zona más pequeña de la muestra para la caracterización de la no uniformidad de las muestras, y obtener en caso de ser posible un método de caracterización de la respuesta con el tiempo de integración del espectrorradiómetro que permita un ajuste más preciso de los resultados de incertidumbre, en lugar de emplear una distribución rectangular de probabilidad.

En la Figura 4.28 no se incluye la incertidumbre del coseno del ángulo polar de incidencia, ya que esta es igual a 0. No obstante, la incertidumbre para este parámetro alcanza un valor máximo de 0.65% para la posición $\theta_i = 75^\circ$, por lo que se ha de tener en cuenta si se consigue reducir la incertidumbre de la BRDF relativa como ha sido discutido anteriormente.

Capítulo 5

Resultados de la escala de BRDF

Contenido

5.1. Dependencia espectral de la BRDF	93
5.2. Dependencia angular de la BRDF	110
5.3. Validación de los resultados	115
5.3.1. Principio de reciprocidad de Helmholtz	115
5.3.2. Cálculo de la reflectancia 0°:d	118
5.3.3. Intercomparación de la BRDF (CSIC-PTB)	121

En este capítulo se muestran los resultados del cálculo de la BRDF a partir de los resultados de la BRDF relativa obtenidos en el capítulo 4 (véase ecuación 4.5) y del valor del coeficiente de radiancia a 0°:45°($q_{0:45}$) obtenido para el patrón de reflectancia G97, en el capítulo 3. La expresión para el cálculo del factor de distribución de reflectancia bidireccional por tanto será:

$$f_r = f_{r,rel} \times q_{0:45,ref}. \quad (5.1)$$

Donde se han omitido las dependencias angulares y espectrales por facilidad de escritura.

Como se deduce de la guía para el cálculo de incertidumbres [37], puesto que la BRDF se obtiene como el producto de dos variables, su incertidumbre relativa se calcula a partir de la expresión:

$$u_r(f_r) = \frac{u(f_r)}{f_r} = \sqrt{\left[\frac{u(f_{r,rel})}{f_{r,rel}}\right]^2 + \left[\frac{u(q_{0:45})}{q_{0:45}}\right]^2}. \quad (5.2)$$

Como se ha comprobado al final de los capítulos 3 y 4, la incertidumbre de la BRDF relativa

es la limitante de las dos, ya que el valor máximo de incertidumbre relativa expandida $k = 2$ para el coeficiente de radiancia espectral $q_{0:45}$ está en torno al 1%, mientras que el valor mínimo de incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF relativa está en torno al 3%. Por tanto, la incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF será similar a la observada en la Figura 4.28 del capítulo 4. Un ejemplo de la incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF y sus contribuciones a la incertidumbre se pueden observar en la Figura 5.1, para la muestra G97 y para la misma geometría de medida del apartado 4.4 ($\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$). Los valores obtenidos, tanto de BRDF como de su incertidumbre para cada muestra medida, se muestran en el anexo D de esta tesis, almacenados digitalmente en el repositorio digital del CSIC.

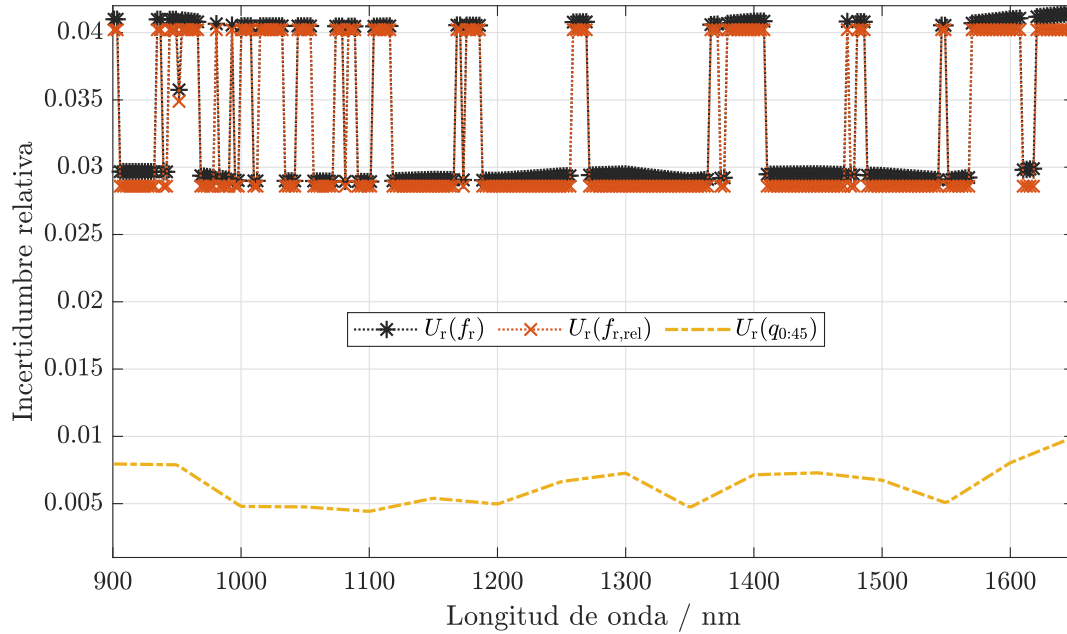


Figura 5.1: Incertidumbre relativa expandida $k = 2$ de la BRDF y sus contribuciones a la incertidumbre, también expresadas como incertidumbre relativa expandida $k = 2$, para la muestra G97 y la geometría de medida $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$.

En los dos siguientes apartados se analizan los resultados de la BRDF, primero espectralmente y después angularmente. A través del primero se determina el impacto de la dependencia espectral en el valor de BRDF, cuyo comportamiento condicionará las representaciones angulares del apartado siguiente.

Por último, la validación de los resultados de BRDF se realiza con dos métodos internos y uno externo: para los métodos internos se comparó la reflectancia bidireccional para geometrías recíprocas, y se comparó el cálculo del factor de reflectancia $0^\circ:d$ a partir de la BRDF medida con el resultado que se obtiene utilizando un método basado en una esfera integradora. El método externo consistió en efectuar una intercomparación entre los resultados de BRDF obtenidos en este capítulo para la muestra AH14 y los disponibles de

su certificado de calibración, realizada por el PTB para el mismo patrón.

5.1. Dependencia espectral de la BRDF

En este apartado se representa la BRDF calculada según la ecuación 5.1, para todas las geometrías de medida y todos los patrones, en función de la longitud de onda. En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran los resultados de la BRDF espectral del patrón AH14 para las geometrías dentro del semiplano de detección que incluye la geometría de retroreflexión ($\phi_r = 0^\circ$) y para las geometrías dentro del semiplano de detección que incluye la geometría especular ($\phi_r = 180^\circ$), respectivamente. El mismo criterio de agrupación de los resultados se repite en el resto de las figuras siguientes: Figuras 5.4 y 5.5 para el patrón AW1, Figuras 5.6 y 5.7 para el patrón AW2, Figuras 5.8 y 5.9 para el patrón G97, Figuras 5.10 y 5.11 para el patrón G97p, Figuras 5.12 y 5.13 para el patrón ZP1 y Figuras 5.14 y 5.15 para el patrón ZP2.

Para todas las distribuciones se aplicó un suavizado a cada distribución espectral usando una media móvil, de manera que se redujo el ruido de la distribución.

Adicionalmente, se ha calculado la desviación típica de la media espectral para cada distribución por geometría de medida para complementar el análisis de la dependencia espectral.

Con estos dos conjuntos de resultados se realiza el análisis espectral de la BRDF en intervalos más pequeños de longitud de onda; y de la dispersión de los valores de BRDF de la distribución espectral a través de la desviación típica de la media espectral de cada distribución de BRDF.

Las representaciones para la desviación típica de la media se observan en las Figuras 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19. En cada figura se representan los valores de cada patrón correspondientes a una dirección de incidencia, $\theta_i = 30^\circ$ para la figura 5.16, $\theta_i = 45^\circ$ para la figura 5.17, $\theta_i = 60^\circ$ para la figura 5.18 y $\theta_i = 75^\circ$ para la figura 5.19. En ellas, el eje de abcisas indica un índice previamente asignado para la ordenación de las geometrías, relacionado con las posiciones angulares de incidencia y reflexión. La relación de este índice con las posiciones angulares de incidencia y reflexión puede consultarse en la Tabla 5.1. En esta tabla, las geometrías de retroreflexión se indican en color gris oscuro, mientras que las especulares se indican en gris claro. La medida de retroreflexión no se ha llevado a cabo, por lo que el índice que corresponde a esta geometría en cada figura no tiene ningún valor asignado.

Las representaciones para la desviación típica comienzan por el número de geometría 25 dado que la variación apreciada para las geometrías anteriores a esta es similar a la observada para las geometrías de la Figura 5.16.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

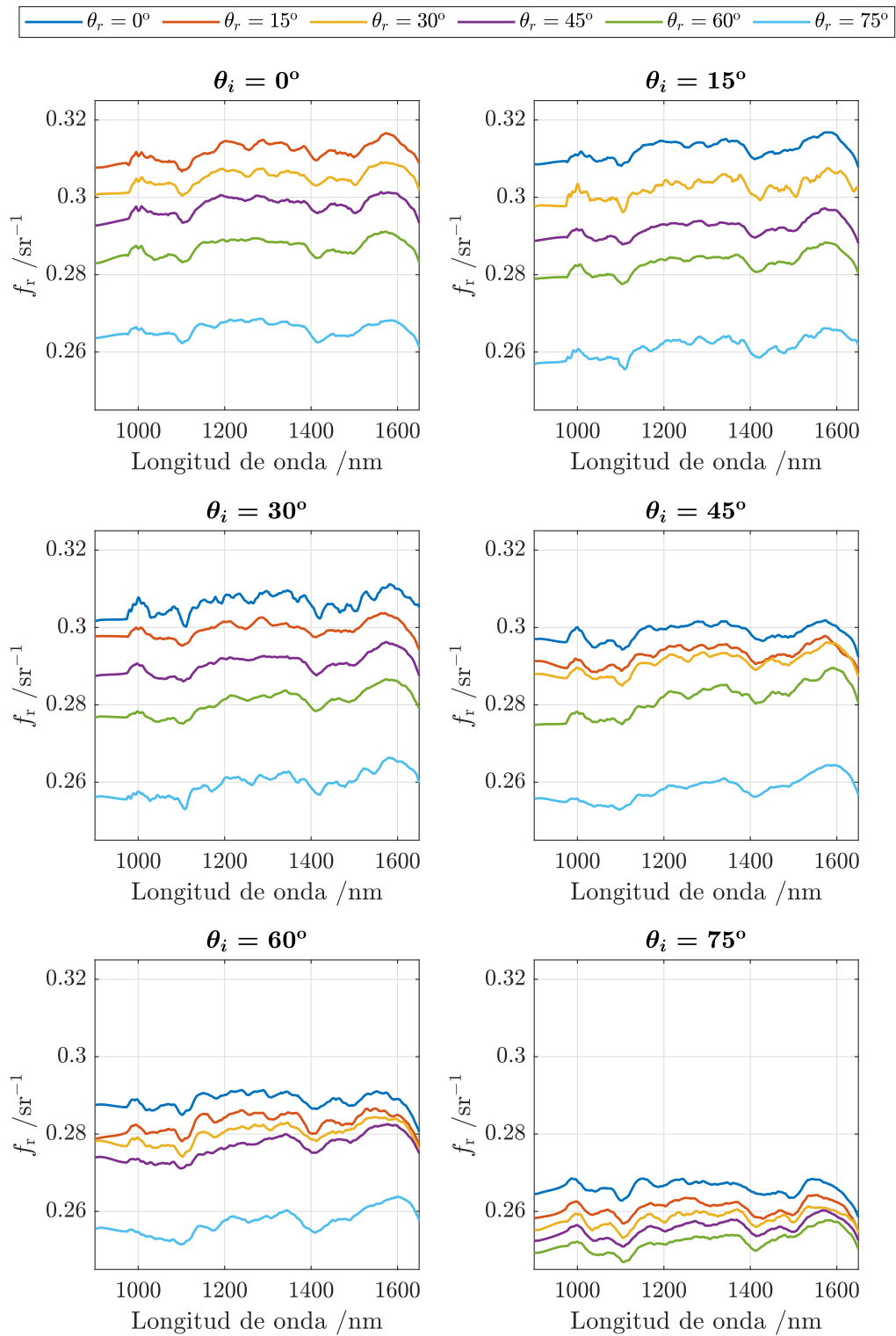


Figura 5.2: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AH14.

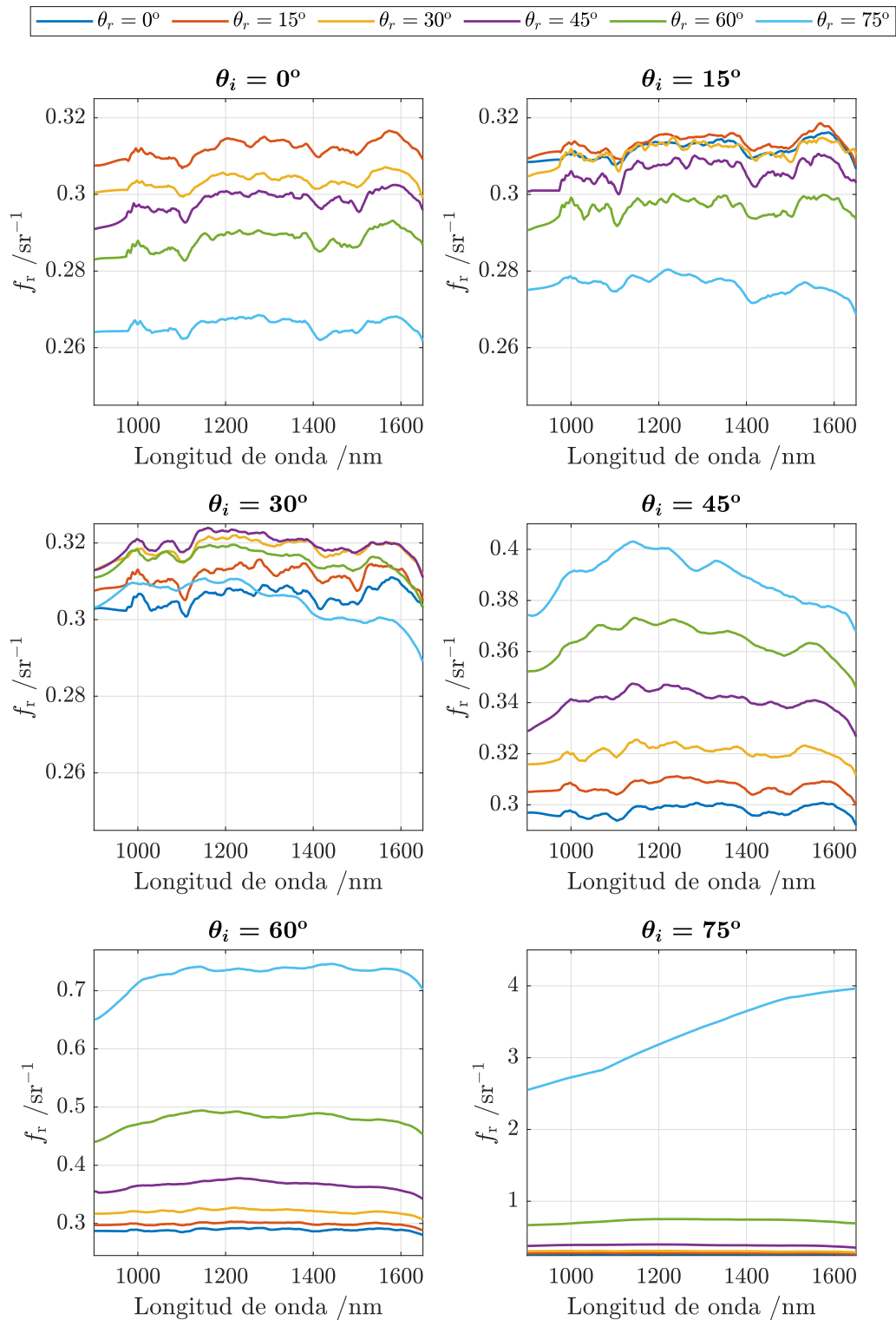


Figura 5.3: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AH14.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

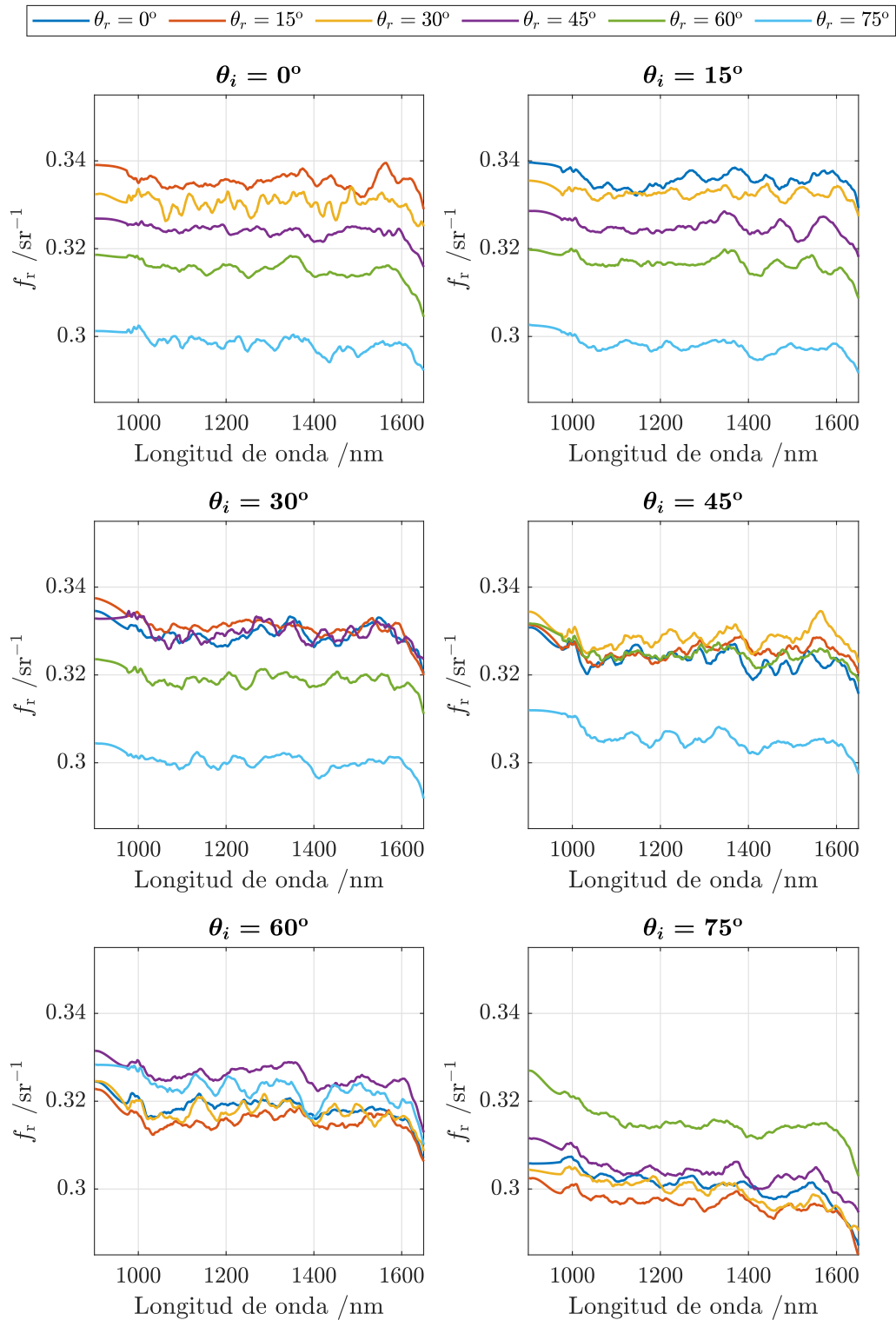


Figura 5.4: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AW1.

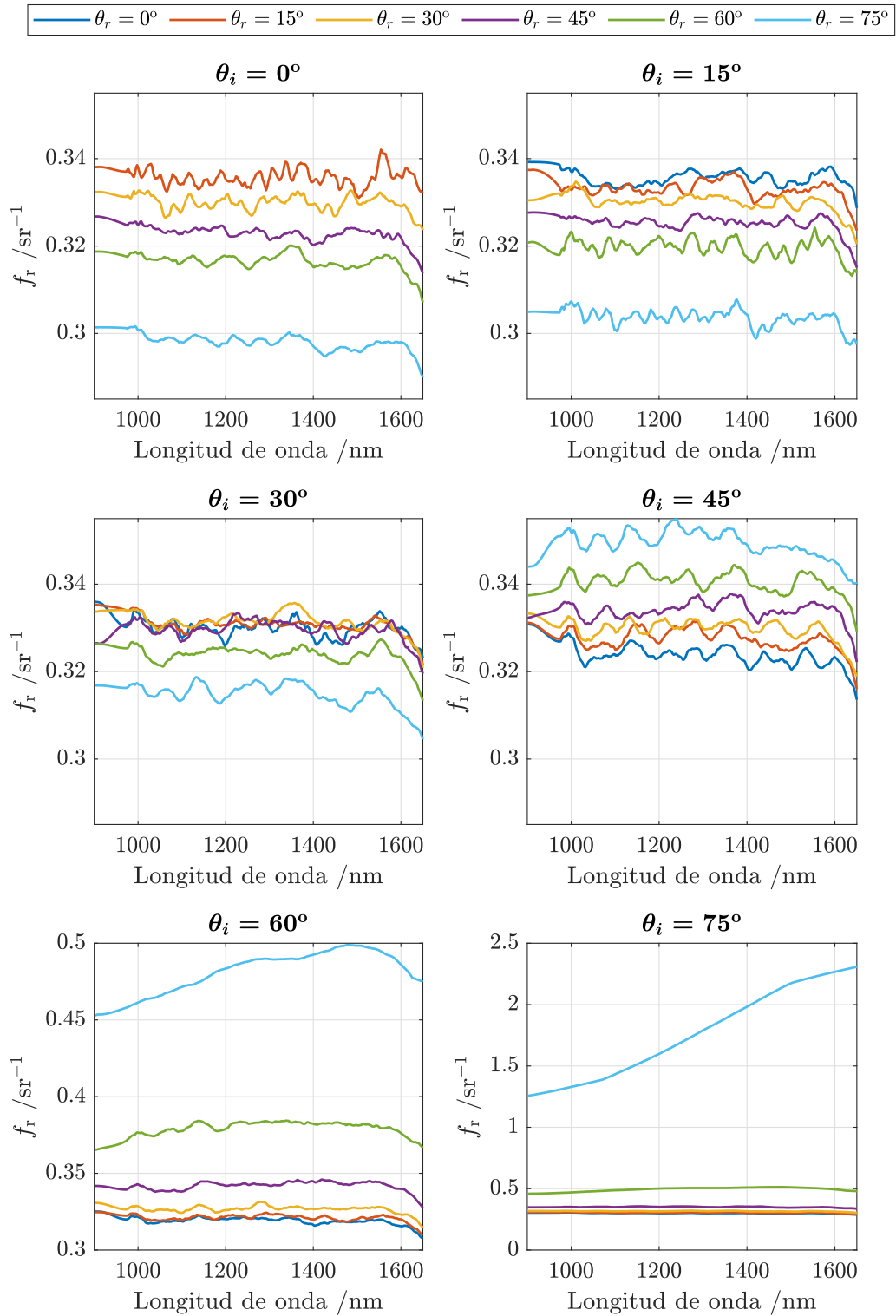


Figura 5.5: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AW1.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

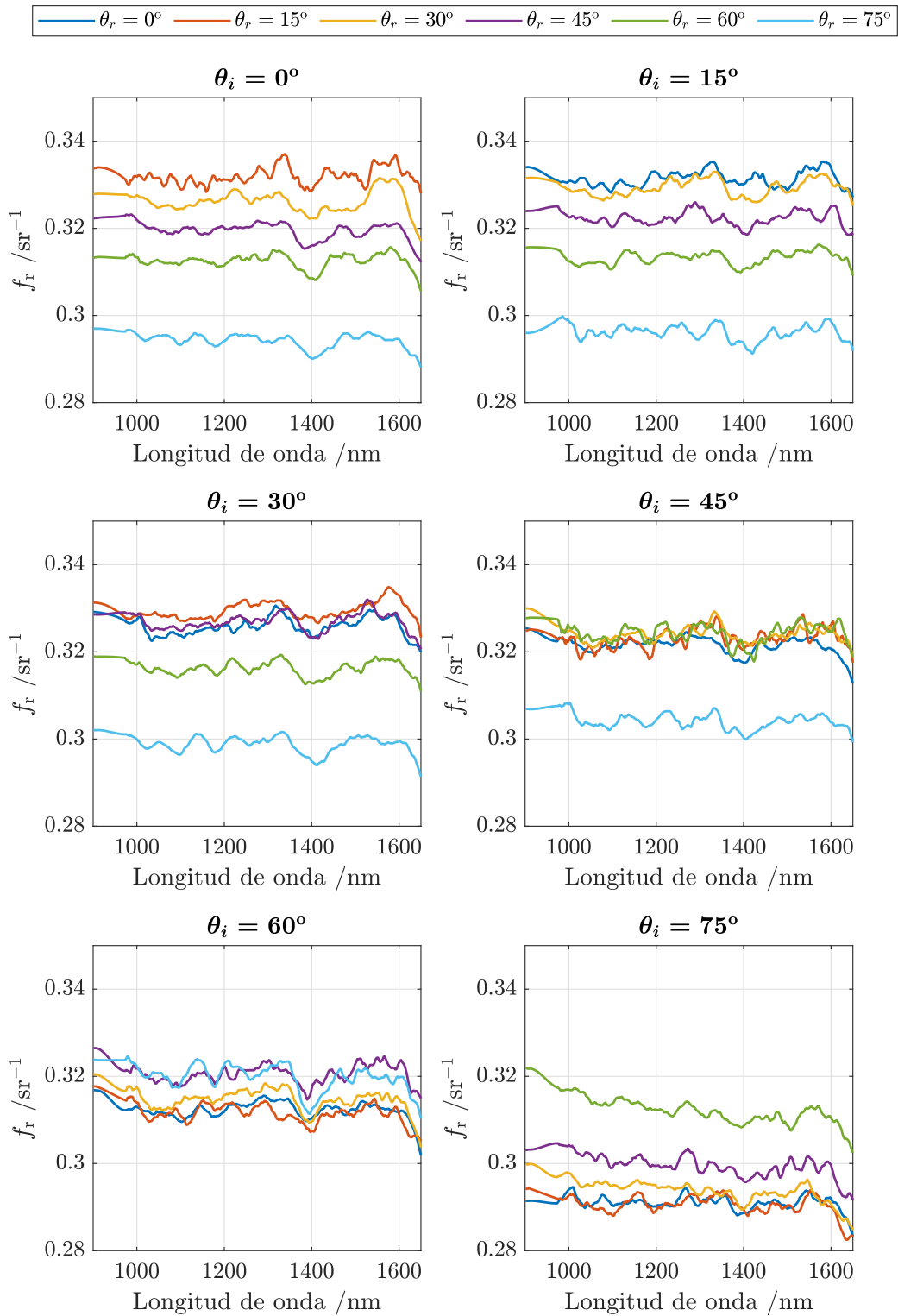


Figura 5.6: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón AW2.

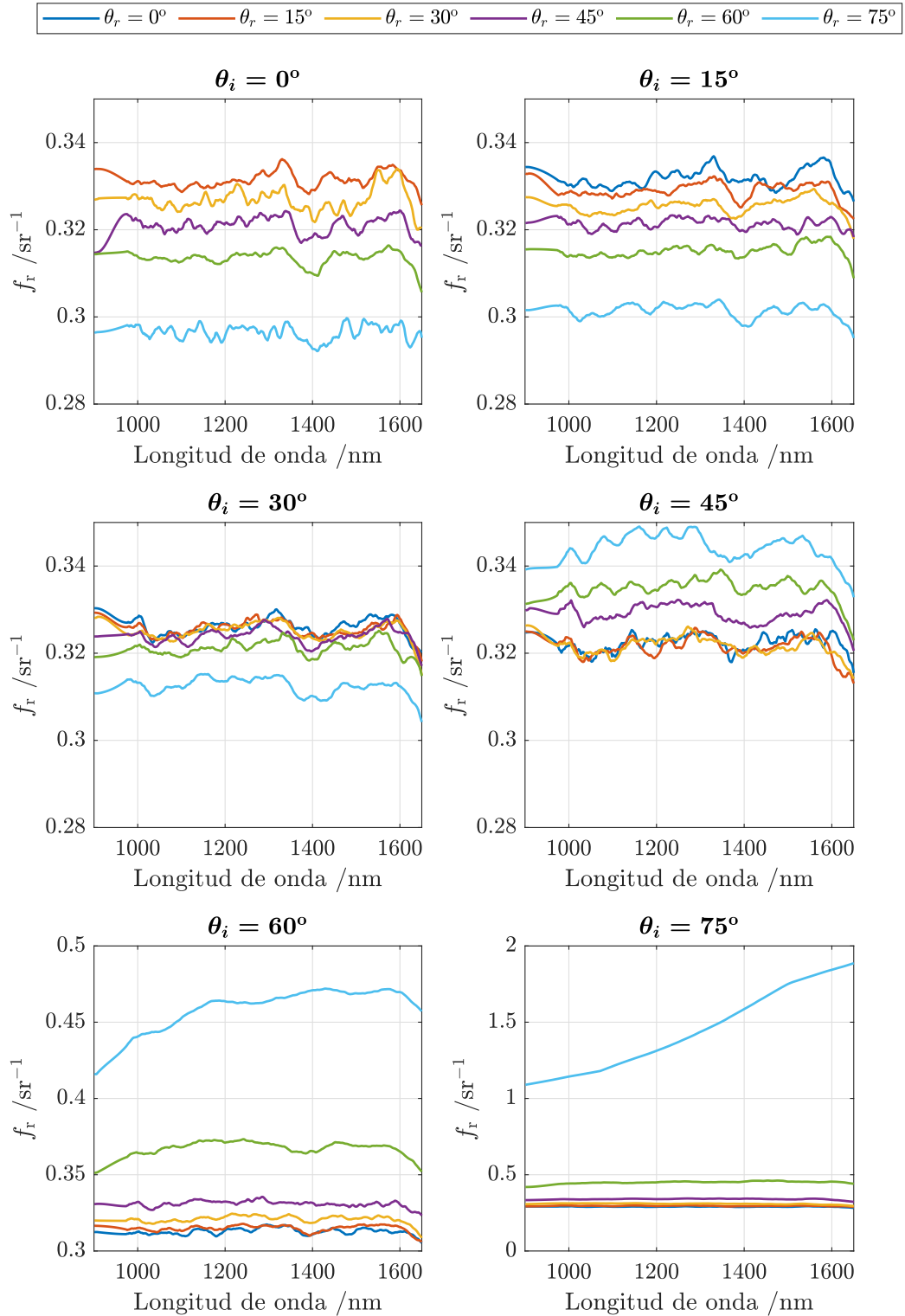


Figura 5.7: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón AW2.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

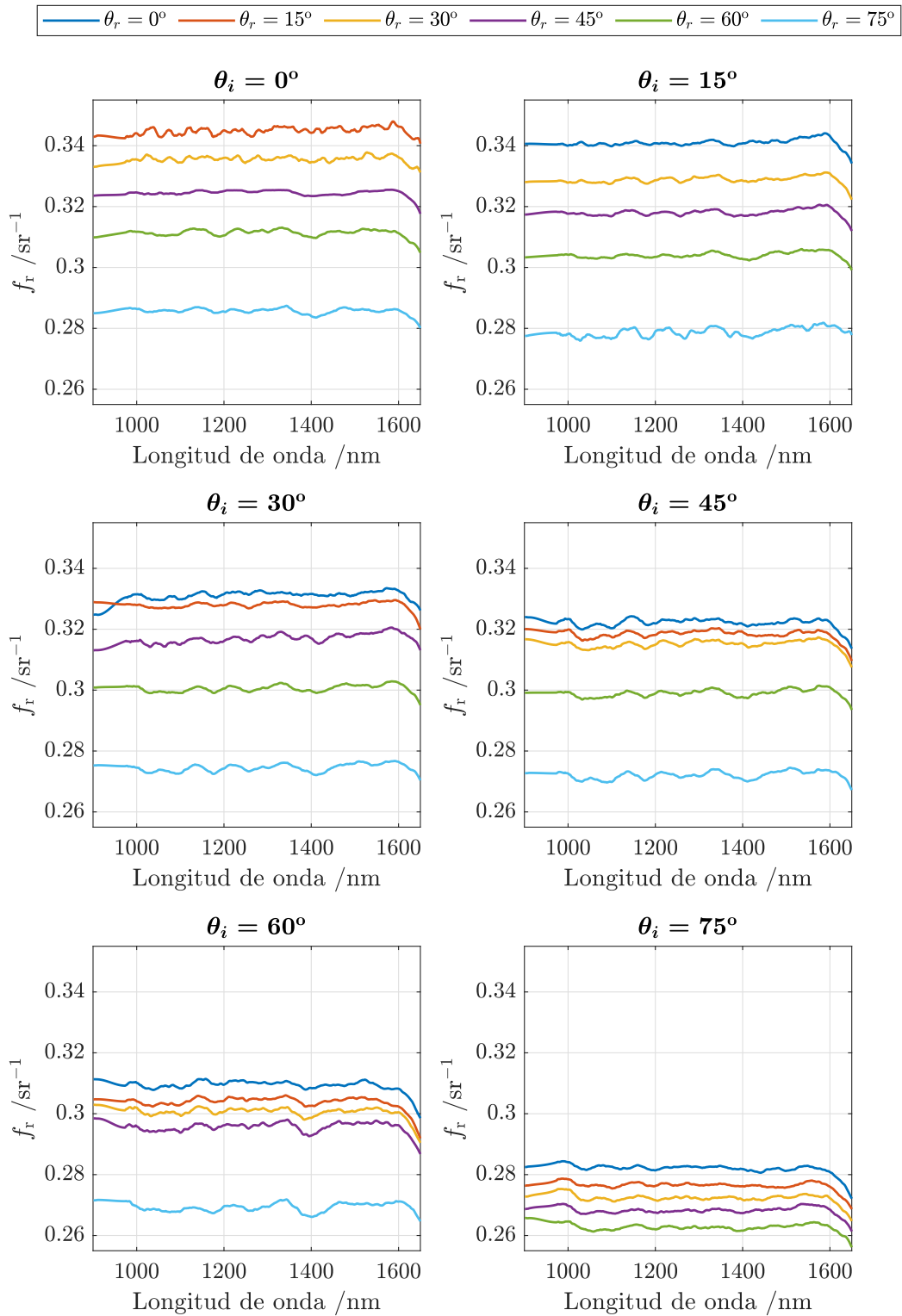


Figura 5.8: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón G97.

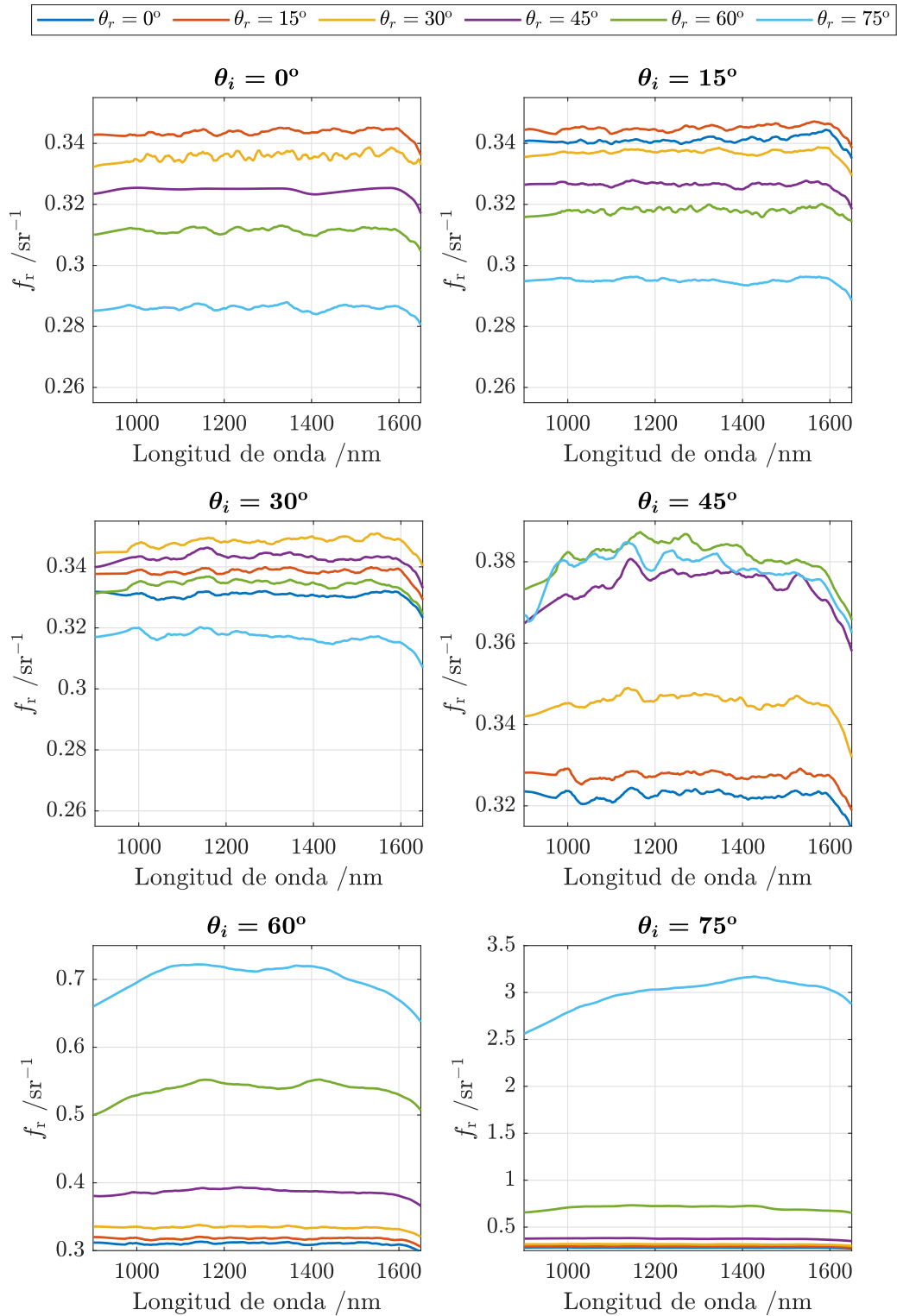


Figura 5.9: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón G97.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

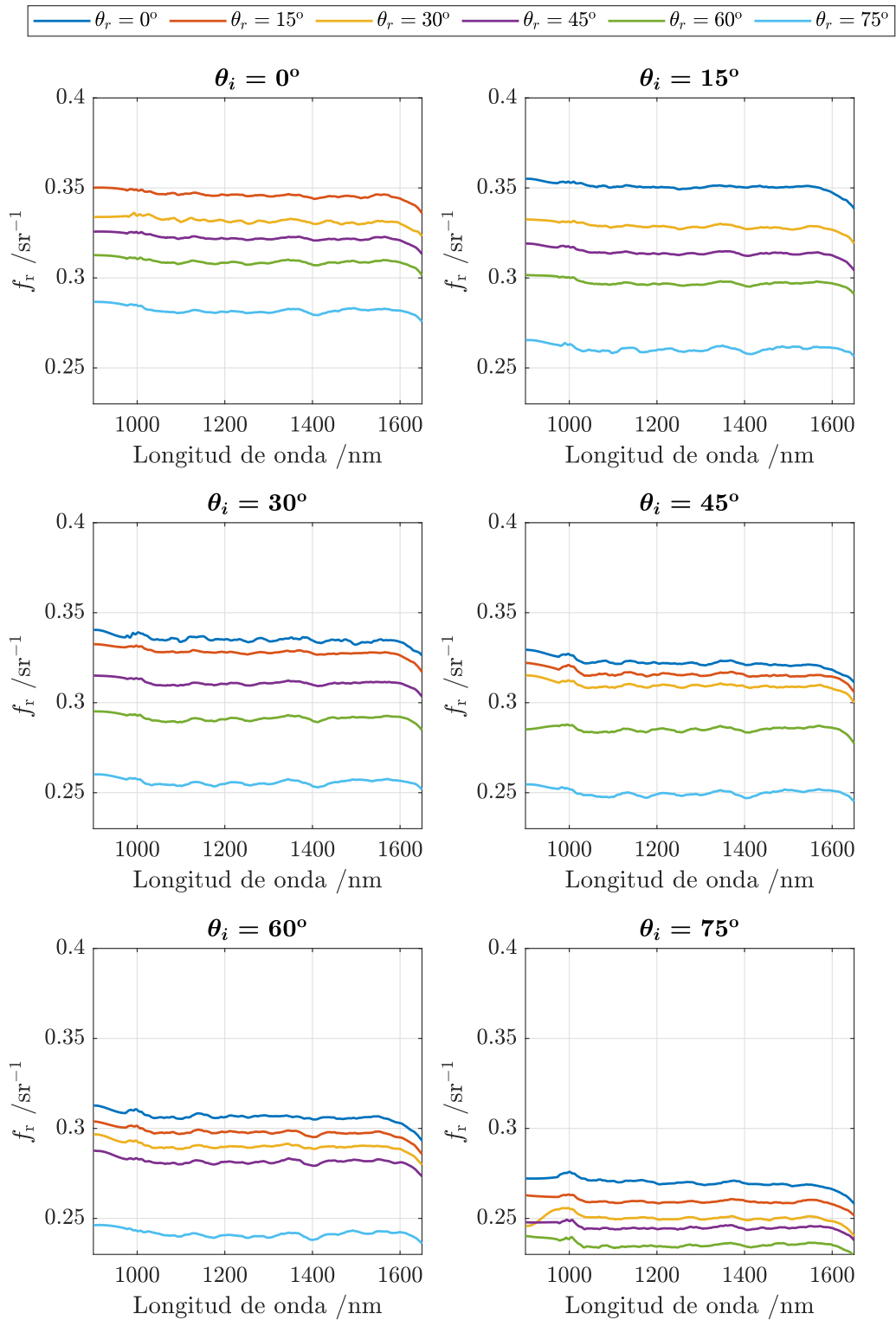


Figura 5.10: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón G97p.

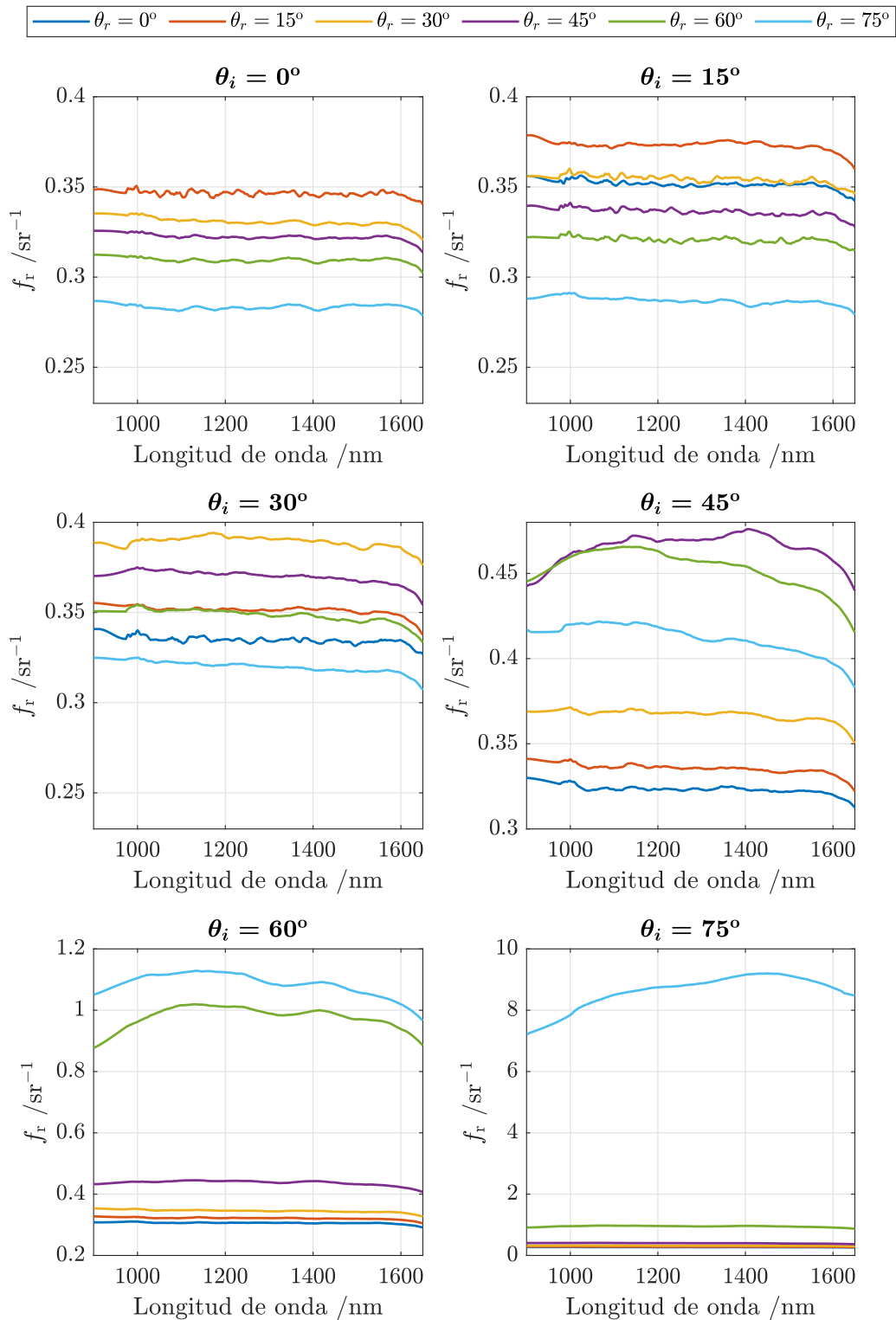


Figura 5.11: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón G97p.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

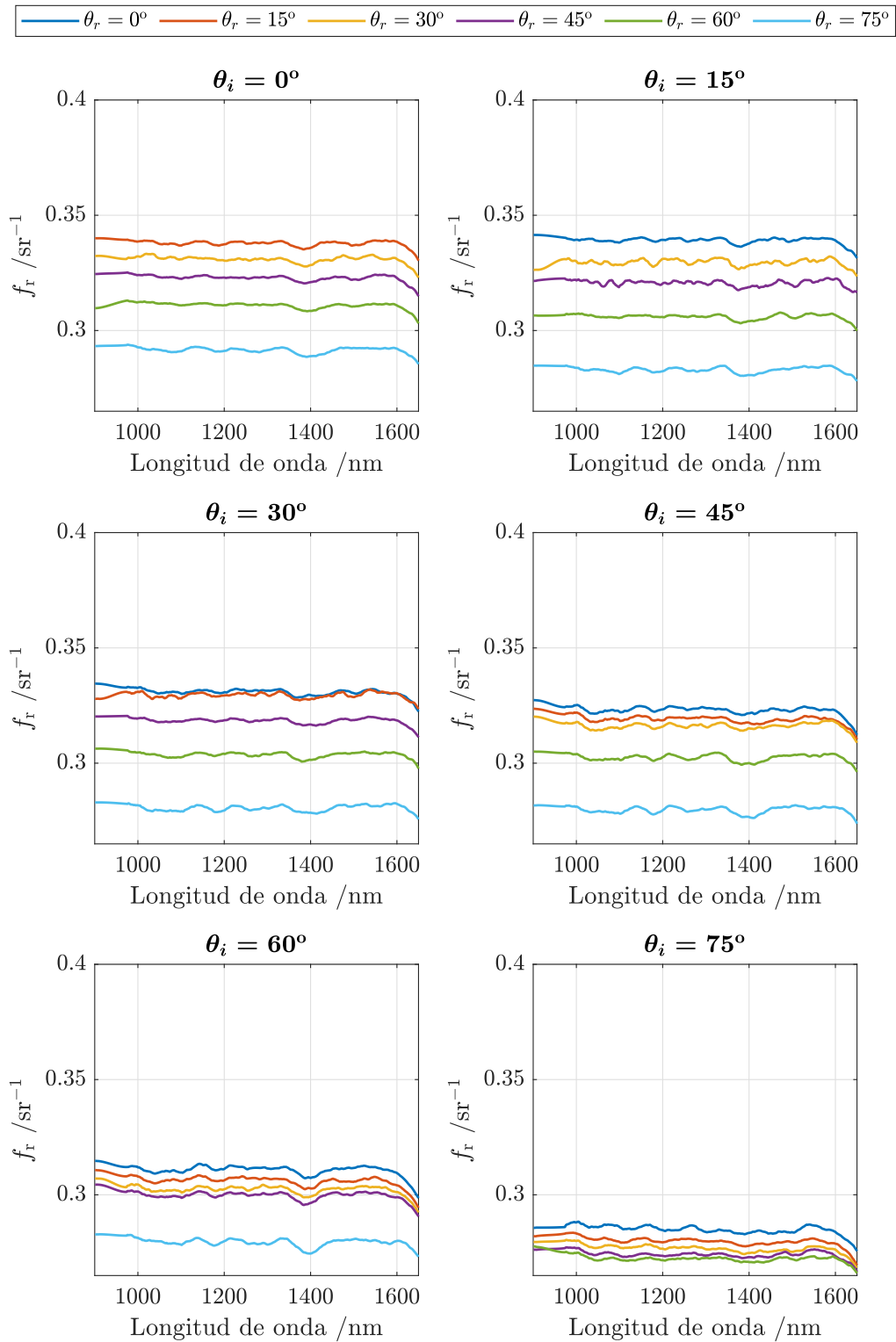


Figura 5.12: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón ZP1.

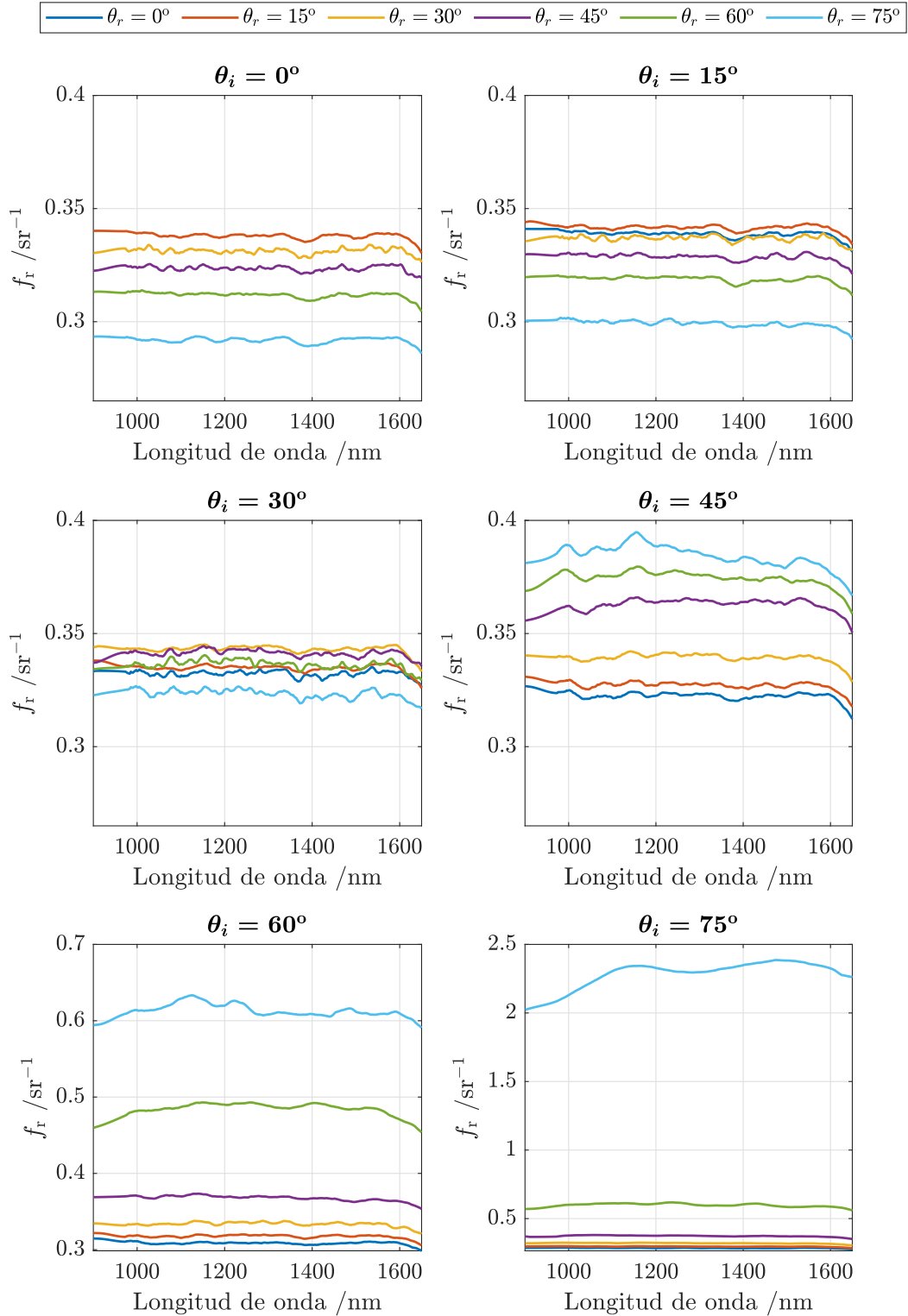


Figura 5.13: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón ZP1.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

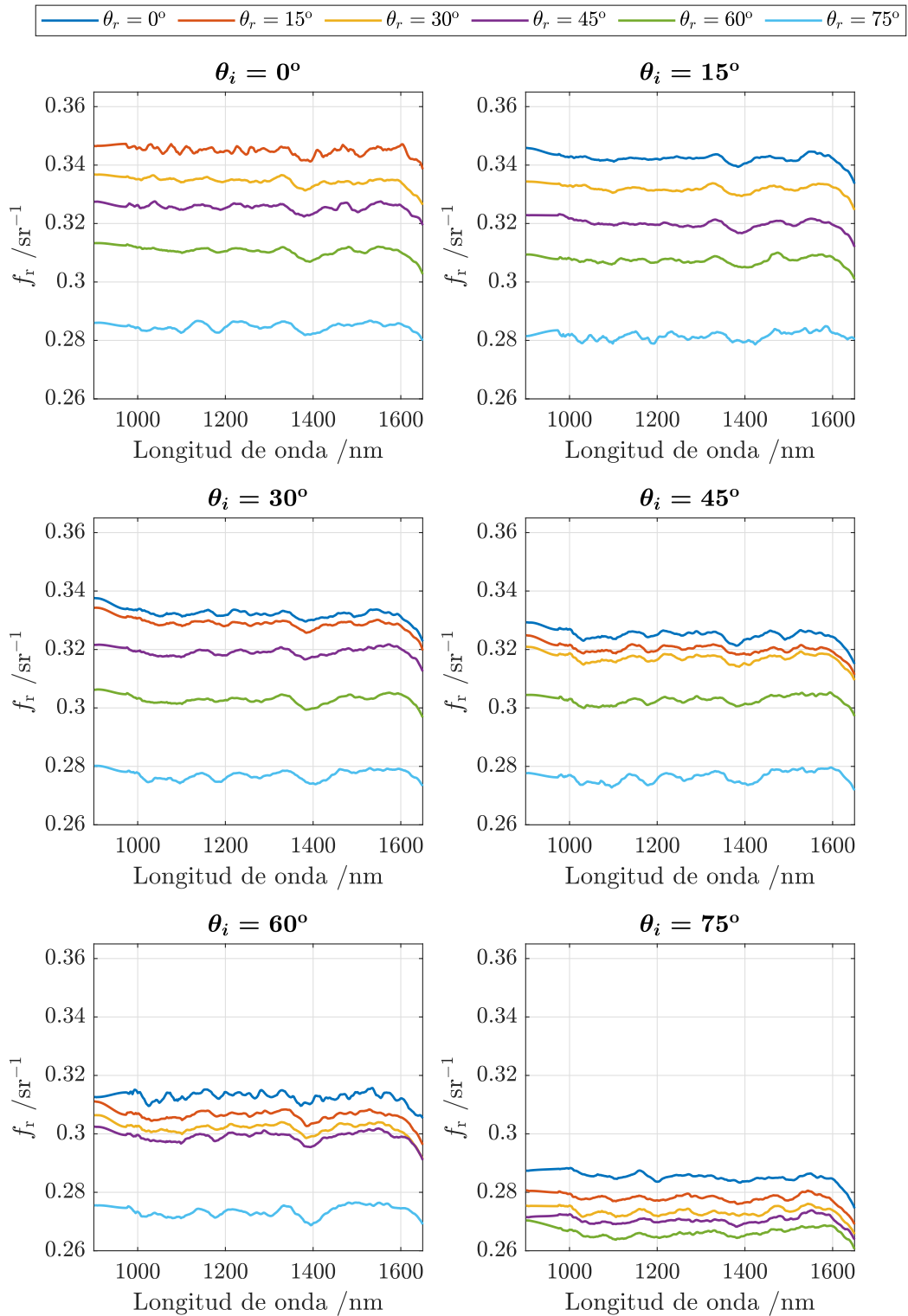


Figura 5.14: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 0^\circ$ y para el patrón ZP2.

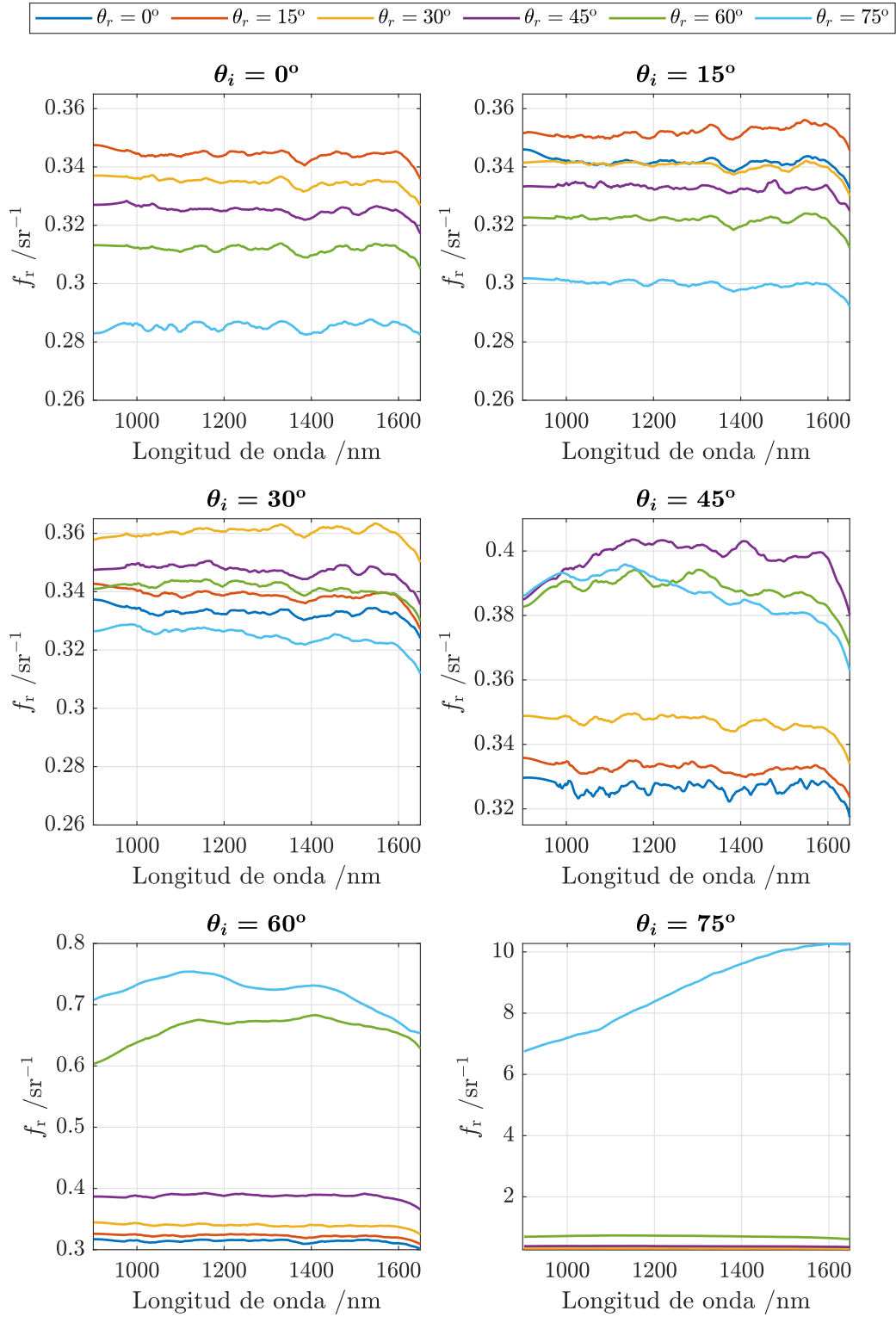


Figura 5.15: BRDF espectral para las geometrías dentro del semiplano de detección determinado por $\phi_r = 180^\circ$ y para el patrón ZP2.

5.1 Dependencia espectral de la BRDF

Tabla 5.1: Índice para las geometrías empleadas en la medida de la BRDF, en función de las direcciones polares y azimutales de incidencia y reflexión. Nótese que la dirección azimutal de incidencia no se indica, ya que tiene un único valor, 0° .

$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	N°Geom. (ϕ_r)		$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	N°Geom. (ϕ_r)		$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	N°Geom. (ϕ_r)	
		0°	180°			0°	180°			0°	180°
0	0	1	7	30	0	25	31	60	0	49	55
	15	2	8		15	26	32		15	50	56
	30	3	9		30	27	33		30	51	57
	45	4	10		45	28	34		45	52	58
	60	5	11		60	29	35		60	53	59
	75	6	12		75	30	36		75	54	60
15	0	13	19	45	0	37	43	75	0	61	67
	15	14	20		15	38	44		15	62	68
	30	15	21		30	39	45		30	63	69
	45	16	22		45	40	46		45	64	70
	60	17	23		60	41	47		60	65	71
	75	18	24		75	42	48		75	66	72

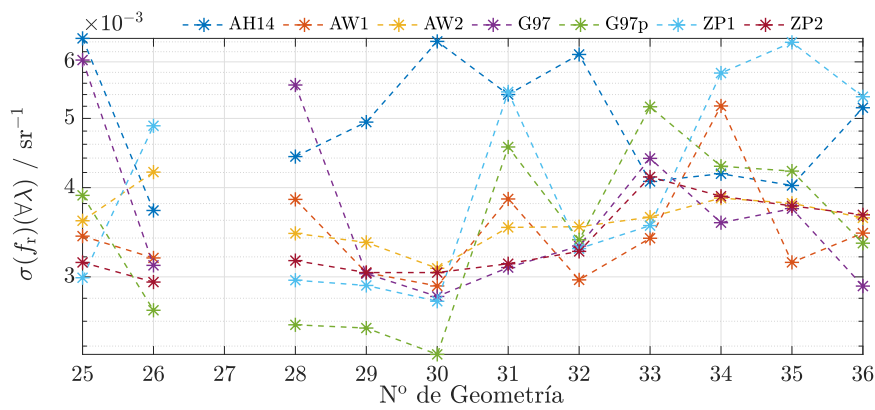


Figura 5.16: Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 30^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.

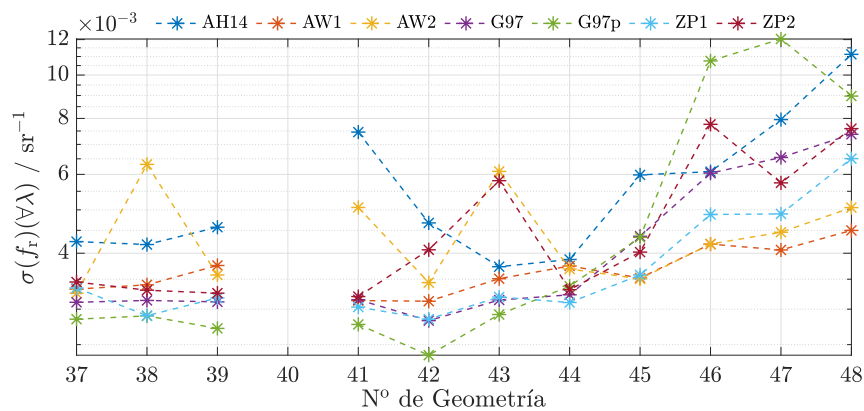


Figura 5.17: Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 45^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.

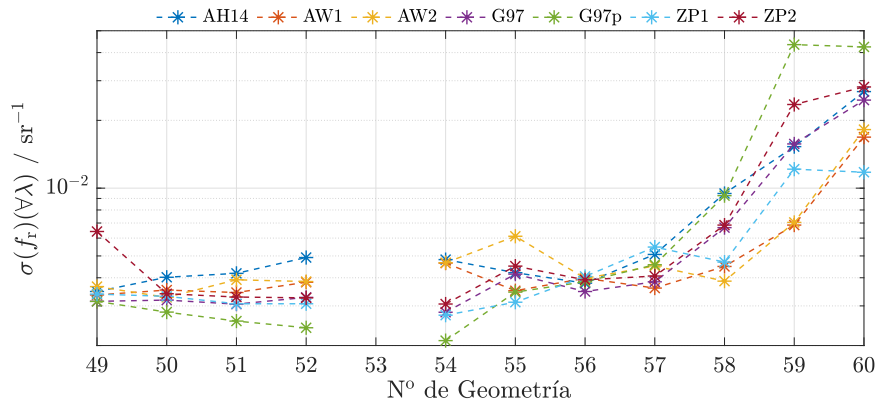


Figura 5.18: Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 60^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.

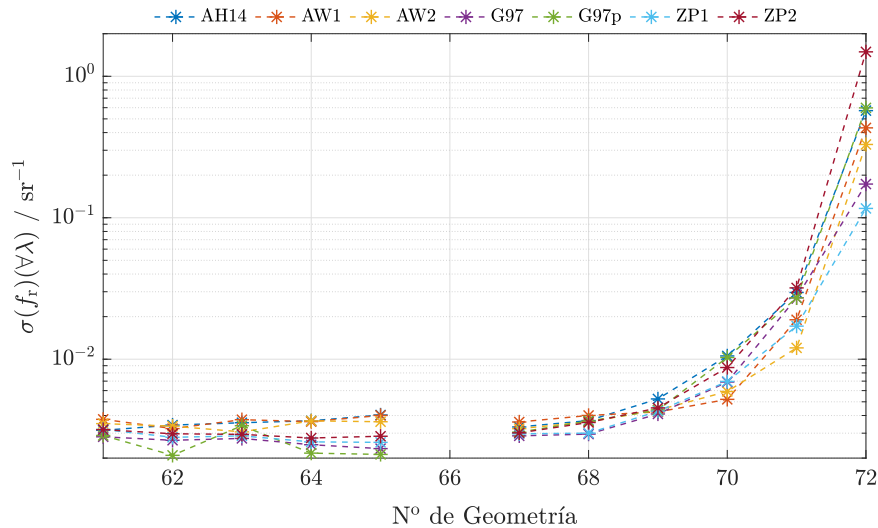


Figura 5.19: Desviación estándar de la media espectral de cada distribución de BRDF para la totalidad de las geometrías correspondientes a $\theta_i = 75^\circ$. Cada color corresponde a uno de los patrones medidos.

En la Figura 5.17 y para geometrías cercanas a la condición especular (número de geometría 46, véase la Tabla 5.1), el valor de desviación típica máximo observado alcanza el doble con respecto al visto para todas las geometrías anteriores (aproximadamente 10^{-2}). Para la Figura 5.18 la desviación típica de los valores espectrales para la geometría especular (número de geometría 59) aumenta cuatro veces con respecto al valor máximo alcanzado en las geometrías previas. Para la Figura 5.19 el valor máximo para la desviación típica aumenta en torno a dos órdenes de magnitud para la posición especular (número de geometría 72) con respecto al valor de la tendencia general. Esto indica que para geometrías cercanas a la especular o la propia especular, la forma de la distribución espectral cambia.

Este cambio se analiza empleando las Figuras 5.2-5.15, como se indicó al principio de este apartado. Para las geometrías cercanas a la especular en las figuras pares, las

5.2 Dependencia angular de la BRDF

que comprenden el semiplano de detección $\phi_r = 180^\circ$, se observa una diferencia en la distribución de la BRDF espectral en la que, de forma general, a mayor θ_i , especialmente para valores por encima de $\theta_i = 45^\circ$, los valores de BRDF para longitudes de onda medias aumentan en mayor medida con respecto a los valores para longitudes de onda cortas y largas. Dicho de otra manera, se produce un abombamiento de la distribución espectral de manera convexa.

También se observa en estas figuras que la BRDF espectral es más ruidosa para las muestras AH14, AW1 y AW2, especialmente para las dos últimas. Esto tiene relación con el material de fabricación, ya que con el resto de muestras fabricadas con PTFE sucede en menor medida. Por tanto, las muestras de PTFE son espectralmente más neutras que el resto de muestras. A la vista de los resultados se concluye que las muestras son espectralmente neutras, es decir no varían mucho con la longitud de onda, exceptuando las geometrías especulares o cercanas a la especular para valores de $\theta_i > 45^\circ$.

A lo largo de las Figuras 5.2-5.15 se puede observar que la reflectancia para las muestras fabricadas a partir de vidrio de alúmina es la mejor si atendemos al semiplano de detección definido por $\phi_r = 0^\circ$. Las siguientes muestras con mayor reflectancia son las cuatro muestras de PTFE, y por último AH14. Con respecto al semiplano de detección restante ($\phi_r = 180^\circ$) las que más reflejan la radiación infrarroja son las cuatro muestras de PTFE, seguidas de las de vidrio de alúmina (hasta valores no muy tangenciales a la muestra) y por último AH14.

5.2. Dependencia angular de la BRDF

Debido a que la BRDF espectral observada en el apartado anterior se mantiene aproximadamente constante para la mayoría de las geometrías de medida, es decir, la BRDF no cambia significativamente con la longitud de onda, se deja constante la longitud de onda (1300 nm) para representar la distribución angular de la BRDF. En las Figuras 5.20 a 5.25 se representan las distribuciones angulares de BRDF de cada patrón medido. En cada representación se incluyen los valores de BRDF para todas las muestras. Cada figura se corresponde a un valor de θ_i , y recoge todas las geometrías incluidas dentro de los dos semiplanos de detección, es decir, todos los valores de θ_r por cada θ_i . En el eje de abscisas de cada representación, los valores negativos para el ángulo polar de reflexión se corresponden con el semiplano de detección que comprende las geometrías de retroreflexión ($\phi_r = 0^\circ$), mientras que los positivos se corresponden con el semiplano de detección que comprende las geometrías especulares ($\phi_r = 180^\circ$). Como en las figuras anteriores, no hay valor en la geometría de retroreflexión porque no se ha medido en ellas. En las figuras se representa el valor del difusor perfecto por reflexión, PRD, como referencia para la comparación con los patrones medidos. La incertidumbre expandida de la BRDF se muestra para cada geometría mediante las barras de error, con un factor de cobertura $k = 2$.

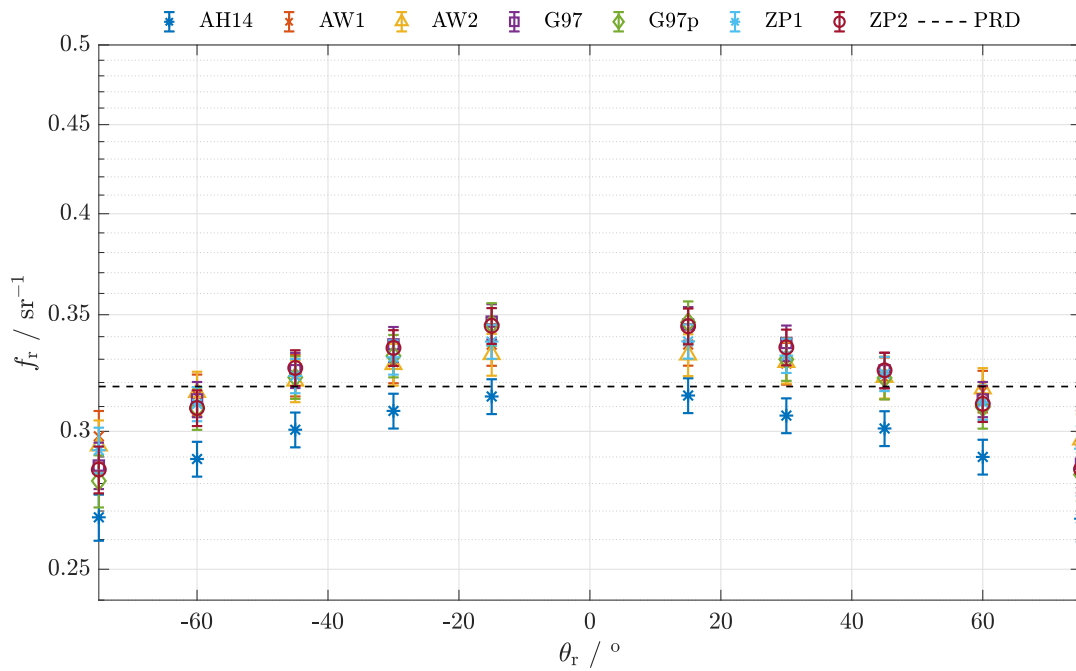


Figura 5.20: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 0^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

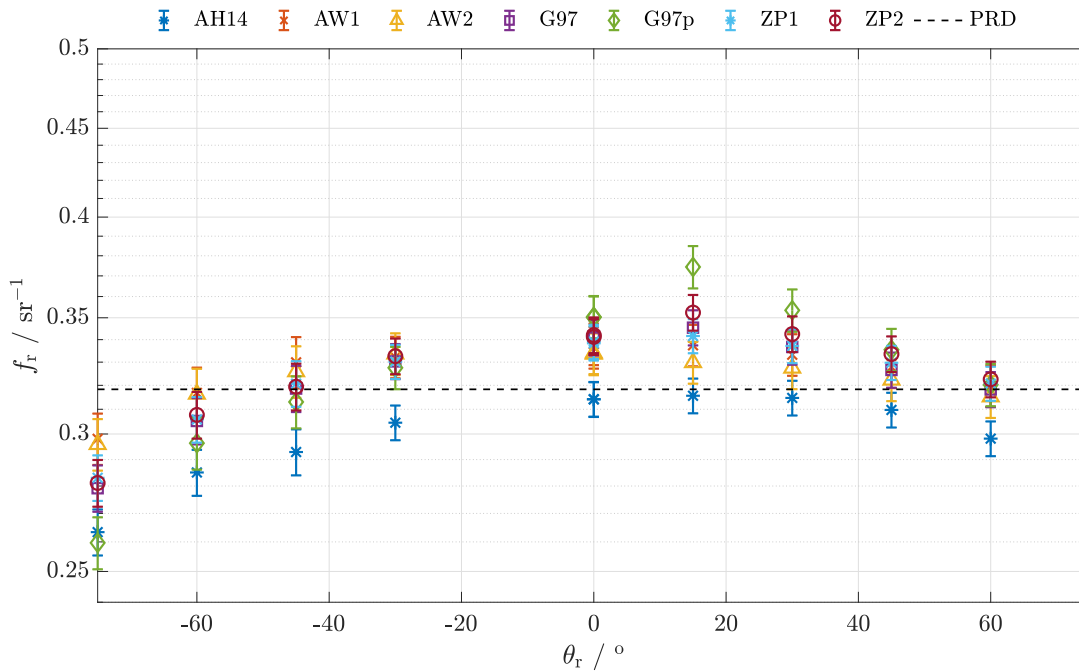


Figura 5.21: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 15^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

5.2 Dependencia angular de la BRDF

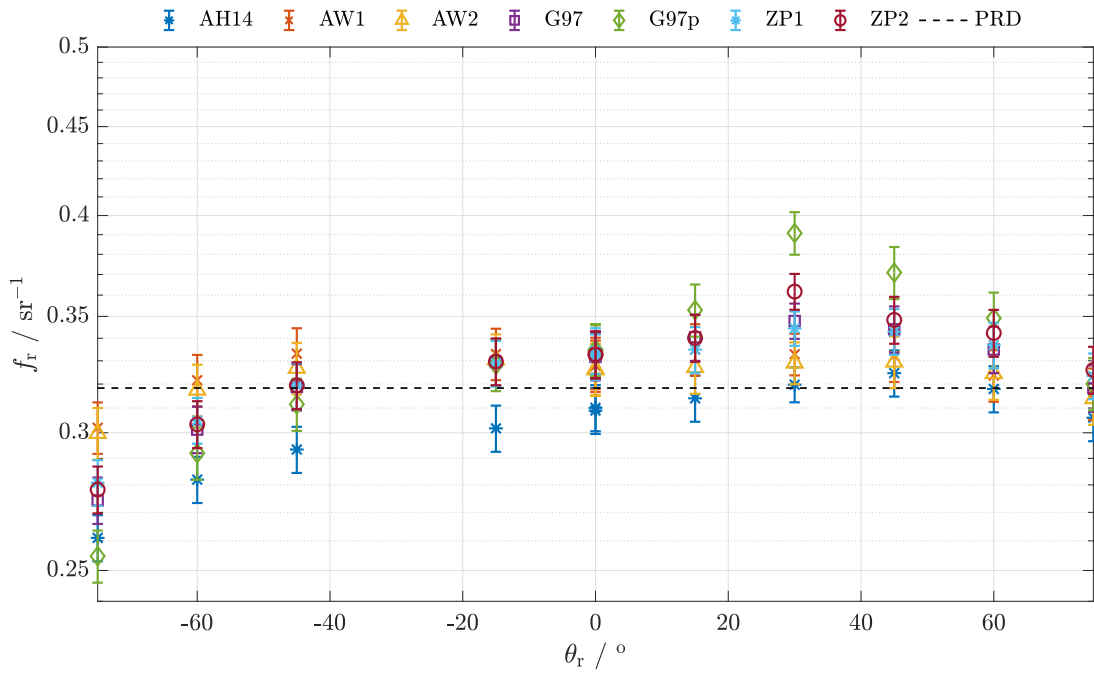


Figura 5.22: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 30^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

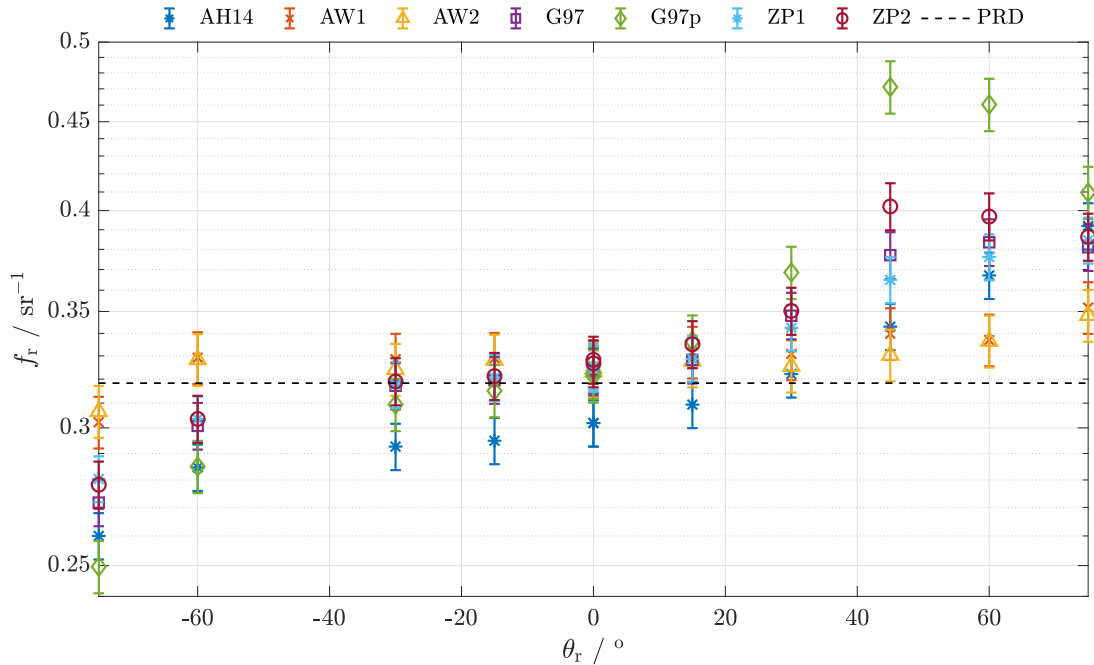


Figura 5.23: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 45^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

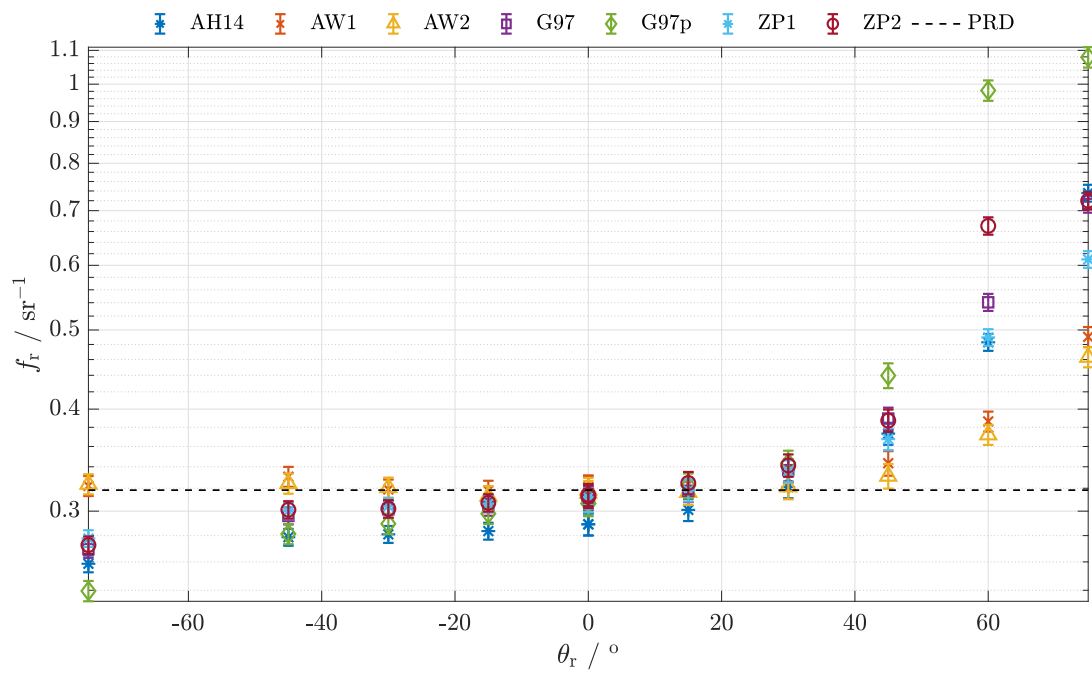


Figura 5.24: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 60^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

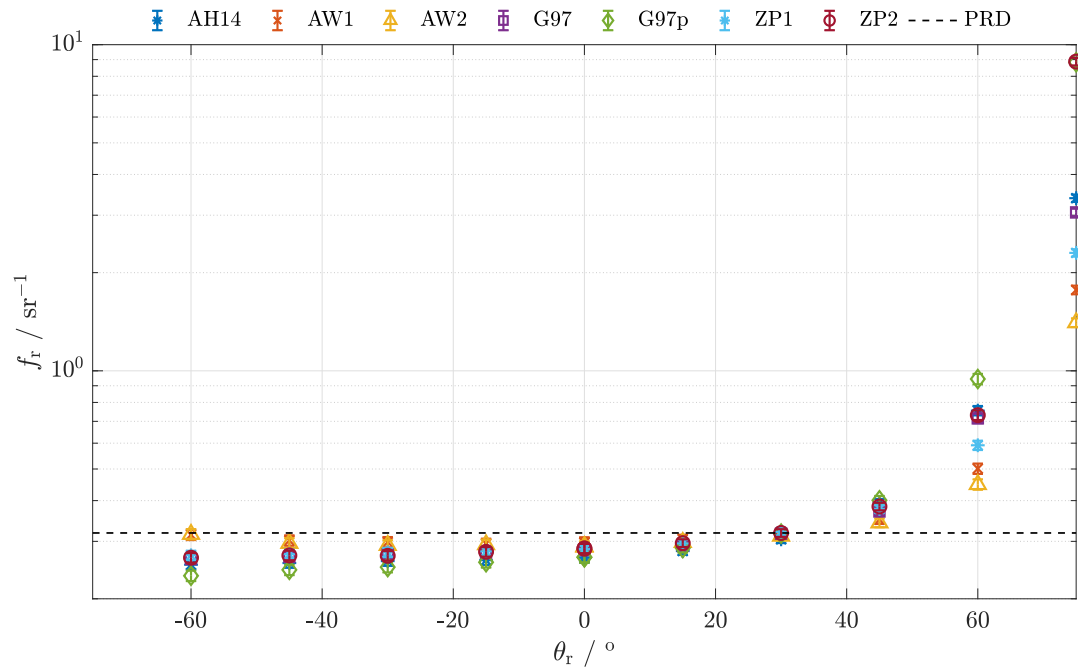


Figura 5.25: Distribución angular de la BRDF para la longitud de onda 1300 nm y la dirección polar de incidencia $\theta_i = 75^\circ$. Se incluyen en la representación todos los patrones medidos, cada uno con un color. En las barras de error se muestra la incertidumbre expandida $k = 2$ de la BRDF.

5.2 Dependencia angular de la BRDF

En las figuras 5.20 a 5.22, en las que el ángulo de incidencia es 0° , 15° y 30° , respectivamente, la distribución angular tiene forma convexa, cuyo ápex es para todos los casos la geometría especular. A mayor θ_i , la BRDF empieza a crecer para los ángulos mayores cuando el ángulo de incidencia es mayor a 45° . En la Figura 5.25, que corresponde al ángulo de incidencia mayor, se observa el comportamiento típico del aumento de la BRDF en los ángulos de detección rasantes. Nótese que la escala de ordenadas para las Figuras 5.24 y 5.25 es diferente a la de las figuras anteriores debido al aumento drástico del valor de BRDF.

El comportamiento angular para la muestra G97p se diferencia del resto de muestras, ya que se observan valores más altos de BRDF en geometrías cercanas a la especular con respecto al resto de patrones y más bajos cuanto más se aleja de esta geometría con respecto al resto de patrones. A lo largo de las representaciones, este comportamiento también se observa para ZP2, pero de forma menos acusada. En base a esto, se puede decir que estas dos muestras son menos lambertianas que el resto. Por otra parte, las distribuciones angulares en cada figura para AW1 y AW2 son las menos convexas, por lo que se puede decir que son más lambertianas que el resto. Los patrones restantes tienen un comportamiento intermedio entre las parejas mencionadas.

Para categorizar de manera más clara el comportamiento angular de las muestras y clasificarlas en función del grado de lambertianidad se calculó la desviación típica de los valores de BRDF para la longitud de onda de 1300 nm de las geometrías correspondientes a cada ángulo de incidencia. Por tanto, las muestras más lambertianas serán las que presenten una menor desviación entre los valores de BRDF de cada conjunto geométrico. Dicha variación, para cada valor de θ_i de forma independiente, se expresa en la Tabla 5.2. Para dar un valor conjunto de desviación angular, se calculó el índice de no-lambertianidad, indicado en dicha tabla como i_{nlb} , y obtenido como el promedio de los valores de desviación estándar de cada θ_i .

Tabla 5.2: Desviación típica de la BRDF a la longitud de onda de 1300 nm para el conjunto de geometrías correspondientes a cada ángulo de incidencia θ_i , así como el índice de no-lambertianidad, definido como la desviación típica de los valores anteriores.

$\theta_i/^\circ$	$\sigma(\langle f_r \rangle) / \text{sr}^{-1}$						
	AH14	AW1	AW2	G97	G97p	ZP1	ZP2
0	0.1166	0.1255	0.1249	0.1270	0.1258	0.1255	0.1265
15	0.0880	0.0947	0.0936	0.0950	0.0990	0.0948	0.0960
30	0.0894	0.0946	0.0936	0.0959	0.1019	0.0957	0.0974
45	0.0981	0.0959	0.0951	0.1022	0.1214	0.1008	0.1053
60	0.1692	0.1114	0.1065	0.1677	0.3090	0.1414	0.1856
75	0.9060	0.4392	0.3379	0.8110	2.4684	0.5927	2.4785
i_{nlb}	0.2445	0.1602	0.1419	0.2331	0.5376	0.1918	0.5149

De entre todos los patrones evaluados, G97_p presenta el índice de no lambertianidad más alto, como fue comentado previamente. Esto guarda relación con la degradación de esta muestra, como se evidencia al comparar su índice de no lambertianidad con el de la muestra G97, del mismo modelo. ZP2 es el segundo patrón menos lambertiano, de manera contraria a como cabría esperar, debido a que la muestra se adquirió recientemente y está en buenas condiciones físicas. Su índice de no lambertianidad es mayor que el de ZP1, cuya diferencia se evidencia especialmente para $\theta_r = 75^\circ$. AH14 y G97 tienen un índice similar, inferior a las muestras mencionadas, aunque para la primera el índice de no lambertianidad es el más bajo de entre todas las muestras para valores de $\theta_r < 45^\circ$. A continuación ZP1 presenta un índice más bajo que las dos anteriores. Esto era esperable ya que ZP1 fue adquirida recientemente y por tanto la deriva en sus propiedades ha sido menor y se ha usado en menos ocasiones. Por último, AW1 y AW2 son los patrones con la menor variación angular del conjunto de muestras, por lo que son las que distribuyen la radiación reflejada en el espacio de manera más homogénea. De entre las dos, AW2 es el patrón con el índice de no-lambertianidad más bajo.

5.3. Validación de los resultados

5.3.1. Principio de reciprocidad de Helmholtz

La reciprocidad de la luz fue mencionada por primera vez por Helmholtz [46] en 1867; y desde entonces, a través de distintas caracterizaciones [47] [48], se ha comprobado que dicho comportamiento se cumple para cualquier material bajo estudio. Este principio enuncia que la BRDF (f_r) no cambia cuando las direcciones de incidencia y detección son intercambiadas:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda) = f_r(\theta'_i, \phi'_i; \theta'_s, \phi'_s; \lambda), \quad (5.3)$$

para la condición: $\theta'_i = \theta_s$, $\phi'_i = \phi_s$, $\theta'_s = \theta_i$ y $\phi'_s = \phi_i$. Para visualizar este comportamiento se ha calculado la diferencia normalizada (D_n), que se obtiene de la siguiente manera:

$$D_n = \frac{|f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda) - f_r(\theta'_i, \phi'_i; \theta'_s, \phi'_s; \lambda)|}{\sqrt{U^2(f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s; \lambda)) + U^2(f_r(\theta'_i, \phi'_i; \theta'_s, \phi'_s; \lambda))}}. \quad (5.4)$$

Los valores de esta diferencia normalizada se muestran en las Figuras 5.28 a 5.32 para todas las configuraciones recíprocas medidas y para cada uno de los patrones de reflectancia caracterizados.

Las posiciones angulares recíprocas elegidas fueron $0^\circ:15^\circ$, $0^\circ:30^\circ$, $0^\circ:45^\circ$, $0^\circ:60^\circ$, $0^\circ:75^\circ$ y sus correspondientes geometrías análogas.

5.3 Validación de los resultados

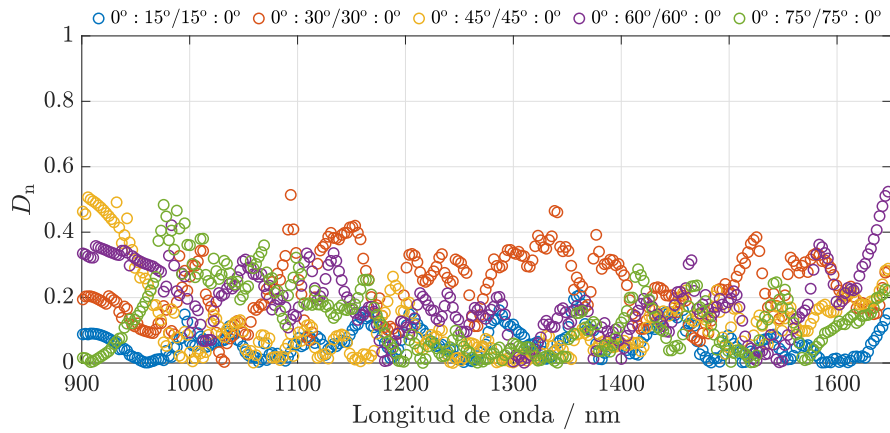


Figura 5.26: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas, y para el patrón AH14.

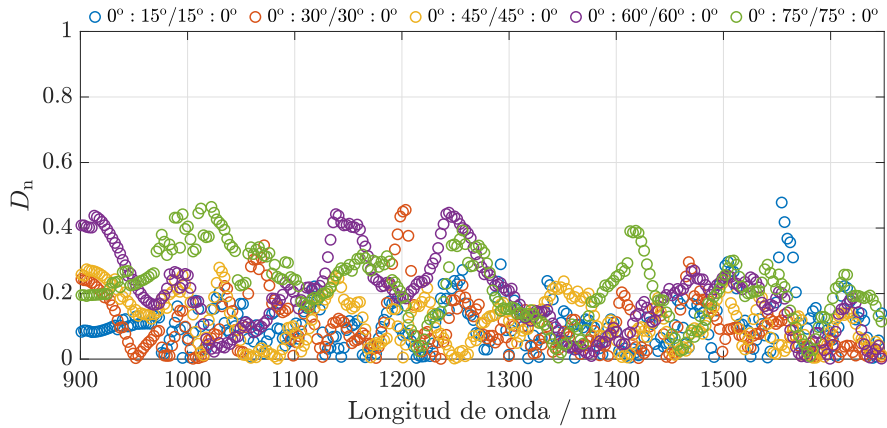


Figura 5.27: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón AW1.

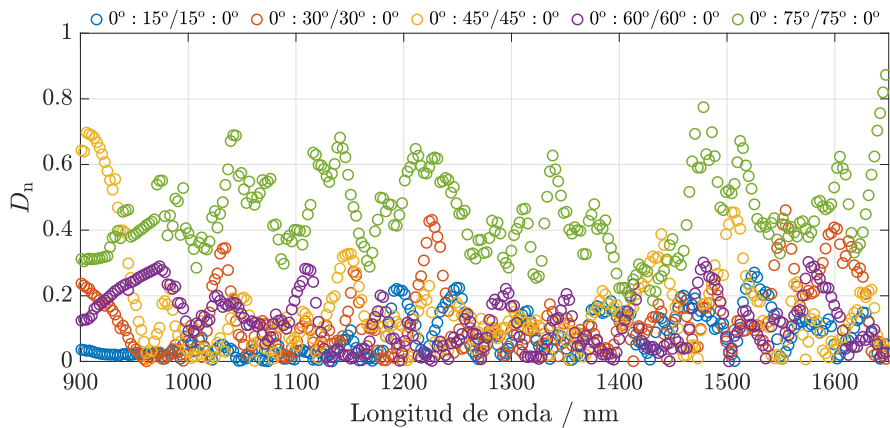


Figura 5.28: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón AW2.

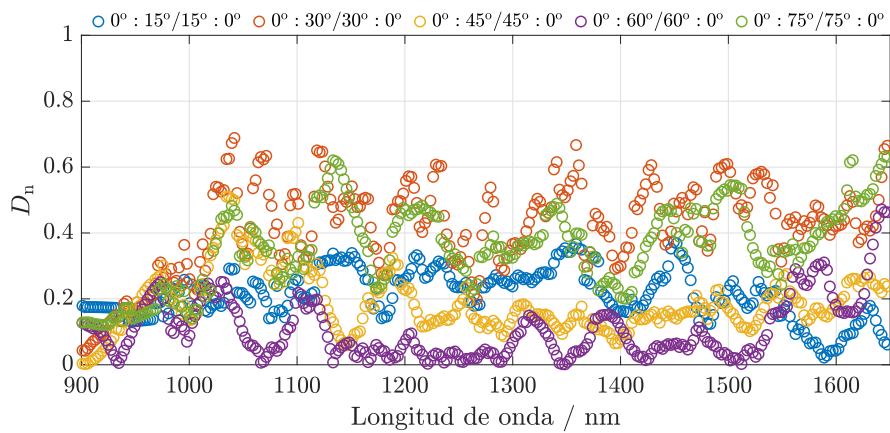


Figura 5.29: Diferencia normalizada en función de λ para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón G97.

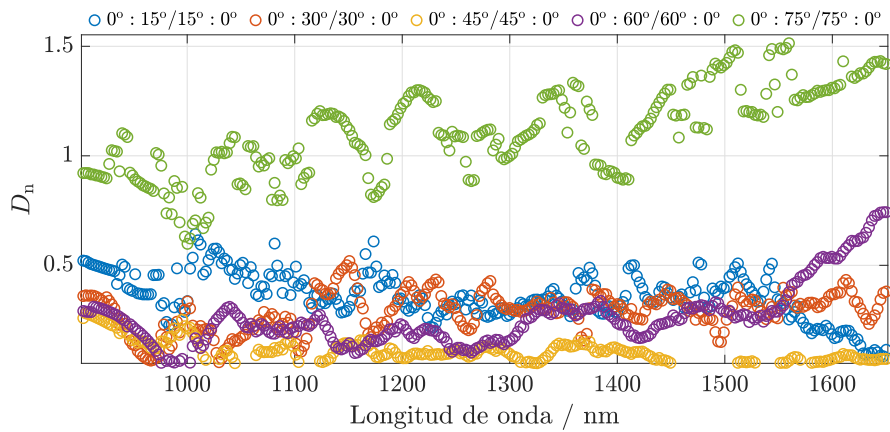


Figura 5.30: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón G97p.

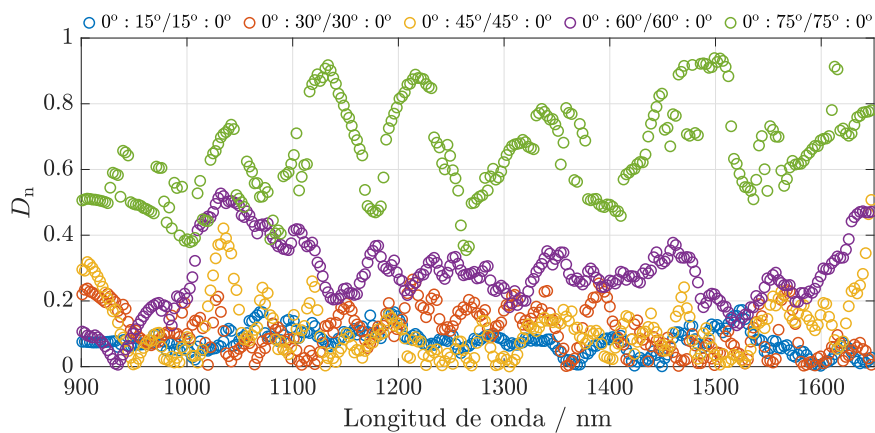


Figura 5.31: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón ZP1.

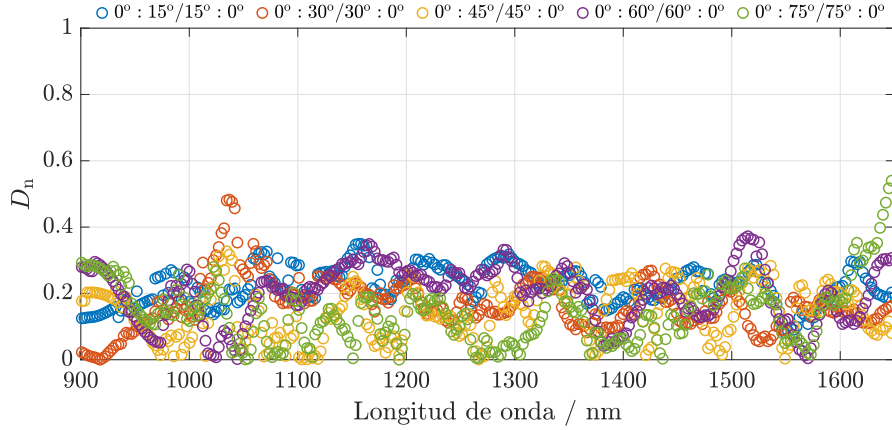


Figura 5.32: Diferencia normalizada en función de la longitud de onda para 5 configuraciones recíprocas identificadas con un color diferente cada una de ellas y para el patrón ZP2.

Como se puede observar en todas las figuras, el valor está entre 0 y 1, salvo para la configuración de reciprocidad $0^\circ:75^\circ/75^\circ:0^\circ$ y la muestra G97p. Esto está relacionado con el deterioro de la muestra, como ha sido comentado durante este escrito. Si el valor del error normalizado está entre 0 y 1 se dice que las diferencias en el valor de BRDF entre las geometrías recíprocas es despreciable frente a su correspondiente incertidumbre.

5.3.2. Cálculo de la reflectancia $0^\circ:d$

El factor de reflectancia $0^\circ:d$, incluyendo la componente especular, que es un caso particular del cálculo de la reflectancia direccional-hemisférica en el que el ángulo polar que determina la dirección de incidencia es 0° con respecto a la superficie de medida, se emplea como segundo método de validación para los resultados de la BRDF. El factor de reflectancia direccional-hemisférica se calcula a partir de los valores individuales de reflectancia de la función de distribución de reflectancia bidireccional mediante la integración angular en el hemisferio cuyo centro coincide con el origen de coordenadas del plano de la muestra. La ecuación que se emplea para calcular este factor de reflectancia según el documento de referencia empleado para las consideraciones geométricas y nomenclatura para la reflectancia [1] es:

$$R(\lambda) = \int_{2\pi} f_r(\theta_r, \phi_r; \lambda) d\Omega_r = \int_0^{2\pi} d\phi_r \int_0^{\pi/2} d\theta_r f_r(\theta_r, \phi_r; \lambda) \cos \theta_r \sin \theta_r, \quad (5.5)$$

y si se asume isotropía de la muestra y se resuelve mediante la correspondiente sumatoria, la ecuación quedaría:

$$R(\lambda) = 2\pi \sum_{k=1}^{N_g} \cos \theta_{r,k} \sin \theta_{r,k} f_{r,k}(\theta_{r,k}; \lambda) \Delta\theta_{r,k}, \quad (5.6)$$

donde R es el factor de reflectancia direccional hemisférica, comprendido entre 0 y 1; f_r la función de distribución de reflectancia bidireccional y Ω_r el ángulo sólido proyectado. El subíndice k denota el número de geometría, y N_g el número total de geometrías. $\Delta\theta_r$ es la diferencia angular polar de detección entre cada geometría, que en este caso es 15° . Para el cálculo de la ecuación 5.6 se emplearon los conjuntos de valores de reflectancia bidireccional correspondientes a ambos semiplanos de incidencia, por lo que el resultado de la expresión se divide entre 2.

Los resultados para la reflectancia direccional-hemisférica $0^\circ:d$ para todos los patrones de reflectancia son mostrados en la Figura 5.33.

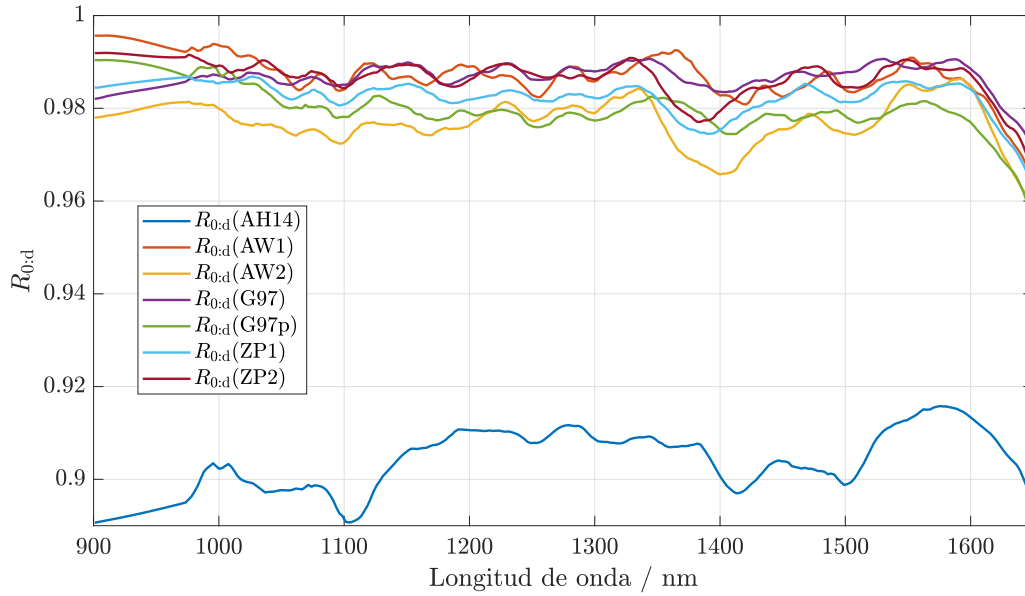


Figura 5.33: Reflectancia normal hemisférica $0^\circ:d$ para cada una de las muestras medidas.

De forma complementaria se midió la reflectancia $8^\circ:di$ utilizando una esfera integradora junto a un fotodiodo InGaAs, y se empleó como base de comparación para los resultados obtenidos para la reflectancia $0^\circ:d$ calculados en este apartado a partir de la integración de valores de reflectancia bidireccional. El propio procedimiento experimental para la medida de la reflectancia direccional-hemisférica empleando una esfera integradora restringe la dirección polar de incidencia a 8° [49]. Los resultados para la reflectancia difusa a partir de la BRDF y los obtenidos mediante esfera integradora son comparables entre sí dado que la BRDF de las geometrías empleadas para el cálculo de la reflectancia $0^\circ:d$ presenta simetría de revolución para el plano de detección [13]. Esto asemeja la medida de reflectancia $0^\circ:d$ a la hipotética realizada con una esfera integradora. Además, dado que las muestras son muy lambertianas, se espera que la diferencia entre la reflectancia $0^\circ:d$ y $8^\circ:di$ sea pequeña. Los resultados de la comparación se muestran en las Figuras 5.34 y 5.35.

5.3 Validación de los resultados

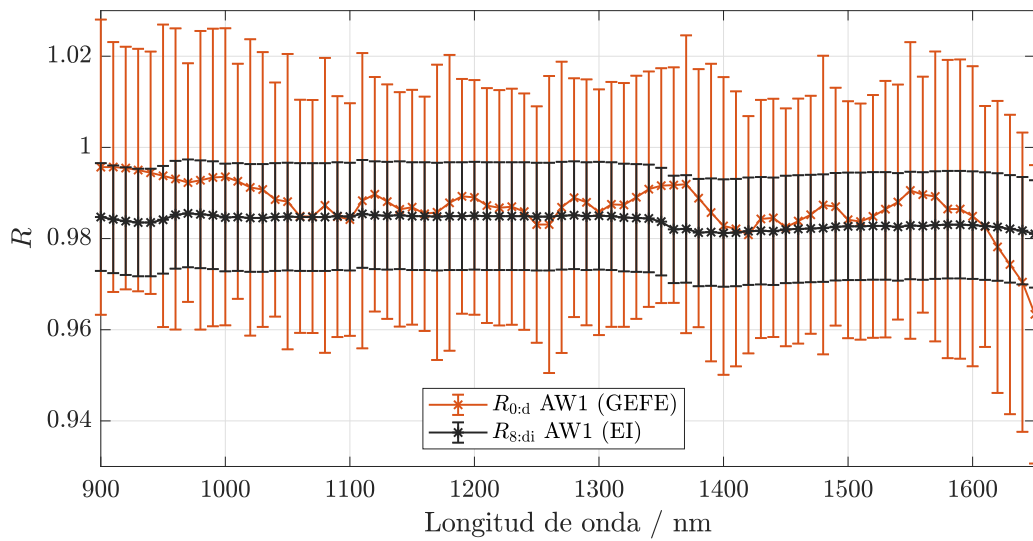


Figura 5.34: Reflectancia normal hemisférica $0^\circ:d$ medida en GEFE y $8^\circ:di$ medida con esfera integradora para el patrón AW1. La incertidumbre típica expandida $k = 2$ se representa en las barras de error para cada medida.

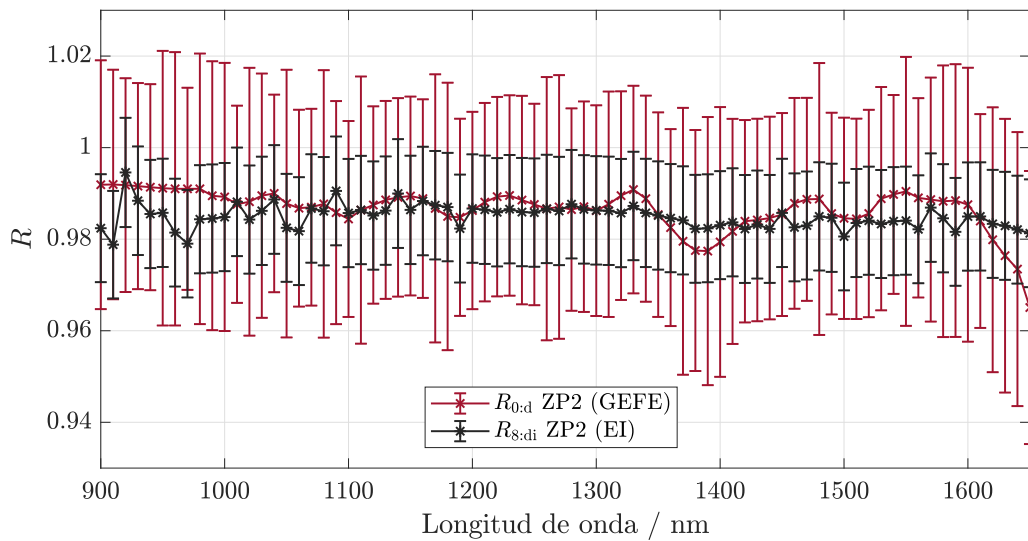


Figura 5.35: Reflectancia normal hemisférica $0^\circ:d$ medida en GEFE y $8^\circ:di$ medida con esfera integradora para el patrón ZP2. La incertidumbre típica expandida $k = 2$ se representa en las barras de error para cada medida.

De nuevo, se calculó la diferencia normalizada entre los resultados para mostrar la compatibilidad entre estos como:

$$D_n = \frac{|R_{8:di} - R_{0:d}|}{\sqrt{U^2(R_{8:di}) + U^2(R_{0:d})}}, \quad (5.7)$$

donde $R_{8:di}$ es la reflectancia $8^\circ:di$ medida con esfera integradora y $R_{0:d}$ la reflectancia $0^\circ:d$ medida en GEFE. Los resultados del cálculo se muestran en la Figura 5.36. El criterio

es el mismo que en anteriores ocasiones, si el resultado del cálculo está por debajo de 1 las medidas se consideran compatibles.

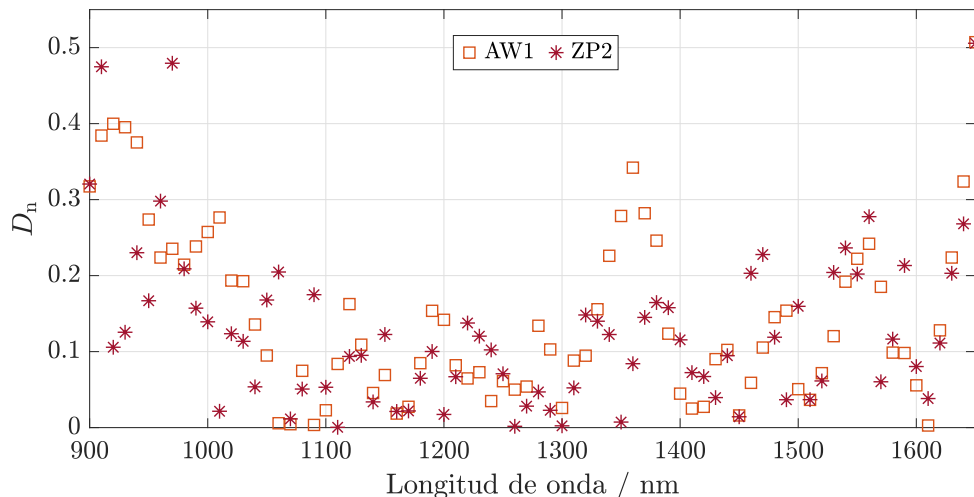


Figura 5.36: Diferencia normalizada calculada entre las medidas de reflectancia 8° : d_i y 0° : d para los patrones AW1 y ZP2.

5.3.3. Intercomparación de la BRDF (CSIC-PTB)

Una manera eficaz de validar el factor de reflectancia bidireccional calculado es mediante su comparación con otra medida efectuada en un laboratorio distinto. En este caso, se hizo uso de una calibración previa del factor de radiancia espectral 0° : 45° efectuada por el PTB de Alemania para la muestra AH14, en el intervalo espectral comprendido entre 250 nm y 1700 nm, el cual abarca los valores de BRDF espectrales caracterizados en esta tesis. Como se ha comentado previamente, el valor de BRDF se obtiene dividiendo por π el valor del factor de radiancia espectral. La comparación entre los valores de BRDF de cada laboratorio y sus incertidumbres asociadas se hace a través del cálculo de la diferencia normalizada, D_n , la cual se expresa para este caso como:

$$D_n = \frac{|f_{r,\text{CSIC}}(0^\circ : 45^\circ) - f_{r,\text{PTB}}(0^\circ : 45^\circ)|}{\sqrt{U^2(f_{r,\text{CSIC}}(0^\circ : 45^\circ)) + U^2(f_{r,\text{PTB}}(0^\circ : 45^\circ))}}, \quad (5.8)$$

siendo $f_{r,\text{CSIC}}$ y $f_{r,\text{PTB}}$ la BRDF calculada para el CSIC y el PTB, respectivamente, y $U(f_{r,\text{CSIC}})$ y $U(f_{r,\text{PTB}})$ sus correspondientes incertidumbres expandidas $k = 2$.

Los valores de reflectancia bidireccional a 0° : 45° para el CSIC y el PTB se muestran en la Figura 5.37, así como su incertidumbre expandida asociada. Los resultados para la diferencia normalizada se muestran en la Figura 5.38.

Las diferencias en el valor de incertidumbre para la BRDF (0° , 0° ; 45° , 0°) mostrada en la Figura 5.37 son debidas al método empleado. El procedimiento empleado por el PTB es un método de medida absoluto, como el usado para la medida del RC a 0° : 45° realizado en

5.3 Validación de los resultados

el capítulo 3 de esta tesis. Pero los resultados del CSIC que se muestran en este apartado se obtuvieron a través de una medida relativa empleando un instrumento de detección con una incertidumbre mayor.

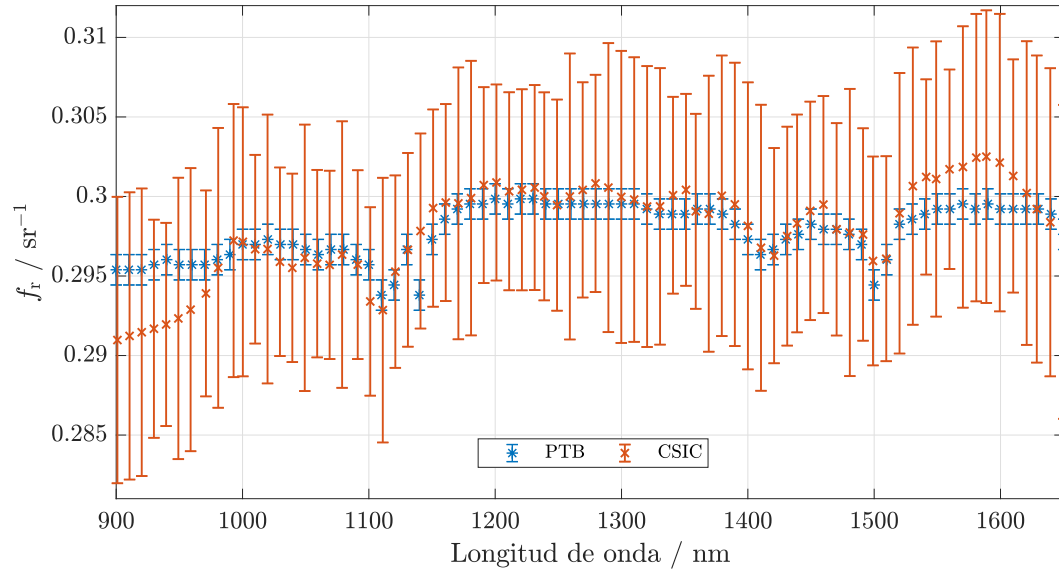


Figura 5.37: Coeficiente de radiancia $0^\circ:45^\circ$ e incertidumbres expandidas asociadas $k = 2$ medidos por el PTB y el CSIC para la muestra AH14.

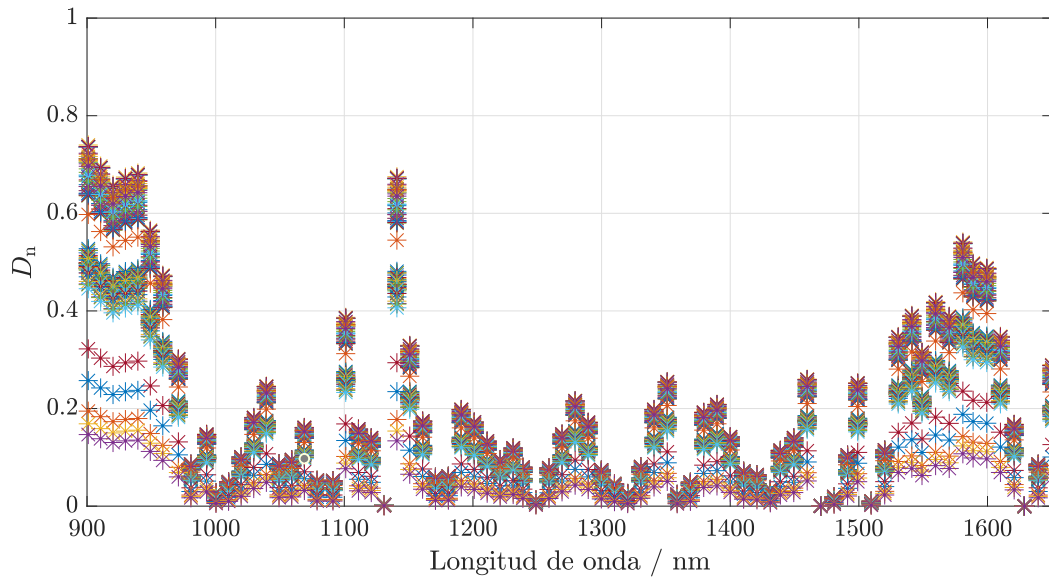


Figura 5.38: Diferencia normalizada calculada entre los datos del RC $0^\circ:45^\circ$ del PTB y el CSIC para el patrón AH14.

Para que las medidas sean compatibles, el error o diferencia entre las medidas ha de ser inferior a la raíz de la suma cuadrática de sus incertidumbres, es decir, inferior a 1.

Como se observa en la figura 5.38, todos los valores espectrales de reflectancia bidireccional son inferiores a 1, lo que corrobora los resultados obtenidos para la escala de BRDF.

Conclusiones

Del trabajo que se describe en esta memoria para desarrollar una escala de reflectancia bidireccional en el infrarrojo cercano y optar al título de doctor se pueden extraer las siguientes conclusiones relevantes:

1. Se ha demostrado que el método de medida relativo de la BRDF produce resultados compatibles con los del método absoluto aplicado por otros laboratorios de referencia, pero requiere un tiempo de medida menor. La incertidumbre alcanzada es suficiente para la mayor parte de las aplicaciones de medida de esta magnitud.
2. El método de medida de la BRDF ha consistido en medir con un método absoluto el coeficiente de radiancia para un ángulo de incidencia de 0° y un ángulo de reflexión de 45° , geometría de referencia aceptada internacionalmente, y determinar el resto de la distribución angular y espectral de la BRDF con respecto a esta geometría. De esta forma, se ha podido comparar el valor de referencia $0^\circ:45^\circ$ con el obtenido por otros laboratorios nacionales.
3. Para llevar a cabo este método de medida ha sido necesario actualizar un goni-espectrofotómetro desarrollado previamente en el Instituto de Óptica “Daza de Valdés” para el intervalo visible del espectro. La actualización ha consistido en modificar el sistema de irradiación añadiendo una fuente LDLS, de alta radiancia espectral, un monocromador y la correspondiente óptica, y modificar el sistema de detección introduciendo un fotodiodo de InGaAs para la medida absoluta y un espectrorradiómetro de infrarrojo para la medida relativa.
4. Se ha establecido la ecuación de medida de la BRDF en este sistema a partir de las variables geométricas y de respuesta espectral de los equipos de detección. Utilizando esta ecuación se ha calculado la incertidumbre de medida siguiendo el método recomendado por la organización internacional ISO en la guía para el cálculo de la incertidumbre de medida. Esto se ha hecho tanto para la medida relativa como para la medida en la geometría $0^\circ:45^\circ$.
5. En la medida absoluta se ha utilizado un método de detección directa frente al método de detección síncrona, que es habitual en este tipo de medidas. Esto se ha

hecho así porque permite un menor tiempo de medida. Ello ha significado llevar a cabo un análisis de la linealidad de respuesta del fotodiodo en un rango muy amplio de respuesta para el que no había datos publicados en la literatura.

6. La realización de esta escala de BRDF se basa en un grupo de muestras cuya reflectancia se acerca o no difiere significativamente de la del difusor perfecto. Las muestras están constituidas por distintos materiales, uno de ellos novedoso, y provienen de distintos fabricantes. A partir del estudio de su uniformidad, lambertianeidad y comportamiento espectral, se ha estimado las que son mejores como patrones de medida de esta magnitud. Los datos de comportamiento lambertiano en el rango NIR son una aportación genuina de este trabajo de tesis doctoral.
7. La bondad de los resultados obtenidos se ha confirmado mediante varias formas:
 - a) Se ha comprobado que se cumple el principio de reciprocidad de Helmholtz para un conjunto de geometrías.
 - b) Se ha calculado la reflectancia hemisférica de una muestra a partir de los valores de BRDF y se ha comparado este valor con la medida de la reflectancia 8° :difusa, componente especular incluida, obteniéndose que son compatibles dentro de la incertidumbre de medición.
 - c) Se ha comparado el valor del factor de radiancia 0° : 45° de una de las muestras medidas con el valor asignado a la misma por el laboratorio PTB de Alemania, obteniéndose que los resultados son compatibles teniendo en cuenta sus respectivas incertidumbres.
8. El método planteado en esta tesis sienta las bases para la realización de escalas de reflectancia en el infrarrojo cercano trazables al sistema internacional de unidades, contribuyendo así al desarrollo de capacidades metrológicas en este intervalo espectral.
9. El Instituto de Óptica “Daza de Valdés” cuenta con una nueva escala propia de medida, realizada de forma independiente, que es uno de los objetivos generales del Grupo de Investigación en Medidas de Radiación Óptica.



Bibliografía

- [1] U. S. N. B. of Standards and F. E. Nicodemus, *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, vol. 160. US Department of Commerce, National Bureau of Standards Washington, DC, USA, 1977.
- [2] D. B. Judd, “Terms, definitions, and symbols in reflectometry,” *JOSA*, vol. 57, no. 4, pp. 445–452, 1967.
- [3] C. Sun, B. Aernouts, and W. Saeys, “Bridging the gap between measurement-based and simulation-based metamodels for deriving bulk optical properties from spatially-resolved reflectance profiles: effect of illumination and detection geometry,” *Optics Express*, vol. 29, no. 11, pp. 15882–15905, 2021.
- [4] R. G. Driggers, V. Hodgkin, and R. Vollmerhausen, “What good is swir? passive day comparison of vis, nir, and swir,” in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV*, vol. 8706, pp. 187–201, SPIE, 2013.
- [5] R. Buckingham and K. Staenz, “Review of current and planned civilian space hyperspectral sensors for eo,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. sup1, pp. S187–S197, 2008.
- [6] A. Kuze, H. Suto, M. Nakajima, and T. Hamazaki, “Thermal and near infrared sensor for carbon observation fourier-transform spectrometer on the greenhouse gases observing satellite for greenhouse gases monitoring,” *Applied optics*, vol. 48, no. 35, pp. 6716–6733, 2009.
- [7] I. Nardi, E. Lucchi, T. de Rubeis, and D. Ambrosini, “Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography,” *Building and Environment*, vol. 146, pp. 190–205, 2018.
- [8] S. Malz, W. Krenkel, and O. Steffens, “Infrared reflective wall paint in buildings: Energy saving potentials and thermal comfort,” *Energy and Buildings*, vol. 224, p. 110212, 2020.

- [9] N. Narang and T. Bourlai, “Face recognition in the swir band when using single sensor multi-wavelength imaging systems,” *Image and Vision Computing*, vol. 33, pp. 26–43, 2015.
- [10] M. Thill, K. Baumann, and J. Barinoff, “Intraoperative assessment of margins in breast conservative surgery still in use?,” *Journal of surgical oncology*, vol. 110, no. 1, pp. 15–20, 2014.
- [11] J. Yang, X. Zhang, X. Zhang, L. Wang, W. Feng, and Q. Li, “Beyond the visible: bio-inspired infrared adaptive materials,” *Advanced Materials*, vol. 33, no. 14, p. 2004754, 2021.
- [12] A. Durand, E. de Borniol, R. Vinciguerra, T. Cathala, J. J. Yon, P. Castelein, R. Tronel, and G. L. Destefanis, “Irfpa modeling: examples and applications in swir and lwir,” in *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications*, vol. 5612, pp. 304–314, SPIE, 2004.
- [13] A. Höpe and K.-O. Hauer, “Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials,” *Metrologia*, vol. 47, no. 3, p. 295, 2010.
- [14] W. Erb, “Requirements for reflection standards and the measurement of their reflection values,” *Applied Optics*, vol. 14, no. 2, pp. 493–499, 1975.
- [15] E. Dhanumalayan and G. M. Joshi, “Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (ptfe) a review,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 1, pp. 247–268, 2018.
- [16] F. Clarke, F. Garforth, and D. Parry, “Goniophotometric and polarization properties of white reflection standard materials,” *Lighting Research & Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 133–149, 1983.
- [17] B. Bernad, A. Ferrero, C. Strothkämper, J. Campos, A. Pons, T. Quast, K. Hauer, and A. Schirmacher, “Deviation of white diffuse reflectance standards from perfect reflecting diffuser at visible and near-infrared spectral ranges,” *Metrologia*, vol. 56, no. 5, p. 055005, 2019.
- [18] 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-and out-of-plane and retroreflection geometries,” *Metrologia*, vol. 49, no. 3, p. 213, 2012.
- [19] International Commission on Illumination (CIE), “Radiance coefficient (1724078).” <https://cie.co.at/eilvterm/17-24-078>, Dec. 2020. CIE S 017:2020 ILV.

-
- [20] J. E. Proctor and P. Y. Barnes, “Nist high accuracy reference reflectometer-spectrophotometer,” *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 101, no. 5, p. 619, 1996.
- [21] D. Hünerhoff, U. Grusemann, and A. Höpe, “New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection,” *Metrologia*, vol. 43, no. 2, p. S11, 2006.
- [22] S. Nevas, F. Manoocheri, and E. Ikonen, “Gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflectance,” *Applied Optics*, vol. 43, no. 35, pp. 6391–6399, 2004.
- [23] R. Baribeau, W. S. Neil, and É. Côté, “Development of a robot-based gonioreflectometer for spectral brdf measurement,” *Journal of Modern Optics*, vol. 56, no. 13, pp. 1497–1503, 2009.
- [24] S. Ouarets, G. Ged, A. Razet, and G. Obein, “A new gonioreflectometer for the measurement of the bidirectional reflectance distribution function (brdf) at lne-cnam,” in *Proceedings of CIE*, pp. 687–691, 2012.
- [25] T. A. Germer and C. C. Asmail, “Goniometric optical scatter instrument for out-of-plane ellipsometry measurements,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 70, pp. 3688–3695, 1999.
- [26] F. B. Leloup, S. Forment, P. Dutré, M. R. Pointer, and P. Hanselaer, “Design of an instrument for measuring the spectral bidirectional scatter distribution function,” *Appl. Opt.*, vol. 47, pp. 5454–5467, 2008.
- [27] N. Matsapey, J. Faucheu, M. Flury, and D. Delafosse, “Design of a goniospectrophotometer for optical characterization of gonio-apparent materials,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, p. 065901, 2013.
- [28] A. M. R. Almazor, *Gonio-espectrofotómetro para medidas de BRDF de patrones de reflectancia y objetos gonio-aparentes*. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2014.
- [29] B. Bernad, A. Ferrero, A. Pons, M. L. Hernanz, and J. C. Acosta, “Upgrade of goniospectrophotometer gefe for near-field scattering and fluorescence radiance measurements,” in *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance 2015*, vol. 9398, pp. 105–115, SPIE, 2015.
- [30] M. López, J. Molina, H. Hofer, A. Sperling, and S. Kück, “Measurement of the nonlinearity of ge-and ingaas-photodiodes at high irradiance levels,” *Mapan*, vol. 25, no. 1, pp. 47–52, 2010.
- [31] G. Eppeldauer, “Electronic characteristics of ge and ingaas radiometers,” *SPIE*, vol. 3061, no. 1, pp. 833–838, 1997.

- [32] A. Carrasco-Sanz, F. Rodríguez-Barrios, P. Corredera, *et al.*, “An integrating sphere radiometer as a solution for high power calibrations in fibre optics,” *Metrologia*, no. 43, p. S145, 2006.
- [33] G. P. Eppeldauer, T. Bergen, T. Goodman, T. Saito, and H. W. Yoon, “Cie technical report 237,” *CIE*, vol. 1, p. 29, 2020.
- [34] P. Corredera, M. L. Hernanz, M. González-Herráez, and J. Campos, “Anomalous non-linear behaviour of ingaas photodiodes with overfilled illumination,” *Metrologia*, vol. 40, no. 1, p. S150, 2003.
- [35] L. Boivin, “Properties of sphere radiometers suitable for high-accuracy cryogenic-radiometer-based calibrations in the near-infrared,” *Metrologia*, vol. 37, no. 4, p. 273, 2000.
- [36] H. W. Yoon, J. J. Butler, T. C. Larason, and G. P. Eppeldauer, “Linearity of ingaas photodiodes,” *Metrologia*, vol. 40, no. 1, p. S154, 2003.
- [37] JCGM, *Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement*, vol. 100. BIPM, 2008.
- [38] N. Tejedor, A. Ferrero, and J. Campos, “Characterizing linearity of a large area ingaas photodiode in direct detection mode, at room temperature, from 100 pa to 10 μa ,” *Applied Optics*, vol. 63, no. 36, pp. 9171–9175, 2024.
- [39] H. W. Yoon, M. C. Dopkiss, and G. P. Eppeldauer, “Performance comparisons of ingaas, extended ingaas, and short-wave hgcdte detectors between 1 μm and 2.5 μm ,” in *Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV*, vol. 6297, pp. 16–25, SPIE, 2006.
- [40] A. M. Zurita, J. C. Acosta, A. Shcherbakov, and A. P. Aglio, “External quantum efficiency of some ingaas/inp photodiodes,” in *Proc of NewRad2008 congress, MO-P41,(1-3)*, 2008.
- [41] S. W. Brown, T. C. Larason, and Y. Ohno, “Report on the key comparison ccpr-k2. a-2003 spectral responsivity in the range of 900 nm to 1600 nm,” *NIST*, 2009.
- [42] G. P. Eppeldauer, *The Properties of Optical Radiation Detectors and Radiometers*. Cambridge Scholars Publishing, 2020.
- [43] Z. Zhang, H. Chen, W. Huang, X. Zheng, and L. Zhang, “High accuracy solar diffuser brdf measurement for on-board calibration in the solar reflective band,” *Remote Sensing*, vol. 15, no. 15, p. 3783, 2023.
- [44] R. W. Boyd, *Radiometry and the detection of optical radiation*. John Wiley and Sons, Inc.

-
- [45] A. Ferrero, J. Campos, and A. Pons, “Correction of photoresponse nonuniformity for matrix detectors based on prior compensation for their nonlinear behavior,” *Applied optics*, vol. 45, no. 11, pp. 2422–2427, 2006.
- [46] H. von Helmholtz, *Handbuch der Physicogischen Optik*, vol. pp. 168-169. Leopold Voss, Leipzig, 1867.
- [47] F. Clarke and D. Parry, “Helmholtz reciprocity: Its validity and application to reflectometry,” *Lighting Research & Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 1–11, 1985.
- [48] M.-J. Kim, “Verification of the reciprocity theorem,” *Applied optics*, vol. 27, no. 13, pp. 2645–2646, 1988.
- [49] A. Höpe, “Diffuse reflectance and transmittance,” in *Experimental Methods in the Physical Sciences*, vol. 46, pp. 179–219, Elsevier, 2014.
- [50] N. Tejedor, J. Campos, and A. Ferrero, “Datos suplementarios de la tesis “realización de escala de medida de la función de distribución de reflectancia bidireccional (brdf) en el rango espectral del infrarrojo cercano” [dataset].” <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/17400>, 2025. <http://hdl.handle.net/10261/394209>.

Anexo A

Selección de la lente de inyección de la radiación en el monocromador (L0)

Incluir la fuente LDLS en el sistema de iluminación del gonio-espectrofotómetro GE-FE, como puede ser observado en la figura 2.2 en el capítulo 2, requiere realizar una modificación en esta sección del sistema para poder conducir de forma eficaz, es decir, con la menor cantidad posible de pérdidas, la radiación que emerge de este elemento hasta el siguiente, el monocromador de la instalación.

La modificación más simple que permite la inyección de la radiación de la fuente dentro de la rendija de entrada del monocromador consiste en la interposición de una lente entre estos dos elementos, aunque su implementación conlleva ciertas consideraciones. En primer lugar, el espacio disponible entre la fuente y el monocromador es de 210 mm, por lo que la configuración óptica escogida tiene que ajustarse a esta distancia. De forma ideal, si se emplea esta lente para formar imagen del punto de emisión de la fuente sobre la rendija de entrada del monocromador, configuración que denominamos 1:1, se conseguiría una imagen sobre esta rendija con un tamaño equivalente al de la emisión de la fuente. Las dimensiones de la lente han de ser suficientes para recoger la totalidad de la extensión del haz que alcanza esta. Para estimarlo, se calcula el diámetro del haz sobre la lente como:

$$\varnothing_{\text{haz}} = 2s \tan \alpha_F, \quad (\text{A.1})$$

siendo s la distancia objeto para L0, y α_F el semiángulo correspondiente a la apertura numérica de la fuente. La distancia objeto es 105 mm, ya que para esta configuración óptica las distancias lente-fuente y lente-monocromador han de ser las mismas. La apertura numérica proporcionada por el fabricante de la fuente es 0.5, lo que corresponde a un semiángulo de 30° . El diámetro del haz obtenido es 121 mm, lo que está casi cinco veces

por encima del tamaño máximo de la lente que ofrece el fabricante, que es 24.5 mm (1'). Si se aplicase esta configuración de la lente, gran parte de la radiación de la fuente se perdería. Por ello, se planteó un segundo modo de inyección, considerando las aperturas numéricas de la fuente y el monocromador, configuración que denominamos AN.

Para decidir cual de las dos configuraciones de la lente, 1:1 o AN, es la idónea para ser empleada, se realiza una comparación entre ambas para ver en qué caso se tiene mayor cantidad de irradiancia y flujo radiante sobre la rendija de entrada del monocromador, suponiendo que el tamaño de rendija fuese ajustado a los límites del haz proyectado en la entrada de éste para cada configuración de irradiación.

Para calcular la irradiancia sobre la rendija de entrada del monocromador, E_M , se parte del flujo de la lámpara sobre la lente para cada caso:

$$\Phi_{F(AN,1:1)} = L_F A_F \Omega_{AN,1:1}; \quad (A.2)$$

siendo Φ_F el flujo emitido por la fuente, L_F la radiancia de la fuente, A_F el área de la fuente y Ω el ángulo sólido subtendido por la lente. El subíndice AN indica la configuración en la que se llena la apertura numérica del monocromador, mientras que el subíndice 1:1 indica la configuración que permite formar imagen sobre la entrada del dispositivo.

Mediante una aproximación por desarrollo de Taylor, se simplifica el valor del ángulo sólido a $A_L (s_{AN,1:1}^2)^{-1}$, siendo A_L el área de la lente.

A partir del flujo de la fuente, se obtuvo la irradiancia sobre la lente, como sigue:

$$E_{L(AN,1:1)} = \frac{\Phi_{F(AN,1:1)}}{A_L}; \quad (A.3)$$

y a partir de esta, el flujo y la irradiancia sobre la rendija de entrada del monocromador:

$$\Phi_{M(AN,1:1)} = E_{L(AN,1:1)} A_L \tau_L, \quad (A.4)$$

$$E_{M(AN,1:1)} = \frac{\Phi_{M(AN,1:1)}}{A_M}, \quad (A.5)$$

siendo Φ_M el flujo radiante de la lente sobre el monocromador, E_L y E_M la irradiancia sobre la lente y el monocromador, respectivamente; y τ_L la transmitancia de la lente.

A_M es el área de la imagen sobre la rendija del monocromador, que se relacionará con las distancias objeto e imagen por simplicidad de cálculo, a partir de la fórmula del aumento lateral, como sigue:

$$A_{M(AN,1:1)} = y'_{x(AN,1:1)} y'_{y(AN,1:1)} = y_x y_y \left(\frac{s'_{AN,1:1}}{s_{AN,1:1}} \right)^2. \quad (A.6)$$

A continuación, se procedió a calcular el cociente entre las áreas:

$$r_{AM} = \frac{A_{M(AN)}}{A_{M(1:1)}} = \left(\frac{s'_{AN} s_{1:1}}{s'_{1:1} s_{AN}} \right)^2. \quad (A.7)$$

Por último, se obtuvieron los cocientes entre los valores de irradiancia y de flujo correspondientes a cada configuración:

$$r_{\Phi} = \frac{\Phi_{M(AN)}}{\Phi_{M(1:1)}} = \left(\frac{s_{1:1}}{s_{AN}} \right)^2; \quad r_E = \frac{E_{M(AN)}}{E_{M(1:1)}} = \left(\frac{s'_{1:1}}{s'_{AN}} \right)^2; \quad (A.8)$$

Para efectuar el cálculo de estos cocientes, es necesario obtener primero las distancias objeto e imagen para cada configuración de la lente. Las distancias objeto e imagen para la configuración 1:1 son iguales, 105 mm, como fue mencionado. Para obtener las distancias correspondientes a la configuración AN se partió de la fórmula de las lentes delgadas, despejando s y s' como sigue:

$$s = f + \left(1 + \frac{\tan \alpha_M}{\tan \alpha_F} \right); \quad s' = f + \left(1 + \frac{\tan \alpha_F}{\tan \alpha_M} \right); \quad (A.9)$$

siendo α_M el ángulo correspondiente a la apertura numérica del monocromador y α_F el correspondiente a la apertura numérica de la fuente. La apertura numérica del monocromador es 0.12, lo que corresponde a un semiángulo de 7° . El semiángulo para la apertura numérica de la fuente, ya mencionado, es 30° .

En la Figura A.1 se representa la distancia focal de la lente a partir de las distancias objeto e imagen, además del diámetro del haz sobre la lente, obtenido a partir de la ecuación A.1.

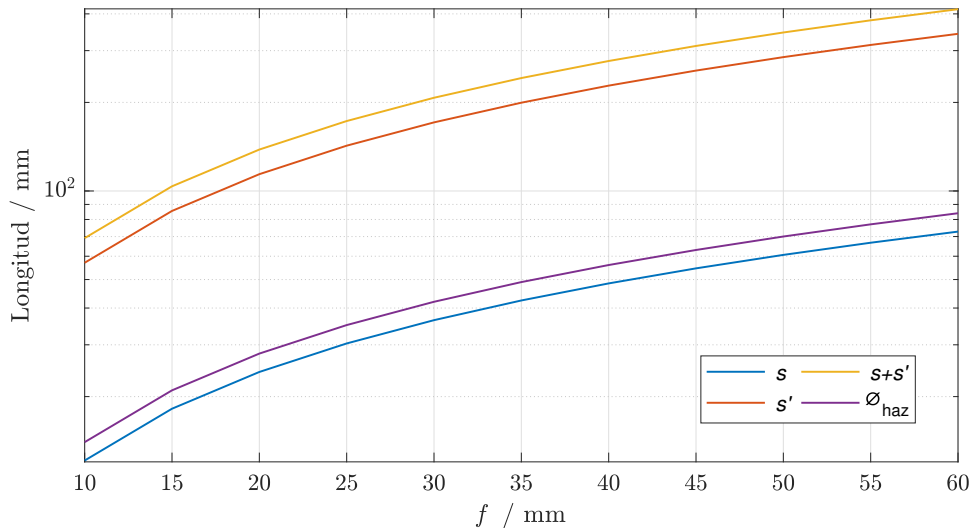


Figura A.1: Distancias objeto e imagen en función de la distancia focal, así como el diámetro del haz sobre la lente.

A la vista de los resultados, fue escogida una lente de 35 mm de focal y 25.4 mm de diámetro, considerando los parámetros de fabricación de las lentes que ofrece el fabricante. Bajo esta configuración, las distancias objeto e imagen son 42 mm y 200 mm respectivamente, cuya suma está cercana al valor disponible de la sección correspondiente del GEFE.

A continuación, se procedió a calcular tanto r_ϕ como r_E , obteniéndose que, el flujo radiante inyectado en el monocromador es 6.25 veces mayor cuando la lente se configura para llenar su apertura numérica que cuando se configura para formar imagen de la fuente sobre la rendija de entrada del mismo. Por el contrario, la irradiancia cuando se llena la apertura numérica del monocromador es un 28 % del valor de la irradiancia cuando se forma imagen de la fuente, dado el tamaño tan diferente del haz sobre la rendija de entrada en cada caso. Para el cálculo de r_{A_M} , el área cuando se llena la apertura numérica del monocromador es aproximadamente 23 veces mayor con respecto a la configuración en la que se forma imagen.

Dado que el tamaño de la rendija de entrada del monocromador tiene incidencia sobre el comportamiento espectral de éste, y el área para la configuración AN es mucho mayor que para 1:1, se procedió a calcular adicionalmente el tamaño de la distribución de la radiación en la rendija de entrada del monocromador para cada una de las configuraciones de la lente. Este tamaño se obtiene a partir del aumento lateral, y conociendo el tamaño de la emisión de la fuente (y), como:

$$M = \frac{s'}{s} = \frac{y'}{y}. \quad (\text{A.10})$$

El aumento lateral obtenido para la configuración AN es 4.76, mientras que para 1:1 es 1. Los tamaños calculados son 1.5 mm para AN y 0.3 mm para 1:1, empleando para el cálculo la dimensión vertical de la emisión de la fuente, que es la mayor de las dos.

En conclusión, si se tiene posibilidad de aumentar el tamaño de la rendija de entrada, el caso AN proporciona una mayor cantidad de flujo, si bien hay que tener en cuenta, como se ha comentado, que este tamaño tiene incidencia sobre el comportamiento espectral del monocromador. Por tanto, para las medidas efectuadas en esta tesis empleando la fuente LDLS de la instalación, la configuración de la lente aplicada será la que tiene en cuenta las aperturas numéricas tanto de la fuente como del monocromador, adaptando el tamaño de la rendija de entrada al de la distribución de la radiación sobre esta, y empleando la lente con los parámetros calculados.

Anexo B

Valores del RC $0^{\circ}:45^{\circ}$ e incertidumbres tipo A implicadas en el cálculo de la ecuación

Los valores de señal y oscuridad implicados en el cálculo del RC a $0^{\circ}:45^{\circ}$ y el valor del RC $0^{\circ}:45^{\circ}$ para la muestra G97 se pueden observar en las tablas B.1, B.3 y B.5 para cada ciclo de medida, respectivamente. Las desviaciones típicas asociadas a las señales y la incertidumbre expandida del RC se observan en las tablas B.2, B.4 y B.6 para cada ciclo de medida, respectivamente.

Los valores de señal y oscuridad implicados en el cálculo del RC a $0^{\circ}:45^{\circ}$ y el valor del RC $0^{\circ}:45^{\circ}$ para la muestra AW1 se pueden observar en las tablas B.7, B.9 y B.11 para cada ciclo de medida, respectivamente. Las desviaciones típicas respectivas asociadas a las señales y la incertidumbre expandida del RC se observan en las tablas B.8, B.10 y B.12 para cada ciclo de medida, respectivamente.

Los valores de señal y oscuridad implicados en el cálculo del RC a $0^{\circ}:45^{\circ}$ y el valor del RC $0^{\circ}:45^{\circ}$ para la muestra ZP1 se pueden observar en las tablas B.13, B.15 y B.17 para cada ciclo de medida, respectivamente. Las desviaciones típicas respectivas asociadas a las señales y la incertidumbre expandida del RC se observan en las tablas B.14, B.16 y B.18 para cada ciclo de medida, respectivamente.

Tabla B.1: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$8,7060 \times 10^{-6}$	$1,6572 \times 10^{-10}$	$3,81 \times 10^{-10}$	$8,96 \times 10^{-12}$	0.32333
950	$1,57942 \times 10^{-5}$	$2,9366 \times 10^{-10}$	$3,85 \times 10^{-10}$	$9,14 \times 10^{-12}$	0.32376
1000	$1,64770 \times 10^{-5}$	$3,0579 \times 10^{-10}$	$3,93 \times 10^{-10}$	$9,02 \times 10^{-12}$	0.32473
1050	$7,0438 \times 10^{-6}$	$1,3615 \times 10^{-10}$	$4,12 \times 10^{-10}$	$9,16 \times 10^{-12}$	0.32585
1100	$4,5828 \times 10^{-5}$	$8,4090 \times 10^{-10}$	$3,55 \times 10^{-10}$	$9,35 \times 10^{-12}$	0.32378
1150	$3,42698 \times 10^{-5}$	$6,3267 \times 10^{-10}$	$3,73 \times 10^{-10}$	$9,37 \times 10^{-12}$	0.32468
1200	$2,99080 \times 10^{-5}$	$5,5172 \times 10^{-10}$	$3,75 \times 10^{-10}$	$9,00 \times 10^{-12}$	0.32411
1250	$2,34332 \times 10^{-5}$	$4,3313 \times 10^{-10}$	$3,60 \times 10^{-10}$	$9,15 \times 10^{-12}$	0.32328
1300	$2,42912 \times 10^{-5}$	$4,4893 \times 10^{-10}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$9,00 \times 10^{-12}$	0.32333
1350	$1,87353 \times 10^{-5}$	$3,4984 \times 10^{-10}$	$3,99 \times 10^{-10}$	$9,06 \times 10^{-12}$	0.32439
1400	$1,45084 \times 10^{-5}$	$2,7012 \times 10^{-10}$	$3,77 \times 10^{-10}$	$9,07 \times 10^{-12}$	0.32099
1450	$1,52356 \times 10^{-5}$	$2,8495 \times 10^{-10}$	$3,87 \times 10^{-10}$	$9,20 \times 10^{-12}$	0.32343
1500	$1,35887 \times 10^{-5}$	$2,5443 \times 10^{-10}$	$3,70 \times 10^{-10}$	$9,15 \times 10^{-12}$	0.32346
1550	$1,06837 \times 10^{-5}$	$2,0224 \times 10^{-10}$	$3,71 \times 10^{-10}$	$9,04 \times 10^{-12}$	0.32437
1600	$6,8414 \times 10^{-6}$	$1,3199 \times 10^{-10}$	$3,66 \times 10^{-10}$	$9,03 \times 10^{-12}$	0.32293
1650	$4,7365 \times 10^{-6}$	$9,294 \times 10^{-11}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$9,16 \times 10^{-12}$	0.31836

Tabla B.2: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$2,7 \times 10^{-9}$	$5,4 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
950	$4,3 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$8,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1000	$3,5 \times 10^{-9}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$2,5 \times 10^{-9}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-4}$
1100	$1,0 \times 10^{-8}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$7,6 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1200	$6,3 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$3,6 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1300	$3,7 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$4,2 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1350	$3,9 \times 10^{-9}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$3,0 \times 10^{-9}$	$5,4 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1450	$2,7 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$2,3 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$3,0 \times 10^{-11}$	$3,3 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$2,2 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1600	$1,5 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$8,5 \times 10^{-4}$
1650	$1,1 \times 10^{-9}$	$6,5 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$8,9 \times 10^{-4}$

Tabla B.3: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$8,7060 \times 10^{-6}$	$1,6717 \times 10^{-10}$	$3,81 \times 10^{-10}$	$9,66 \times 10^{-12}$	0.32301
950	$1,57942 \times 10^{-5}$	$2,9506 \times 10^{-10}$	$3,85 \times 10^{-10}$	$9,83 \times 10^{-12}$	0.32253
1000	$1,64770 \times 10^{-5}$	$3,0635 \times 10^{-10}$	$3,93 \times 10^{-10}$	$9,55 \times 10^{-12}$	0.32274
1050	$7,0438 \times 10^{-6}$	$1,3742 \times 10^{-10}$	$4,12 \times 10^{-10}$	$9,57 \times 10^{-12}$	0.32629
1100	$4,5828 \times 10^{-5}$	$8,3755 \times 10^{-10}$	$3,55 \times 10^{-10}$	$9,74 \times 10^{-12}$	0.32296
1150	$3,42698 \times 10^{-5}$	$6,2462 \times 10^{-10}$	$3,73 \times 10^{-10}$	$9,89 \times 10^{-12}$	0.32109
1200	$2,99080 \times 10^{-5}$	$5,4416 \times 10^{-10}$	$3,75 \times 10^{-10}$	$9,61 \times 10^{-12}$	0.32016
1250	$2,34332 \times 10^{-5}$	$4,3386 \times 10^{-10}$	$3,60 \times 10^{-10}$	$9,49 \times 10^{-12}$	0.32465
1300	$2,42912 \times 10^{-5}$	$4,4900 \times 10^{-10}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$9,67 \times 10^{-12}$	0.32334
1350	$1,87353 \times 10^{-5}$	$3,4861 \times 10^{-10}$	$3,99 \times 10^{-10}$	$9,79 \times 10^{-12}$	0.32318
1400	$1,45084 \times 10^{-5}$	$2,6921 \times 10^{-10}$	$3,77 \times 10^{-10}$	$9,65 \times 10^{-12}$	0.31961
1450	$1,52356 \times 10^{-5}$	$2,8117 \times 10^{-10}$	$3,87 \times 10^{-10}$	$9,61 \times 10^{-12}$	0.31921
1500	$1,35887 \times 10^{-5}$	$2,5342 \times 10^{-10}$	$3,70 \times 10^{-10}$	$9,43 \times 10^{-12}$	0.32224
1550	$1,06837 \times 10^{-5}$	$1,9935 \times 10^{-10}$	$3,71 \times 10^{-10}$	$9,35 \times 10^{-12}$	0.32015
1600	$6,8414 \times 10^{-6}$	$1,3322 \times 10^{-10}$	$3,66 \times 10^{-10}$	$9,51 \times 10^{-12}$	0.32578
1650	$4,7365 \times 10^{-6}$	$9,366 \times 10^{-11}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$9,53 \times 10^{-12}$	0.32073

Tabla B.4: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$2,7 \times 10^{-9}$	$5,4 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
950	$4,3 \times 10^{-9}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1000	$3,5 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1050	$2,5 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,2 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-4}$
1100	$1,0 \times 10^{-8}$	$6,8 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-4}$
1150	$7,6 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-4}$
1200	$6,3 \times 10^{-9}$	$6,2 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-4}$
1250	$3,6 \times 10^{-9}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1300	$3,7 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1350	$3,9 \times 10^{-9}$	$7,9 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$3,0 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1450	$2,7 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1500	$2,3 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$3,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$2,2 \times 10^{-9}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
1600	$1,5 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$4,7 \times 10^{-13}$	$8,6 \times 10^{-4}$
1650	$1,1 \times 10^{-9}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$8,9 \times 10^{-4}$

Tabla B.5: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra G97 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$8,7060 \times 10^{-6}$	$1,6740 \times 10^{-10}$	$3,81 \times 10^{-10}$	$1,046 \times 10^{-11}$	0.32197
950	$1,57942 \times 10^{-5}$	$2,9633 \times 10^{-10}$	$3,85 \times 10^{-10}$	$1,070 \times 10^{-11}$	0.32332
1000	$1,64770 \times 10^{-5}$	$3,0780 \times 10^{-10}$	$3,93 \times 10^{-10}$	$1,061 \times 10^{-11}$	0.32337
1050	$7,0438 \times 10^{-6}$	$1,3789 \times 10^{-10}$	$4,12 \times 10^{-10}$	$1,059 \times 10^{-11}$	0.32451
1100	$4,5828 \times 10^{-5}$	$8,3557 \times 10^{-10}$	$3,55 \times 10^{-10}$	$1,070 \times 10^{-11}$	0.32113
1150	$3,42698 \times 10^{-5}$	$6,2719 \times 10^{-10}$	$3,73 \times 10^{-10}$	$1,069 \times 10^{-11}$	0.32116
1200	$2,99080 \times 10^{-5}$	$5,5090 \times 10^{-10}$	$3,75 \times 10^{-10}$	$1,065 \times 10^{-11}$	0.32274
1250	$2,34332 \times 10^{-5}$	$4,3362 \times 10^{-10}$	$3,60 \times 10^{-10}$	$1,055 \times 10^{-11}$	0.32276
1300	$2,42912 \times 10^{-5}$	$4,4921 \times 10^{-10}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$1,063 \times 10^{-11}$	0.32217
1350	$1,87353 \times 10^{-5}$	$3,4812 \times 10^{-10}$	$3,99 \times 10^{-10}$	$1,082 \times 10^{-11}$	0.32097
1400	$1,45084 \times 10^{-5}$	$2,7211 \times 10^{-10}$	$3,77 \times 10^{-10}$	$1,057 \times 10^{-11}$	0.32115
1450	$1,52356 \times 10^{-5}$	$2,8566 \times 10^{-10}$	$3,87 \times 10^{-10}$	$1,058 \times 10^{-11}$	0.32234
1500	$1,35887 \times 10^{-5}$	$2,5540 \times 10^{-10}$	$3,70 \times 10^{-10}$	$1,031 \times 10^{-11}$	0.32305
1550	$1,06837 \times 10^{-5}$	$2,0304 \times 10^{-10}$	$3,71 \times 10^{-10}$	$1,057 \times 10^{-11}$	0.32340
1600	$6,8414 \times 10^{-6}$	$1,3366 \times 10^{-10}$	$3,66 \times 10^{-10}$	$1,036 \times 10^{-11}$	0.32381
1650	$4,7365 \times 10^{-6}$	$9,462 \times 10^{-11}$	$3,61 \times 10^{-10}$	$1,038 \times 10^{-11}$	0.32023

Tabla B.6: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra G97 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$2,7 \times 10^{-9}$	$4,7 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
950	$4,3 \times 10^{-9}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$8,7 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1000	$3,5 \times 10^{-9}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$2,5 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-4}$
1100	$1,0 \times 10^{-8}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$6,6 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-4}$
1150	$7,6 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-4}$
1200	$6,3 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$4,1 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-4}$
1250	$3,6 \times 10^{-9}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$3,5 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1300	$3,7 \times 10^{-9}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1350	$3,9 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1400	$3,0 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$5,3 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1450	$2,7 \times 10^{-9}$	$4,9 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$2,3 \times 10^{-9}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$3,0 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$2,2 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,5 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1600	$1,5 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$8,5 \times 10^{-4}$
1650	$1,1 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$3,6 \times 10^{-13}$	$8,9 \times 10^{-4}$

Tabla B.7: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,30324 \times 10^{-5}$	$2,5053 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,27 \times 10^{-11}$	0.32556
950	$2,42556 \times 10^{-5}$	$4,5900 \times 10^{-10}$	$2,87 \times 10^{-10}$	$1,30 \times 10^{-11}$	0.32791
1000	$2,57383 \times 10^{-5}$	$4,8507 \times 10^{-10}$	$2,69 \times 10^{-10}$	$1,30 \times 10^{-11}$	0.32656
1050	$1,15751 \times 10^{-5}$	$2,2406 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,30 \times 10^{-11}$	0.32443
1100	$6,23897 \times 10^{-5}$	$1,14847 \times 10^{-9}$	$3,07 \times 10^{-10}$	$1,328 \times 10^{-11}$	0.32502
1150	$4,74955 \times 10^{-5}$	$8,7527 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,29 \times 10^{-11}$	0.32436
1200	$4,14635 \times 10^{-5}$	$7,6785 \times 10^{-10}$	$2,91 \times 10^{-10}$	$1,28 \times 10^{-11}$	0.32553
1250	$3,25687 \times 10^{-5}$	$6,068 \times 10^{-10}$	$2,98 \times 10^{-10}$	$1,316 \times 10^{-11}$	0.32565
1300	$3,24688 \times 10^{-5}$	$6,040 \times 10^{-10}$	$2,72 \times 10^{-10}$	$1,298 \times 10^{-11}$	0.32523
1350	$2,50390 \times 10^{-5}$	$4,691 \times 10^{-10}$	$2,99 \times 10^{-10}$	$1,300 \times 10^{-11}$	0.32585
1400	$1,95075 \times 10^{-5}$	$3,667 \times 10^{-10}$	$3,22 \times 10^{-10}$	$1,320 \times 10^{-11}$	0.32386
1450	$2,04299 \times 10^{-5}$	$3,816 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,278 \times 10^{-11}$	0.32233
1500	$1,83204 \times 10^{-5}$	$3,4497 \times 10^{-10}$	$3,13 \times 10^{-10}$	$1,291 \times 10^{-11}$	0.32420
1550	$1,44820 \times 10^{-5}$	$2,7576 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-10}$	$1,269 \times 10^{-11}$	0.32590
1600	$9,3954 \times 10^{-6}$	$1,836 \times 10^{-10}$	$3,35 \times 10^{-10}$	$1,263 \times 10^{-11}$	0.32613
1650	$6,60596 \times 10^{-6}$	$1,3021 \times 10^{-10}$	$3,46 \times 10^{-10}$	$1,266 \times 10^{-11}$	0.31805

Tabla B.8: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$1,9 \times 10^{-9}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$4,5 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-4}$
950	$4,5 \times 10^{-9}$	$6,8 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1000	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$2,8 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-4}$
1100	$8,3 \times 10^{-9}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$8,8 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$4,9 \times 10^{-9}$	$9,3 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1200	$5,7 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-13}$	$4,8 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$5,0 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$7,5 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1300	$5,6 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1350	$5,6 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$2,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$4,6 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1450	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$9,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$4,3 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$1,7 \times 10^{-9}$	$7,3 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1600	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$8,6 \times 10^{-13}$	$8,1 \times 10^{-4}$
1650	$8,1 \times 10^{-10}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$8,2 \times 10^{-4}$

Tabla B.9: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,30324 \times 10^{-5}$	$2,517 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,50 \times 10^{-11}$	0.32419
950	$2,42556 \times 10^{-5}$	$4,545 \times 10^{-10}$	$2,87 \times 10^{-10}$	$1,534 \times 10^{-11}$	0.32336
1000	$2,57383 \times 10^{-5}$	$4,812 \times 10^{-10}$	$2,69 \times 10^{-10}$	$1,546 \times 10^{-11}$	0.32301
1050	$1,15751 \times 10^{-5}$	$2,233 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,542 \times 10^{-11}$	0.32013
1100	$6,23897 \times 10^{-5}$	$1,1526 \times 10^{-9}$	$3,07 \times 10^{-10}$	$1,558 \times 10^{-11}$	0.32546
1150	$4,74955 \times 10^{-5}$	$8,760 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,567 \times 10^{-11}$	0.32343
1200	$4,14635 \times 10^{-5}$	$7,711 \times 10^{-10}$	$2,91 \times 10^{-10}$	$1,568 \times 10^{-11}$	0.32540
1250	$3,25687 \times 10^{-5}$	$6,113 \times 10^{-10}$	$2,98 \times 10^{-10}$	$1,598 \times 10^{-11}$	0.32639
1300	$3,24688 \times 10^{-5}$	$6,066 \times 10^{-10}$	$2,72 \times 10^{-10}$	$1,624 \times 10^{-11}$	0.32459
1350	$2,50390 \times 10^{-5}$	$4,729 \times 10^{-10}$	$2,99 \times 10^{-10}$	$1,596 \times 10^{-11}$	0.32581
1400	$1,95075 \times 10^{-5}$	$3,721 \times 10^{-10}$	$3,22 \times 10^{-10}$	$1,614 \times 10^{-11}$	0.32531
1450	$2,04299 \times 10^{-5}$	$3,889 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,613 \times 10^{-11}$	0.32560
1500	$1,83204 \times 10^{-5}$	$3,449 \times 10^{-10}$	$3,13 \times 10^{-10}$	$1,630 \times 10^{-11}$	0.32048
1550	$1,44820 \times 10^{-5}$	$2,779 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-10}$	$1,640 \times 10^{-11}$	0.32390
1600	$9,3954 \times 10^{-6}$	$1,8764 \times 10^{-10}$	$3,35 \times 10^{-10}$	$1,618 \times 10^{-11}$	0.32698
1650	$6,60596 \times 10^{-6}$	$1,3454 \times 10^{-10}$	$3,46 \times 10^{-10}$	$1,639 \times 10^{-11}$	0.31896

Tabla B.10: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$1,9 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$4,5 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-4}$
950	$4,5 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-12}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$9,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1000	$5,2 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-12}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$9,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$2,8 \times 10^{-9}$	$2,5 \times 10^{-12}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-4}$
1100	$8,3 \times 10^{-9}$	$3,2 \times 10^{-12}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$4,9 \times 10^{-9}$	$3,6 \times 10^{-12}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1200	$5,7 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-12}$	$4,8 \times 10^{-11}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$5,0 \times 10^{-9}$	$2,7 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$8,9 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1300	$5,6 \times 10^{-9}$	$2,6 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1350	$5,6 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$2,3 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$4,6 \times 10^{-11}$	$6,2 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1450	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$4,3 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1550	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$4,4 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1600	$1,1 \times 10^{-9}$	$9,8 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$6,6 \times 10^{-13}$	$8,1 \times 10^{-4}$
1650	$8,1 \times 10^{-10}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$4,0 \times 10^{-13}$	$8,2 \times 10^{-4}$

Tabla B.11: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra AW1 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,30324 \times 10^{-5}$	$2,4884 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,41 \times 10^{-11}$	0.32186
950	$2,42556 \times 10^{-5}$	$4,5536 \times 10^{-10}$	$2,87 \times 10^{-10}$	$1,378 \times 10^{-11}$	0.32545
1000	$2,57383 \times 10^{-5}$	$4,8244 \times 10^{-10}$	$2,69 \times 10^{-10}$	$1,37 \times 10^{-11}$	0.32517
1050	$1,15751 \times 10^{-5}$	$2,2229 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,367 \times 10^{-11}$	0.32209
1100	$6,23897 \times 10^{-5}$	$1,14806 \times 10^{-9}$	$3,07 \times 10^{-10}$	$1,354 \times 10^{-11}$	0.32476
1150	$4,74955 \times 10^{-5}$	$8,7731 \times 10^{-10}$	$2,83 \times 10^{-10}$	$1,345 \times 10^{-11}$	0.32481
1200	$4,14635 \times 10^{-5}$	$7,6956 \times 10^{-10}$	$2,91 \times 10^{-10}$	$1,335 \times 10^{-11}$	0.32568
1250	$3,25687 \times 10^{-5}$	$6,0851 \times 10^{-10}$	$2,98 \times 10^{-10}$	$1,331 \times 10^{-11}$	0.32631
1300	$3,24688 \times 10^{-5}$	$6,0533 \times 10^{-10}$	$2,72 \times 10^{-10}$	$1,298 \times 10^{-11}$	0.32564
1350	$2,50390 \times 10^{-5}$	$4,6988 \times 10^{-10}$	$2,99 \times 10^{-10}$	$1,309 \times 10^{-11}$	0.32595
1400	$1,95075 \times 10^{-5}$	$3,6854 \times 10^{-10}$	$3,22 \times 10^{-10}$	$1,302 \times 10^{-11}$	0.32536
1450	$2,04299 \times 10^{-5}$	$3,850 \times 10^{-10}$	$3,32 \times 10^{-10}$	$1,325 \times 10^{-11}$	0.32453
1500	$1,83204 \times 10^{-5}$	$3,476 \times 10^{-10}$	$3,13 \times 10^{-10}$	$1,363 \times 10^{-11}$	0.32577
1550	$1,44820 \times 10^{-5}$	$2,781 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-10}$	$1,369 \times 10^{-11}$	0.32723
1600	$9,3954 \times 10^{-6}$	$1,834 \times 10^{-10}$	$3,35 \times 10^{-10}$	$1,380 \times 10^{-11}$	0.32335
1650	$6,60596 \times 10^{-6}$	$1,3174 \times 10^{-10}$	$3,46 \times 10^{-10}$	$1,369 \times 10^{-11}$	0.31928

Tabla B.12: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra AW1 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$1,9 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$4,5 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$7,8 \times 10^{-4}$
950	$4,5 \times 10^{-9}$	$6,5 \times 10^{-13}$	$4,4 \times 10^{-11}$	$9,5 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1000	$5,2 \times 10^{-9}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$2,8 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$9,9 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
1100	$8,3 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,6 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$4,9 \times 10^{-9}$	$7,9 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$8,3 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1200	$5,7 \times 10^{-9}$	$9,4 \times 10^{-13}$	$4,8 \times 10^{-11}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$5,0 \times 10^{-9}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1300	$5,6 \times 10^{-9}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1350	$5,6 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$2,3 \times 10^{-9}$	$9,4 \times 10^{-13}$	$4,6 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1450	$3,5 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$5,0 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$4,3 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1600	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1650	$8,1 \times 10^{-10}$	$7,2 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$8,3 \times 10^{-4}$

Tabla B.13: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,00017 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-10}$	$1,96 \times 10^{-10}$	$7,89 \times 10^{-12}$	0.32099
950	$1,82961 \times 10^{-5}$	$3,337 \times 10^{-10}$	$1,80 \times 10^{-10}$	$7,92 \times 10^{-12}$	0.32386
1000	$1,91557 \times 10^{-5}$	$3,4965 \times 10^{-10}$	$1,87 \times 10^{-10}$	$7,92 \times 10^{-12}$	0.32581
1050	$8,3423 \times 10^{-6}$	$1,5564 \times 10^{-10}$	$1,81 \times 10^{-10}$	$7,85 \times 10^{-12}$	0.32566
1100	$5,12383 \times 10^{-5}$	$9,3437 \times 10^{-10}$	$2,08 \times 10^{-10}$	$8,32 \times 10^{-12}$	0.32557
1150	$3,83914 \times 10^{-5}$	$7,0428 \times 10^{-10}$	$2,15 \times 10^{-10}$	$8,11 \times 10^{-12}$	0.32677
1200	$3,34082 \times 10^{-5}$	$6,1312 \times 10^{-10}$	$1,93 \times 10^{-10}$	$8,11 \times 10^{-12}$	0.32617
1250	$2,61728 \times 10^{-5}$	$4,828 \times 10^{-10}$	$2,00 \times 10^{-10}$	$8,15 \times 10^{-12}$	0.32691
1300	$2,68011 \times 10^{-5}$	$4,9479 \times 10^{-10}$	$2,09 \times 10^{-10}$	$8,25 \times 10^{-12}$	0.32756
1350	$2,07048 \times 10^{-5}$	$3,8259 \times 10^{-10}$	$1,95 \times 10^{-10}$	$8,30 \times 10^{-12}$	0.32593
1400	$1,60963 \times 10^{-5}$	$2,9891 \times 10^{-10}$	$2,33 \times 10^{-10}$	$8,35 \times 10^{-12}$	0.32489
1450	$1,68464 \times 10^{-5}$	$3,1299 \times 10^{-10}$	$2,29 \times 10^{-10}$	$8,22 \times 10^{-12}$	0.32640
1500	$1,50460 \times 10^{-5}$	$2,8046 \times 10^{-10}$	$2,38 \times 10^{-10}$	$8,24 \times 10^{-12}$	0.32703
1550	$1,18873 \times 10^{-5}$	$2,223 \times 10^{-10}$	$2,39 \times 10^{-10}$	$8,19 \times 10^{-12}$	0.32624
1600	$7,6602 \times 10^{-6}$	$1,4656 \times 10^{-10}$	$2,71 \times 10^{-10}$	$7,97 \times 10^{-12}$	0.32761
1650	$5,30260 \times 10^{-6}$	$1,0237 \times 10^{-10}$	$2,68 \times 10^{-10}$	$7,98 \times 10^{-12}$	0.32361

Tabla B.14: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el primer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-4}$
950	$3,3 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1000	$4,5 \times 10^{-9}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$3,5 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$1,7 \times 10^{-9}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$2,9 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1100	$8,2 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$4,2 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$4,4 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1200	$4,3 \times 10^{-9}$	$5,2 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$3,7 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1300	$3,8 \times 10^{-9}$	$7,3 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1350	$2,8 \times 10^{-9}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$4,3 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$3,2 \times 10^{-9}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$4,5 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1450	$2,3 \times 10^{-9}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$8,6 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1550	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$8,6 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1600	$1,3 \times 10^{-9}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$7,3 \times 10^{-13}$	$8,4 \times 10^{-4}$
1650	$9,9 \times 10^{-10}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-11}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$9,0 \times 10^{-4}$

Tabla B.15: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,00017 \times 10^{-5}$	$1,857 \times 10^{-10}$	$1,96 \times 10^{-10}$	$8,60 \times 10^{-12}$	0.31842
950	$1,82961 \times 10^{-5}$	$3,341 \times 10^{-10}$	$1,80 \times 10^{-10}$	$8,48 \times 10^{-12}$	0.32100
1000	$1,91557 \times 10^{-5}$	$3,4674 \times 10^{-10}$	$1,87 \times 10^{-10}$	$8,51 \times 10^{-12}$	0.31961
1050	$8,3423 \times 10^{-6}$	$1,576 \times 10^{-10}$	$1,81 \times 10^{-10}$	$8,91 \times 10^{-12}$	0.32395
1100	$5,12383 \times 10^{-5}$	$9,2651 \times 10^{-10}$	$2,08 \times 10^{-10}$	$8,79 \times 10^{-12}$	0.32129
1150	$3,83914 \times 10^{-5}$	$6,9387 \times 10^{-10}$	$2,15 \times 10^{-10}$	$8,83 \times 10^{-12}$	0.32025
1200	$3,34082 \times 10^{-5}$	$6,136 \times 10^{-10}$	$1,93 \times 10^{-10}$	$8,42 \times 10^{-12}$	0.32503
1250	$2,61728 \times 10^{-5}$	$4,7948 \times 10^{-10}$	$2,00 \times 10^{-10}$	$8,79 \times 10^{-12}$	0.32278
1300	$2,68011 \times 10^{-5}$	$4,9192 \times 10^{-10}$	$2,09 \times 10^{-10}$	$8,56 \times 10^{-12}$	0.32380
1350	$2,07048 \times 10^{-5}$	$3,8235 \times 10^{-10}$	$1,95 \times 10^{-10}$	$8,58 \times 10^{-12}$	0.32408
1400	$1,60963 \times 10^{-5}$	$2,963 \times 10^{-10}$	$2,33 \times 10^{-10}$	$8,6 \times 10^{-12}$	0.32041
1450	$1,68464 \times 10^{-5}$	$3,1260 \times 10^{-10}$	$2,29 \times 10^{-10}$	$8,45 \times 10^{-12}$	0.32373
1500	$1,50460 \times 10^{-5}$	$2,8051 \times 10^{-10}$	$2,38 \times 10^{-10}$	$8,5 \times 10^{-12}$	0.32499
1550	$1,18873 \times 10^{-5}$	$2,2282 \times 10^{-10}$	$2,39 \times 10^{-10}$	$8,5 \times 10^{-12}$	0.32434
1600	$7,6602 \times 10^{-6}$	$1,4712 \times 10^{-10}$	$2,71 \times 10^{-10}$	$8,5 \times 10^{-12}$	0.32605
1650	$5,30260 \times 10^{-6}$	$1,0374 \times 10^{-10}$	$2,68 \times 10^{-10}$	$8,36 \times 10^{-12}$	0.32402

Tabla B.16: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el segundo ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ sr^{-1}$
900	$2,0 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$7,1 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-4}$
950	$3,3 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$9,3 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1000	$4,5 \times 10^{-9}$	$9,7 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$9,2 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1050	$1,7 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$9,5 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1100	$8,2 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$7,9 \times 10^{-13}$	$6,9 \times 10^{-4}$
1150	$4,4 \times 10^{-9}$	$8,7 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$9,9 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-4}$
1200	$4,3 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$9,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$3,7 \times 10^{-9}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$8,4 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1300	$3,8 \times 10^{-9}$	$6,3 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1350	$2,8 \times 10^{-9}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$8,1 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$3,2 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1450	$2,3 \times 10^{-9}$	$9,9 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-11}$	$9,8 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$9,0 \times 10^{-13}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$7,7 \times 10^{-4}$
1550	$1,1 \times 10^{-9}$	$8,9 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1600	$1,3 \times 10^{-9}$	$8,9 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$8,6 \times 10^{-4}$
1650	$9,9 \times 10^{-10}$	$9,6 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-11}$	$8,0 \times 10^{-13}$	$9,0 \times 10^{-4}$

Tabla B.17: Señales incidente y reflejada y sus respectivas oscuridades, así como el RC calculado, para la muestra ZP1 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	S_i / A	$S_{0,i}$ / A	S_r / A	$S_{0,r}$ / A	$q_{0:45}$ / sr ⁻¹
900	$1,00017 \times 10^{-5}$	$1,8900 \times 10^{-10}$	$1,96 \times 10^{-10}$	$1,029 \times 10^{-11}$	0.32029
950	$1,82961 \times 10^{-5}$	$3,3868 \times 10^{-10}$	$1,80 \times 10^{-10}$	$1,005 \times 10^{-11}$	0.32245
1000	$1,91557 \times 10^{-5}$	$3,5395 \times 10^{-10}$	$1,87 \times 10^{-10}$	$1,020 \times 10^{-11}$	0.32260
1050	$8,3423 \times 10^{-6}$	$1,5902 \times 10^{-10}$	$1,81 \times 10^{-10}$	$1,025 \times 10^{-11}$	0.32155
1100	$5,12383 \times 10^{-5}$	$9,3993 \times 10^{-10}$	$2,08 \times 10^{-10}$	$1,051 \times 10^{-11}$	0.32428
1150	$3,83914 \times 10^{-5}$	$7,0532 \times 10^{-10}$	$2,15 \times 10^{-10}$	$1,058 \times 10^{-11}$	0.32359
1200	$3,34082 \times 10^{-5}$	$6,1579 \times 10^{-10}$	$1,93 \times 10^{-10}$	$1,035 \times 10^{-11}$	0.32385
1250	$2,61728 \times 10^{-5}$	$4,8223 \times 10^{-10}$	$2,00 \times 10^{-10}$	$1,041 \times 10^{-11}$	0.32232
1300	$2,68011 \times 10^{-5}$	$4,9800 \times 10^{-10}$	$2,09 \times 10^{-10}$	$1,007 \times 10^{-11}$	0.32549
1350	$2,07048 \times 10^{-5}$	$3,8598 \times 10^{-10}$	$1,95 \times 10^{-10}$	$1,027 \times 10^{-11}$	0.32472
1400	$1,60963 \times 10^{-5}$	$3,000 \times 10^{-10}$	$2,33 \times 10^{-10}$	$1,011 \times 10^{-11}$	0.32191
1450	$1,68464 \times 10^{-5}$	$3,1497 \times 10^{-10}$	$2,29 \times 10^{-10}$	$1,004 \times 10^{-11}$	0.32334
1500	$1,50460 \times 10^{-5}$	$2,822 \times 10^{-10}$	$2,38 \times 10^{-10}$	$9,84 \times 10^{-12}$	0.32384
1550	$1,18873 \times 10^{-5}$	$2,267 \times 10^{-10}$	$2,39 \times 10^{-10}$	$9,97 \times 10^{-12}$	0.32635
1600	$7,6602 \times 10^{-6}$	$1,4778 \times 10^{-10}$	$2,71 \times 10^{-10}$	$1,000 \times 10^{-11}$	0.32186
1650	$5,30260 \times 10^{-6}$	$1,0453 \times 10^{-10}$	$2,68 \times 10^{-10}$	$9,89 \times 10^{-12}$	0.31922

Tabla B.18: Desviaciones típicas para las señales incidente y reflejada y sus oscuridades, así como la incertidumbre expandida $k = 2$ del RC calculado, para la muestra ZP1 y el tercer ciclo de medida.

λ / nm	$u(S_i)$ / A	$u(S_{0,i})$ / A	$u(S_r)$ / A	$u(S_{0,r})$ / A	$U(q_{0:45})/ \text{sr}^{-1}$
900	$2,0 \times 10^{-9}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-13}$	$7,8 \times 10^{-4}$
950	$3,3 \times 10^{-9}$	$7,4 \times 10^{-13}$	$4,7 \times 10^{-11}$	$4,1 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1000	$4,5 \times 10^{-9}$	$6,8 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-11}$	$6,4 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1050	$1,7 \times 10^{-9}$	$7,7 \times 10^{-13}$	$4,1 \times 10^{-11}$	$5,7 \times 10^{-13}$	$7,9 \times 10^{-4}$
1100	$8,2 \times 10^{-9}$	$4,8 \times 10^{-13}$	$4,0 \times 10^{-11}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$7,0 \times 10^{-4}$
1150	$4,4 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$4,4 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1200	$4,3 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-13}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1250	$3,7 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-13}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$7,0 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1300	$3,8 \times 10^{-9}$	$8,1 \times 10^{-13}$	$3,1 \times 10^{-11}$	$5,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1350	$2,8 \times 10^{-9}$	$6,7 \times 10^{-13}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1400	$3,2 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$7,5 \times 10^{-4}$
1450	$2,3 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-11}$	$8,5 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1500	$1,6 \times 10^{-9}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$7,6 \times 10^{-13}$	$7,6 \times 10^{-4}$
1550	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-11}$	$6,9 \times 10^{-13}$	$8,0 \times 10^{-4}$
1600	$1,3 \times 10^{-9}$	$8,5 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-11}$	$8,8 \times 10^{-13}$	$8,3 \times 10^{-4}$
1650	$9,9 \times 10^{-10}$	$9,5 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-11}$	$6,1 \times 10^{-13}$	$8,7 \times 10^{-4}$

Anexo C

Valores de BRDF relativa e incertidumbre asociada

Los datos calculados de BRDF relativa a la geometría $0^\circ:45^\circ$ y su incertidumbre típica expandida $k = 2$, para los 314 canales espectrales que comprenden el intervalo espectral entre 900 nm y 1700 nm y las 72 geometrías de medida, se pueden consultar en el repositorio digital CSIC [50]. Los datos están agrupados en función de la muestra en cada archivo dentro del repositorio.

Anexo D

Valores de BRDF e incertidumbre asociada

Los datos calculados de BRDF y su incertidumbre típica expandida $k = 2$, para los 314 canales espectrales que comprenden el intervalo espectral entre 900 nm y 1700 nm y las 72 geometrías de medida, se pueden consultar en el repositorio digital CSIC [50]. Los datos están agrupados en función de la muestra en cada archivo dentro del repositorio.