

SIMULACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN
EL RANGO DEL INFRARROJO DE ONDA LARGA (LWIR) EN ESCENARIOS 3D
CONSIDERANDO EFECTOS DE ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

JORGE ANDREY GARCIA VANEGAS
MIGUEL FERNANDO PIMIENTO ESCOBAR

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2025

SIMULACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN
EL RANGO DEL INFRARROJO DE ONDA LARGA (LWIR) EN ESCENARIOS 3D
CONSIDERANDO EFECTOS DE ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

JORGE ANDREY GARCIA VANEGAS
MIGUEL FERNANDO PIMIENTO ESCOBAR

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniería en Sistemas

Director:

Hoover Fabián Rueda Chacón
Ph.D en Ingeniería Eléctrica y Computación

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

A mi papá, que me enseñó a trabajar con constancia y a nunca rendirme.

A mi mamá, cuya fe y amor de madre me mantuvieron de pie siempre.

A Mafe, que caminó conmigo y fue mi apoyo en cada instante de este viaje.

A mis hermanos, por marcar rumbo con su ejemplo y guía.

Este trabajo es para todos ustedes; fueron mi apoyo e impulso en cada momento.

Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

— Miguel Pimiento

*A mis amigos, que además de apoyarme en mis ideas, me dieron la motivación
para no rendirme.*

*A mi padre, que siempre ha sido una fuente de inspiración para mí y me enseñó a
luchar por mis metas.*

*A mi hermana, que aunque hemos tenido nuestras diferencias, siempre fue mi
amiga más cercana y una gran confidente.*

*A mi hermano, que me enseñó que aunque uno se equivoque, siempre es posible
levantarse de nuevo.*

*Y especialmente a mi madre, que sin importar las veces que caí y los errores que
cometí, siempre me apoyó y ayudó, en todos los sentidos, a seguir mis sueños.*

— Jorge García

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por brindarnos los recursos necesarios para nuestra formación académica; a la Escuela de Ingeniería de Sistemas (EISI) por instruirnos en las ciencias de la computación y el desarrollo; al semillero Hands-On Computer Vision (HoCV), por ampliar nuestros horizontes y guiarnos en el camino de la investigación; a nuestro advisor, Hoover Rueda Chacón, por su labor docente y su guía en nuestro proceso académico; a nuestras familias, por el ánimo constante en los días difíciles y por celebrar cada paso alcanzado; y, finalmente, a nuestros amigos, cuyo apoyo y disposición para reír, conversar, opinar y acompañar resultaron esenciales para la culminación de este trabajo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 OBJETIVOS	19
2 MARCO DE REFERENCIA	20
2.1 IMÁGENES ESPECTRALES	20
2.2 IMÁGENES TÉRMICAS	21
2.2.1 Ley de Planck	22
2.2.2 Emisividad	23
2.2.3 Absorción atmosférica	24
2.2.4 Reflectancia térmica	28
2.3 RENDERIZADORES DE IMÁGENES	29
2.3.1 Trazado de rayos	30
2.3.2 Ecuación de renderizado y BRDF	30
2.3.3 Integración por Monte Carlo	32
2.4 MOTORES DE RENDERIZADO	33
2.4.1 Mitsuba 3	33
2.4.2 Blender	34
3 MÉTODO PROPUESTO	36
3.1 CREACIÓN DE ESCENARIOS 3D	37
3.2 MODELADO DE RADIACIÓN TÉRMICA EN ESCENARIOS LWIR	38
3.3 CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS 3D	40
3.4 IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON CON MITSUBA 3	42

3.4.1	<i>Backend</i> con FastAPI	42
3.4.2	<i>Frontend</i> con Gradio	44
4	SIMULACIONES Y RESULTADOS	47
4.1	VARIACIÓN SOBRE LOS OBJETOS	47
4.2	VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ESCENA	51
4.3	VARIACIÓN DE PARÁMETROS DEL SENSOR	55
4.4	VALIDACIÓN DEL SIMULADOR	58
5	CONCLUSIONES	66
6	TRABAJO FUTURO	68
	BIBLIOGRAFÍA	69

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ejemplo de un cubo de datos para una imagen hiperespectral, con su respectiva firma hiperespectral centrada en un píxel ¹ .	21
Figura 2. Radiancia espectral de los diferentes rangos VNIR, SWIR, MWIR y el LWIR, mostrando las contribuciones por la reflexión solar de las superficies de la escena y la emisión térmica de los objetos. En el recuadro inferior se presentan las principales aplicaciones en cada rango ² .	22
Figura 3. Gráfica de la radiancia versus la longitud de onda basado en la ley de Planck. Imagen realizada por los autores.	24
Figura 4. Firma espectral de emisividad para diferentes materiales en un rango de longitudes de onda entre los 8 y los 14 micrómetros, donde se destaca la firma de <i>rock</i> , que utilizamos como firma predeterminada. Gráfica generada con datos obtenidos de ³ .	25
Figura 5. Transmitancia del aire en un rango de longitudes de onda de entre 1 y 16 micrómetros. Gráfico generado con datos obtenidos de ⁴ .	26
Figura 6. Coeficiente de atenuación del aire en un rango de longitudes de onda de entre 1 y 16 micrómetros y equivalentes a atmósfera de tipo <i>Mid Latitude Summer</i> de MODTRAN. Gráfico generado con datos obtenidos de ⁵ .	27
Figura 7. Ejemplo básico de renderizado por <i>ray tracing</i> , con un rebote. Aquellos rayos que, en un solo rebote, sean capaces de llegar a la fuente de iluminación, «colorean» la imagen con el color de la superficie; mientras tanto, aquellos que deban atravesar una superficie para llegar a la fuente de iluminación, se consideran sombras. Imagen obtenida de ⁶	31

Figura 8. La función de renderizado nos muestra que la radiación observada desde un punto p en una dirección w_o es igual a la radiación emitida en el punto p en dirección de la dirección w_o y la suma de la radiación incidente en la semiesfera que llega al punto p y es redirigida en dirección w_o gracias a la BRDF. Imagen creada por los autores.	32
Figura 9. Ejemplo de emisor tipo <i>area</i> (izquierda), <i>spot</i> (centro) y <i>directional</i> (derecha). Imagen creada por los autores.	34
Figura 10. Ejemplo de la creación de una escena de 3D con Blender y su interfaz gráfica.	37
Figura 11. Componentes individuales renderizados necesarios para armar la medición completa del sensor, en una longitud de onda $\lambda = 10\mu m$. Imagen generada por los autores.	39
Figura 12. Imagen de radiancia renderizada a $\lambda = 10\mu m$, generada por los autores.	40
Figura 13. Renderizaciones adicionales de mapa de temperatura y profundidad. Imagen generada por los autores.	41
Figura 14. Cubo espectral generado por la herramienta. Imagen generada por los autores.	41
Figura 15. Flujo de trabajo del renderizador. Aquí podemos observar la secuencia esperada al renderizar una escena: Creación del escenario, asignación de parámetros, procesamiento de datos, y obtención de los resultados. Imagen generada por los autores.	42

Figura 16. Diagrama de clases simplificado del <i>backend</i> . <i>ObjectUtils</i> y <i>ObjService</i> gestionan objetos, materiales y firmas espectrales. <i>SceneParser</i> maneja la entrada y salida de la escena y <i>SceneService</i> prepara y modifica las configuraciones en cada escena (térmica, mapa de profundidad, mapa de temperatura). <i>RenderService</i> orquesta la ejecución y delega a los módulos especializados <i>RenderRGB</i> , <i>RenderThermal</i> y <i>RenderDepth</i> .	43
Figura 17. Diagrama de proceso de obtención de un cubo espectral. El usuario ingresa los parámetros de la renderización en la interfaz, que se comunica con el <i>backend</i> y este mediante operaciones internas, genera los resultados que son devueltos al <i>frontend</i> y este al usuario al final. Imagen generada por los autores.	44
Figura 18. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de renderizado. Imagen generada por los autores.	45
Figura 19. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de modificación de propiedades de los objetos. Imagen generada por los autores.	46
Figura 20. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de configuración de la escena. Imagen generada por los autores.	46
Figura 21. Dos ejemplos de firmas de emisividad $\varepsilon(\lambda)$ y dos temperaturas diferentes en el objeto T_{obj} . En la fila superior se observa un objeto a 310.15 K comparando la radiancia del cuerpo negro $B(\lambda; T_{obj})$ junto a su emisión $\varepsilon(\lambda)B(\lambda; T_{obj})$. En la fila inferior se observa otro objeto con una temperatura de 300 K y una firma de emisividad diferente.	48
Figura 22. Visualización de las 49 bandas de la renderización de una escena con un único objeto, sin interacción con el medio, ni reflectividad, a una temperatura de 350 K y la firma de emisividad observada en la fila superior de la Figura 21.	49

- Figura 23. Comparación gráfica de resultados del renderizador contra el teórico para objetos a diferentes temperaturas sin luz ambiente ni reflectancia. 50
- Figura 24. Comparación gráfica de un resultado del renderizador a partir de una firma sintética (izquierda), contra el resultado simulado y teórico esperado (derecha), para un objeto con una temperatura de 310.15 K . Con esto se comprueba la fidelidad del renderizado. 51
- Figura 25. Comportamiento de la medición observada de un objeto a temperatura fija con la firma de emisividad observada en la Figura 24 teniendo en cuenta la reflectividad a 3 diferentes temperaturas de 300 , 310.15 y 320 Kelvin de arriba hacia abajo respectivamente. En cada uno se comparan las emisiones del cuerpo negro en cada caso, la observación renderizada y la calculada teóricamente. 52
- Figura 26. Firma sintética del coeficiente de atenuación espectral $\alpha(\lambda)$ en el rango LWIR, utilizada de forma común en varios experimentos. La curva incluye picos y valles deliberados para representar regiones de mayor y menor transparencia del medio y así analizar la sensibilidad de la radiancia a variaciones de $\alpha(\lambda)$. 53
- Figura 27. La emisión medida por el sensor de un objeto completamente emisor a la temperatura de 310.15 Kelvin, una distancia de 32.58 metros justo en el píxel analizado, en un medio con la firma de atenuación vista en la Figura 6 y su comparación con la radiancia del cuerpo negro $B(\lambda; T_{obj})$ (izquierda). Comparativa de la transmitancia $\tau(\lambda)$ renderizada y calculada teóricamente mediante la Ecuación (14) (derecha). 54

Figura 28. Comparación del comportamiento de un objeto en un medio atenuante a diferentes distancias del sensor con una firma de atenuación vista en la Figura 6. Se aprecia la observación renderizada a varias distancias versus el cuerpo negro del objeto (izquierda). Se compara la transmitancia observada contra la teórica en diferentes distancias (derecha).	55
Figura 29. Comparativa de la $L_{air}(\lambda)$ observada con diferentes temperaturas contra la esperada teóricamente. Se proporciona información también sobre el límite que podría observarse ($B(\lambda; T_{air})$).	56
Figura 30. Comparativa entre la cantidad de muestreos por píxel (spp) y el tiempo de renderización en segundos, con imágenes de 256×256 píxeles y 49 bandas espectrales.	57
Figura 31. Comparativa entre la cantidad de muestreos por píxel (spp) contra el tiempo de renderización en segundos y el error en RMSE en comparación de la calculada teóricamente, con imágenes de 256×256 y 49 bandas.	58
Figura 32. Firma de atenuación por defecto usada en la validación del simulador de entre los $10 \mu m$ hasta los $12 \mu m$. Utilizamos una parte de la firma que podemos ver en la Figura 6.	60
Figura 33. Comparación de resultados para la selección de 3 objetos con misma temperatura y emisividad. Podemos observar la firma de emisividad y reflectancia (arriba izquierda), mapa de profundidad (arriba derecha) mapa de temperatura (abajo izquierda) y radiancia resultante tomada a $10.89 \mu m$ (abajo derecha).	62
Figura 34. Resultados de las observaciones de los puntos de interés denotados en la Figura 33 con la cota teórica (cuerpo negro) del objeto y del aire.	63

Figura 35. Comparación de resultados para la selección de 3 objetos con temperatura, emisividad y distancias distintas. Podemos observar la firma de emisividad y reflectancia (arriba izquierda), mapa de profundidad (arriba derecha) mapa de temperatura (abajo izquierda) y radiancia resultante tomada a $10.89 \mu m$ (abajo derecha).

64

Figura 36. Resultados de las observaciones de los puntos de interés denotados en la Figura 35 con la cota teórica (cuerpo negro) del objeto y del aire para cada uno de los casos.

65

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Relación el tamaño de la imagen (píxeles), el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena con un <i>spp</i> de 1,024 y 49 bandas. Aumento en el tiempo de renderización al aumentar el tamaño del cubo de forma espacial.	56
Cuadro 2. Relación entre la cantidad de bandas, el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena con un <i>spp</i> de 1,024 y 256×256 píxeles. Aumento del tiempo de computo al aumentar el numero de bandas; además, incremento de error al mantener el <i>spp</i> constante, debido a que hay menos muestras por cada banda.	59
Cuadro 3. Relación entre la cantidad de bandas, un <i>spp</i> proporcional a la cantidad de bandas, el tiempo de renderizacion (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena a 256×256 y 49 bandas. Se mantiene un error aproximadamente constante al aumentar el <i>spp</i> proporcional a la cantidad de bandas, logrando así mantener el muestreo en cada banda.	59
Cuadro 4. Relación entre el AOV ($^{\circ}$), el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena a 256×256 , 49 bandas y un <i>spp</i> de 16,384.	60

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES EN EL RANGO DEL INFRARROJO DE ONDA LARGA (LWIR) EN ESCENARIOS 3D CONSIDERANDO EFECTOS DE ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA *

AUTORES: JORGE ANDREY GARCIA VANEGAS, MIGUEL FERNANDO PIMIENTO ESCOBAR **

PALABRAS CLAVE: Simulador, imagenes espectrales, Beer-Lambert, cuerpo negro, imágenes térmicas, infrarrojo de onda larga (LWIR), absorción atmosférica, renderizado, Mitsuba.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se desarrolla un simulador para la adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango del infrarrojo de onda larga (LWIR), orientado a reproducir los fenómenos físicos de propagación de radiación térmica a través de la atmósfera. El sistema implementa modelos espectrales de emisividad de materiales, propagación radiativa, absorción atmosférica y atenuación en función de la distancia, integrados en escenarios tridimensionales mediante técnicas de renderizado.

El software está implementado en Python, combinando librerías de renderizado físico con herramientas de computación científica para generar imágenes sintéticas bajo condiciones controladas. Se realizaron simulaciones variando parámetros intrínsecos de los objetos (temperatura, emisividad, reflectancia), así como propiedades extrínsecas de la escena (distancia al sensor, coeficiente de atenuación del medio y temperatura atmosférica). Los resultados se comparan con predicciones teóricas obtenidas a partir de la ley de Beer-Lambert y de la radiación de cuerpo negro, mostrando alta coherencia entre la simulación y los modelos físicos.

La herramienta propuesta permite generar bases de datos sintéticas con control total de las condiciones experimentales, ofreciendo una alternativa para la validación de algoritmos de procesamiento de imágenes hiperespectrales en el rango LWIR. De este modo, contribuye a la investigación en visión por computadora y detección remota en el dominio LWIR.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hoover Fabián Rueda Chacón.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION OF HYPERSPECTRAL IMAGE ACQUISITION IN THE LONG-WAVE INFRARED (LWIR) RANGE IN 3D SCENARIOS CONSIDERING ATMOSPHERIC ABSORPTION EFFECTS

*

AUTHORS: JORGE ANDREY GARCIA VANEGAS, MIGUEL FERNANDO PIMIENTO ESCOBAR **

KEYWORDS: Simulator, spectral images, Beer–Lambert, blackbody, thermal images, long-wave infrared (LWIR), atmospheric absorption, rendering, Mitsuba.

DESCRIPTION:

In this work, a simulator is developed for the acquisition of hyperspectral images in the long-wave infrared (LWIR) range, aimed at reproducing the physical phenomena of thermal radiation propagation through the atmosphere. The system implements spectral models of material emissivity, radiative propagation, atmospheric absorption, and distance-dependent attenuation, integrated into three-dimensional scenarios using rendering techniques.

The software is implemented in Python, combining physically based rendering libraries with scientific computing tools to generate synthetic images under controlled conditions. Simulations will be carried out by varying intrinsic parameters of the objects (temperature, emissivity, reflectance), as well as extrinsic properties of the scene (sensor distance, medium attenuation coefficient, and atmospheric temperature). The results are compared with theoretical predictions obtained from the Beer–Lambert law and blackbody radiation, showing high coherence between the simulation and the physical models.

The proposed tool makes it possible to generate synthetic databases with full control of experimental conditions, offering an alternative for the validation of hyperspectral image processing algorithms in the LWIR range. In this way, it contributes to research in computer vision and remote sensing in the LWIR domain.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Systems Engineering and Informatics. Advisor: Hoover Fabián Rueda Chacón.

INTRODUCCIÓN

La imagenología hiperespectral en el infrarrojo de onda larga (LWIR), también conocida como imagenología térmica, ha emergido con un gran auge en múltiples aplicaciones como agricultura¹, monitoreo ambiental², inteligencia artificial³, medición de profundidad⁴ y detección de materiales⁵. A diferencia de las imágenes en el espectro visible, LWIR captura radiación térmica emitida por los objetos, permitiendo observar de forma pasiva fenómenos físicos sin requerir ninguna fuente de iluminación externa. Este tipo de imágenes nos permite analizar propiedades físico-químicas de los materiales mediante sus firmas espectrales de emisividad, además de la medición de temperaturas. La emisividad es la capacidad de los materiales de emitir la radiación térmica en comparación con la de un cuerpo negro ideal; estas propiedades proporcionan información clave sobre la composición y el estado de los

-
- ¹ A. Manickavasagan, D. S. Jayas y N. D. G. White. «Applications of thermal imaging in agriculture—a review». En: *Proceedings of the Canadian Society for Bioengineering (CSBE/SCGAB) Annual Meeting*. Winnipeg, MB, Canada, 2005, págs. 1-12.
 - ² M Kastek et al. «Hyperspectral imaging infrared sensor used for environmental monitoring». En: *Acta Physica Polonica A* 124.3 (2013), págs. 463-467.
 - ³ Fanglin Bao et al. «Heat-assisted detection and ranging». En: *Nature* 619.7971 (2023), págs. 743-748.
 - ⁴ Yasuto Nagase et al. «Shape from Thermal Radiation: Passive Ranging Using Multi-spectral LWIR Measurements». En: *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022, págs. 12651-12661. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01233; Unay Dorken Gallastegi et al. «Absorption-Based, Passive Range Imaging from Hyperspectral Thermal Measurements». En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2025), págs. 1-18. DOI: 10.1109/TPAMI.2025.3538711.
 - ⁵ Philip Saponaro et al. «Material classification with thermal imagery». En: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015, págs. 4649-4656.

objetos observados⁶.

La radiación emitida por los objetos sufre pérdidas en su trayecto hacia el sensor. Estas pérdidas son conocidas como atenuación del medio, o para nuestro caso, atenuación atmosférica, que se modelan mediante la ley de Beer-Lambert⁷, donde el coeficiente de atenuación espectral cuantifica la disminución de la intensidad en función de la distancia y las propiedades ópticas del medio⁸. Este efecto podría recrearse con técnicas de renderizado, que emplean cálculos numéricos para generar imágenes sintéticas a partir de modelos tridimensionales. Así, estas herramientas simulan las interacciones entre objetos en la escena, junto a sus propiedades.

La adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango LWIR enfrenta múltiples desafíos. Entre ellos destacan el alto costo de los sensores, la necesidad de enfriamiento para reducir el ruido térmico, la complejidad de la calibración radiométrica o la absorción atmosférica⁹; además, la cantidad de bases de datos públicas es limitada, dificultando la validación de algoritmos de procesamiento de datos espectrales. Con el fin de abordar estas limitaciones, el presente trabajo propone la implementación de un simulador de adquisición de imágenes hiperespectrales LWIR basado en técnicas de renderizado realista, construido sobre el motor de renderizado Mitsuba 3. El simulador integra modelos de emisividad espectral, absorción atmosférica y atenuación espectral para generar escenas tridimensionales controladas. En la

⁶ Albert Adibekyan. «High-accuracy spectral emissivity measurement for industrial and remote sensing applications». Tesis doct. Wuppertal, Univ., Diss., 2016.

⁷ Suman Ghosh y Sumit Nandi. «A Comprehensive Review on UV-Visible Spectroscopy and Its Application». En: *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)* 12.1 (2024).

⁸ Sylvain Girard, Vincenzo De Michele y Adriana Morana. «Spectroscopic studies of radiation effects on optical materials». En: *Spectroscopy for Materials Characterization* (2021), págs. 229-251.

⁹ Nagase et al., ver n. 4.

validación del prototipo se contrastaron escenas sintetizadas contra modelos teóricos de radiancia, obteniendo resultados consistentes que evidencian la correcta reproducción de firmas espectrales y dependencias geométricas. Estos experimentos demostraron que el simulador es capaz de cuantificar el balance entre precisión y tiempo de cómputo, haciéndolo cuantificable y reproducible.

Con esta herramienta, se espera impulsar el desarrollo de soluciones robustas en visión por computadora y detección remota en el dominio de imágenes hiperespectrales LWIR.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un simulador para la adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango del infrarrojo de onda larga (LWIR) a partir de escenarios 3D con propiedades físicas como temperatura y emisividad, considerando la absorción de la luz generada por su propagación a través de la atmósfera.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar escenarios 3D con objetos que incluyan propiedades físicas relevantes para el rango del infrarrojo de onda larga (LWIR) como temperatura y emisividad espectral de los materiales.
2. Modelar la propagación de la radiación térmica emitida por los objetos del escenario 3D y su interacción con la atmósfera, considerando efectos de absorción.
3. Implementar en Python un algoritmo para simular la adquisición de imágenes hiperespectrales LWIR a partir de escenarios 3D modelados utilizando librerías especializadas en renderización y computación científica.
4. Validar el simulador por medio de datos experimentales o modelos teóricos disponibles, evaluando la precisión de la simulación en función de la respuesta espectral obtenida y su coherencia con los fenómenos físicos asociados.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. IMÁGENES ESPECTRALES

Las imágenes espectrales contienen una cantidad considerable de longitudes de onda (λ) por cada píxel de la imagen, como se observa en la Figura 1. Estas imágenes condensan información que está más allá de lo que el ojo humano o cámaras convencionales pueden captar, y son muy útiles en campos como la medicina, la agricultura, la segmentación de materiales, entre otros.¹⁰

Este tipo de imágenes se obtienen mediante sensores especializados con la capacidad de discriminar múltiples longitudes de onda en diferentes rangos, que incluyen el visible e infrarrojo cercano (VNIR), el infrarrojo de onda corta (SWIR), el infrarrojo de onda media (MWIR) y el LWIR, como se muestra en la Figura 2. Existen dos tipos de imágenes espectrales: las multiespectrales y las hiperespectrales. Las primeras son más limitadas, ya que contienen entre 3 y 10 longitudes de onda; a diferencia de estas, las hiperespectrales contienen información de cientos e incluso miles de longitudes de onda (véase la Figura 1), ofreciendo así un nivel de detalle más profundo.

¹⁰ Anuja Bhargava et al. «Hyperspectral imaging and its applications: A review». En: *Heliyon* 10.12 (2024).

¹¹ Gerrit Polder, Erik Pekkeriet y Marco Snickers. «A Spectral Imaging System for Detection of Botrytis in Greenhouses». En: jul. de 2013.

¹² Dimitris Manolakis et al. «Longwave Infrared Hyperspectral Imaging: Principles, Progress, and Challenges». En: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 7.2 (2019), págs. 72-100. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2889610.

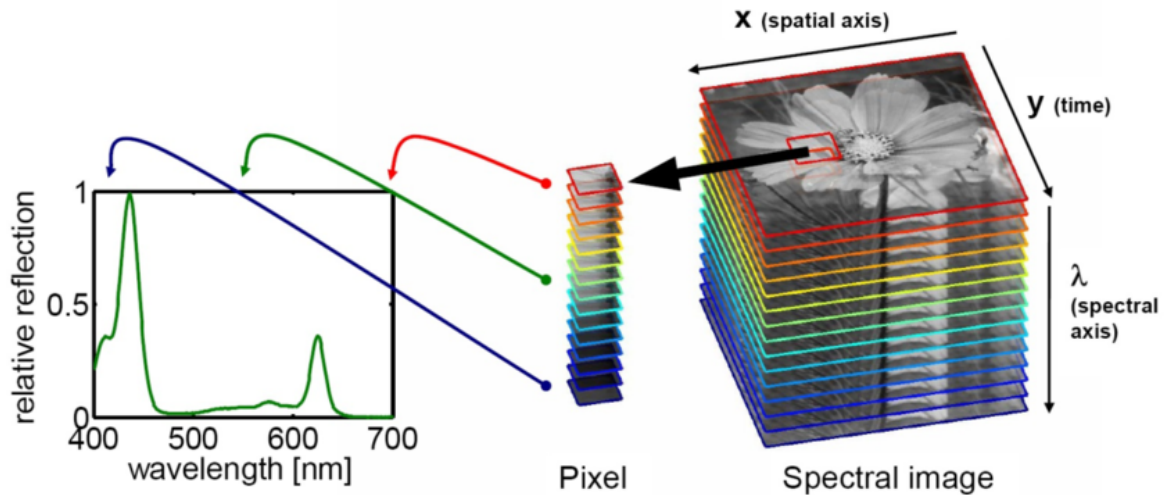


Figura 1. Ejemplo de un cubo de datos para una imagen hiperespectral, con su respectiva firma hiperespectral centrada en un píxel ¹¹.

2.2. IMÁGENES TÉRMICAS

Las imágenes térmicas son imágenes obtenidas en el LWIR, que contienen información sobre la energía térmica de los objetos. Permiten visualizar la radiación emitida por el objeto, que depende de su temperatura y capacidad para emitir energía radiante, y está descrita por la ley de Planck¹³. Como se observa en la Figura 2, tanto en el VNIR como en el SWIR domina la capacidad reflectiva de los materiales; en el rango MWIR experimenta una mayor atenuación de la radiación por el vapor de agua y dióxido de carbono en la atmósfera; en cambio, en el rango LWIR la señal procede íntegramente de la emisión térmica de los objetos. Esta característica convierte al LWIR en la opción ideal para obtener mapas de temperatura de alta fidelidad.

¹³ Manolakis et al., ver n. 12.

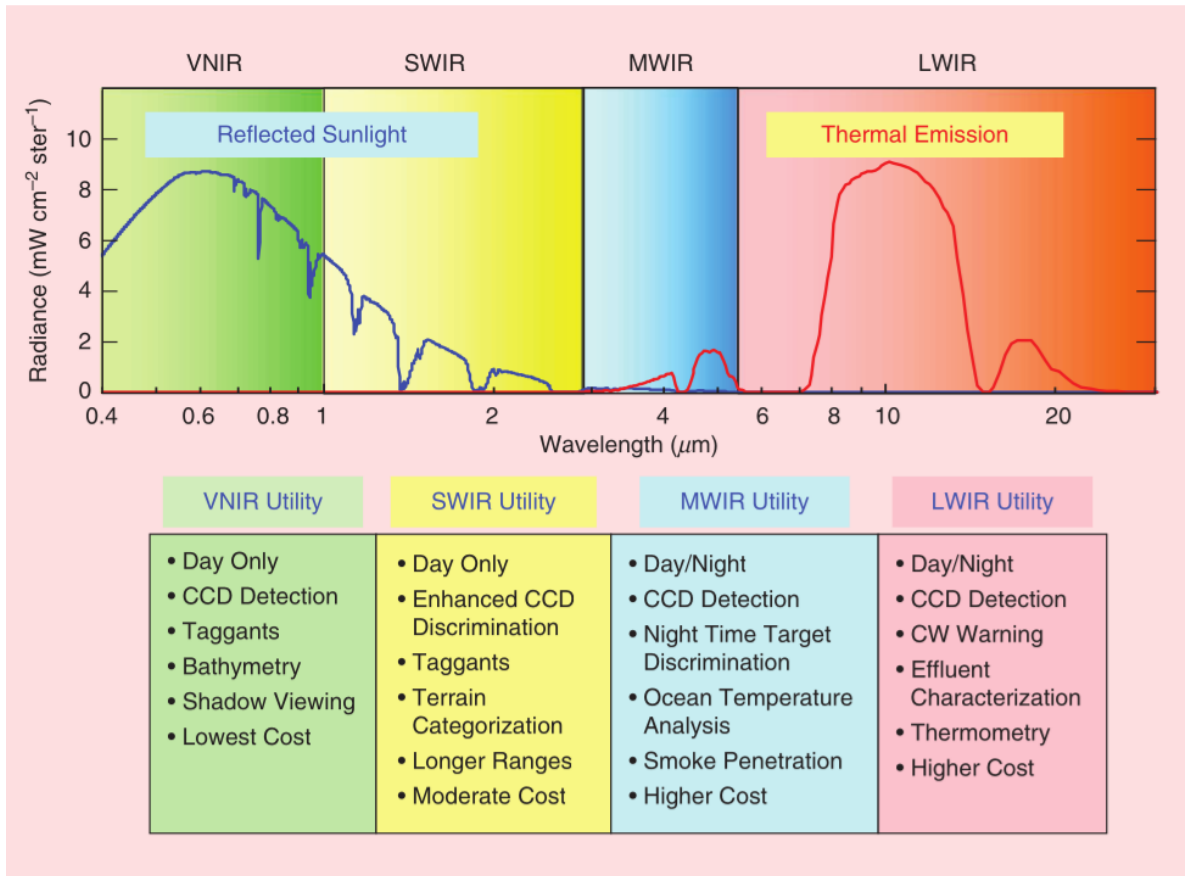


Figura 2. Radiancia espectral de los diferentes rangos VNIR, SWIR, MWIR y el LWIR, mostrando las contribuciones por la reflexión solar de las superficies de la escena y la emisión térmica de los objetos. En el recuadro inferior se presentan las principales aplicaciones en cada rango¹².

2.2.1. Ley de Planck La energía cinética intrínseca asociada al movimiento aleatorio de las partículas es conocida como energía térmica. El constante movimiento de las partículas causa que choquen entre ellas, produciendo variaciones en sus movimientos vibracionales, orbitales o rotacionales; de estos cambios surge la emisión de radiación electromagnética transformando la energía calorífica en energía

radiante.¹⁴

Un cuerpo negro es un material con la capacidad de transformar la energía calorífica en energía radiante lo más rápido posible¹⁵. La radiación espectral de éste se define como la ley de Planck y está dada por:

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right)} - 1}, \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta del emisor, en kelvin, y λ es la longitud de onda, en micrómetros. Se puede observar un ejemplo de la radiancia de un cuerpo negro versus la longitud de onda en la Figura 3.

2.2.2. Emisividad En la práctica, los objetos no son cuerpos negros, sino grises, ya que estos emiten solo una parte de la radiación dada su composición fisicoquímica; además, absorben una parte de la radiación a través de interacciones moleculares. La emisividad de un material, denotada por $\varepsilon(\lambda)$, a una longitud de onda λ (véase la Figura 4) y una temperatura T , se define como una relación entre la radiancia $L(\lambda; T)$ emitida por un cuerpo a una temperatura T y la radiancia $B(\lambda; T)$ emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura¹⁶, es decir:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L(\lambda; T)}{B(\lambda; T)}. \quad (2)$$

¹⁴ Manolakis et al., ver n. 12; David Halliday, Robert Resnick y Jearl Walker. *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, 2013.

¹⁵ Manolakis et al., ver n. 12; Max Planck. «The theory of heat radiation». En: *Entropie* 144.190 (1900), pág. 164.

¹⁶ Gallastegi et al., ver n. 4; Adibekyan, ver n. 6; Manolakis et al., ver n. 12.

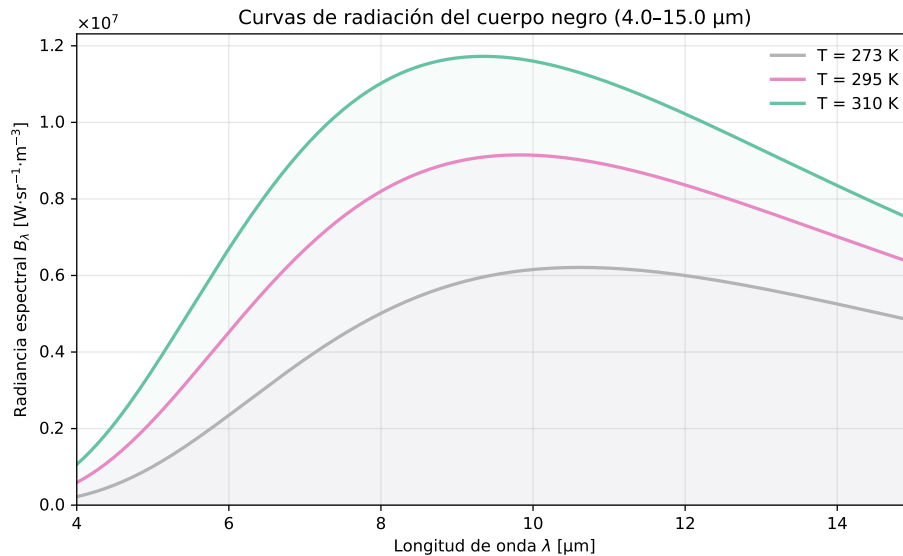


Figura 3. Gráfica de la radiancia versus la longitud de onda basado en la ley de Planck. Imagen realizada por los autores.

Por tanto, la radiación emitida por un material puede expresarse como:

$$L(\lambda; T) = \varepsilon(\lambda)B(\lambda; T). \quad (3)$$

2.2.3. Absorción atmosférica Mientras la radiación electromagnética se propaga desde el objeto hasta el sensor, una parte de la misma es absorbida por el medio de propagación. La relación entre la radiancia emitida por el objeto y la radiancia absorbida por la atmósfera se define como la transmitancia $\tau(\lambda; d)$ ¹⁸. En consecuencia,

¹⁷ Susan K Meerdink et al. «The ECOSTRESS spectral library version 1.0». En: *Remote Sensing of Environment* 230 (2019), pág. 111196.

¹⁸ Gallastegi et al., ver n. 4; Manolakis et al., ver n. 12.

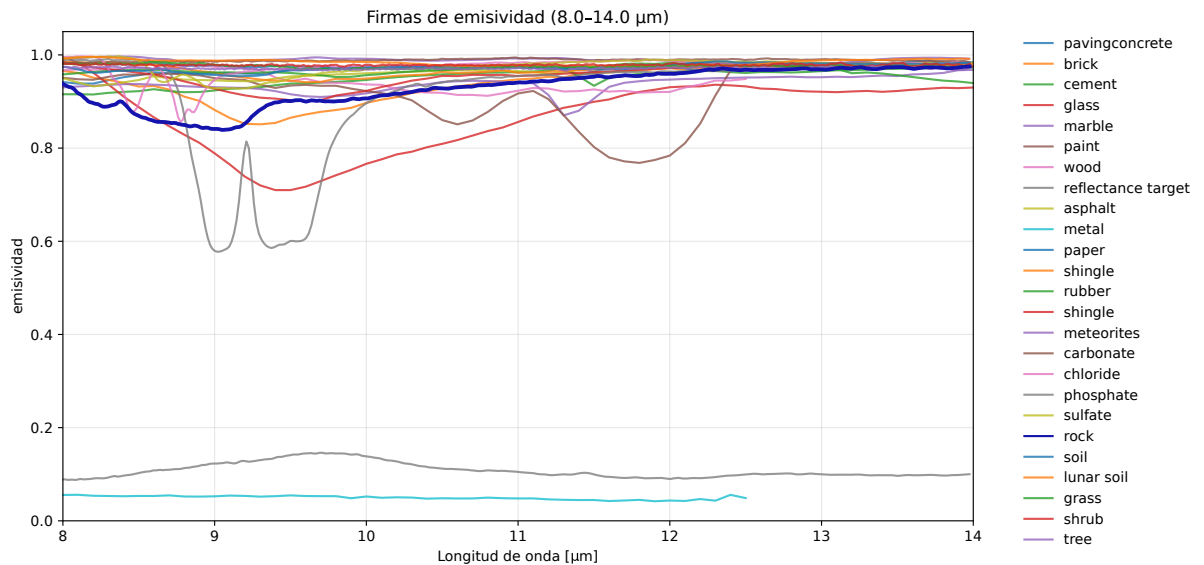


Figura 4. Firma espectral de emisividad para diferentes materiales en un rango de longitudes de onda entre los 8 y los 14 micrómetros, donde se destaca la firma de *rock*, que utilizamos como firma predeterminada. Gráfica generada con datos obtenidos de¹⁷.

la radiancia observada del objeto en un sensor viene dada por:

$$L_{obj} = \tau(\lambda; d)\varepsilon(\lambda)B(\lambda; T). \quad (4)$$

De acuerdo con la ley de Beer-Lambert, la transmitancia $\tau(\lambda; d)$ (véase la Figura 5) de un medio se relaciona directamente con su coeficiente de atenuación espectral $\alpha(\lambda)$ y la distancia óptica d recorrida por la radiación¹⁹, mediante la expresión:

$$\tau(\lambda; d) = 10^{-\alpha(\lambda)d/10}. \quad (5)$$

El coeficiente de atenuación $\alpha(\lambda)$ (véase la Figura 6) es una propiedad fundamental que describe cuánta intensidad de luz se pierde cuando se atraviesa un medio.

¹⁹ Ghosh y Nandi, ver n. 7; Girard, De Michele y Morana, ver n. 8.

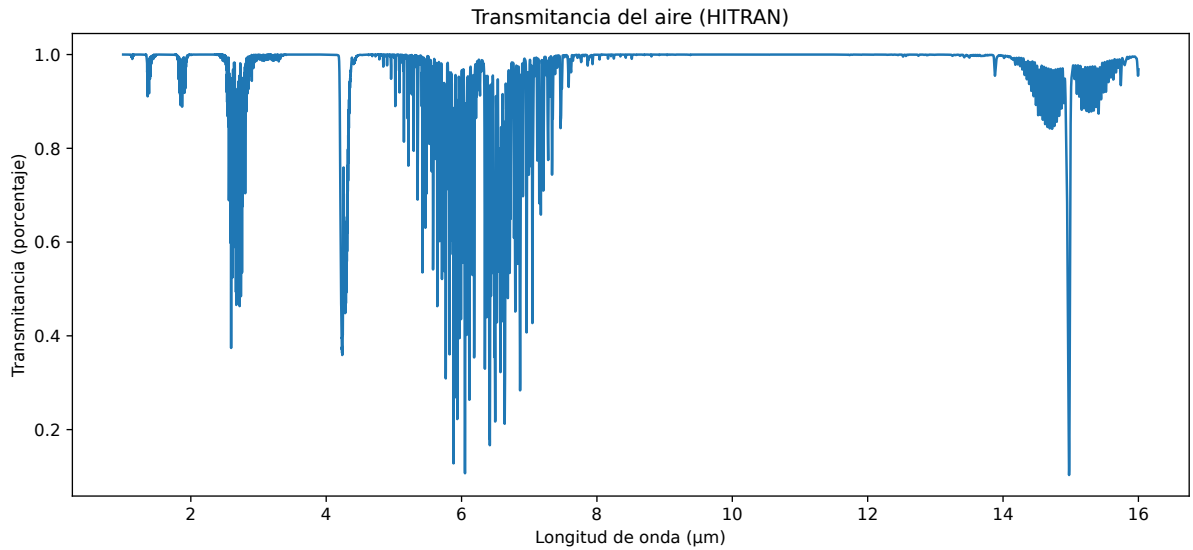


Figura 5. Transmitancia del aire en un rango de longitudes de onda de entre 1 y 16 micrómetros. Gráfico generado con datos obtenidos de²¹.

La intensidad de luz puede perderse cuando la energía luminosa se transforma en térmica o química (absorción) o por la desviación de la luz en varias direcciones dentro del medio (dispersión)²⁰. Experimentalmente, $\alpha(\lambda)$ puede medirse mediante espectroscopía utilizando la fórmula,

$$\begin{aligned} \alpha(\lambda) &= -\frac{10}{d} \log_{10} (\tau(\lambda; d)), \\ &= -\frac{10}{d} \log_{10} \left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

donde $I_0(\lambda)$ es la intensidad de la señal de referencia sin atravesar el medio (o

²⁰ Girard, De Michele y Morana, ver n. 8.

²¹ I. E. Gordon et al. «The HITRAN2020 molecular spectroscopic database». En: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 277, 107949 (ene. de 2022), pág. 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

²² Gordon et al., ver n. 21.

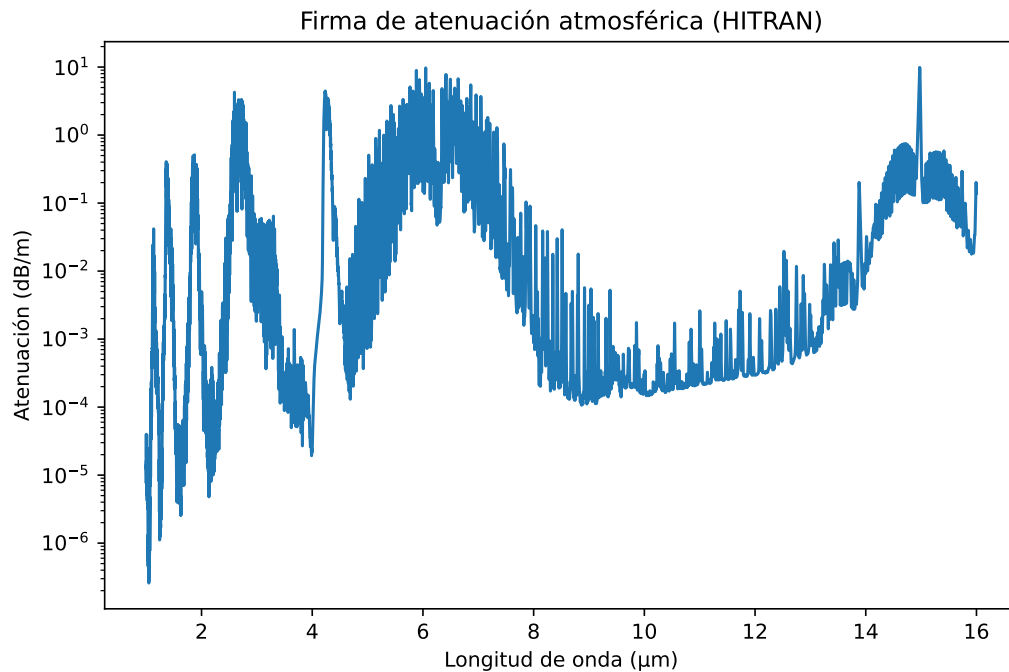


Figura 6. Coeficiente de atenuación del aire en un rango de longitudes de onda de entre 1 y 16 micrómetros y equivalentes a atmósfera de tipo *Mid Latitude Summer* de MODTRAN. Gráfico generado con datos obtenidos de²².

recorrido óptico cero), e $I(\lambda)$ es la intensidad después de que la radiación haya recorrido una distancia óptica d dentro del medio. Las unidades del coeficiente de atenuación están dadas en decibelios por metro $[db/m]$.

La *ECOSystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station* (ECOSTRESS) es una misión lanzada en 2018 con el objetivo de medir la temperatura de la vegetación y comprender mejor la forma en que las plantas responden al estrés hídrico y térmico²³. Como parte de esta misión, se desarrolló la librería espectral *ECOSTRESS Spectral Library*, disponible públicamente, conteniendo información de reflectancia, por cada longitud de onda, creada a partir de una ampliación de la

²³ Meerdink et al., ver n. 17.

librería ASTER²⁴ (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Esta base de datos contiene más de 3000 espectros de laboratorio en el rango de 0.35 a 15.4 μm , que incluyen materiales naturales y artificiales. La librería organiza sus datos en *vegetation, minerals, rocks, y man-made*.

2.2.4. Reflectancia térmica La reflectancia de un material indica la cantidad de radiación que este refleja sin absorberla o transmitirla. Para superficies opacas, la reflectancia espectral $r(\lambda)$ se relaciona con la emisividad como:

$$r(\lambda) = 1 - \varepsilon(\lambda), \quad (7)$$

lo cual se deduce de la ley de Kirchhoff bajo equilibrio térmico local y ausencia de transmisión. Esta relación es clave en el LWIR, pues conecta la fracción emitida por el material con la fracción reflejada de la radiación térmica incidente²⁵.

Como se observa en la Figura 4, las firmas de emisividad no son 1 en todo su espectro, por lo que podemos afirmar que un objeto no sólo emite radiación, sino que también *refleja* o *transmite* radiación térmica procedente del entorno. Asumiendo una transmitancia nula y una superficie lambertiana, es decir, con refracción perfectamente difusa²⁶, además de N fuentes ambientales notables, la contribución reflejada que llega al sensor puede modelarse como:

$$L_{\text{ref}}(\lambda) = \tau(\lambda; d) (1 - \varepsilon(\lambda)) \sum_{i=1}^N \frac{\Omega_i}{\pi} L_{e,i}(\lambda), \quad (8)$$

²⁴ A.M. Baldridge et al. «The ASTER spectral library version 2.0». En: *Remote Sensing of Environment* 113.4 (2009), págs. 711-715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007>.

²⁵ Gallastegi et al., ver n. 4.

²⁶ Matt Pharr, Wenzel Jakob y Greg Humphreys. *Physically based rendering: From theory to implementation*. MIT Press, 2023.

donde $L_{e,i}(\lambda)$ es la radiancia térmica emitida por la i -ésima fuente ambiental (por ejemplo, cielo “downwelling”²⁷), y Ω_i es el ángulo sólido que dicha fuente subtende visto desde el objeto. El factor Ω_i/π es una constante que representa una superficie lambertiana.

Con esto, el modelo de transferencia radiativa que llega al sensor queda compuesto por tres términos: emisión del objeto ($L_{obj}(\lambda)$), reflexión del entorno ($L_{ref}(\lambda)$) y emisión a lo largo del trayecto (aire, $L_{air}(\lambda)$):

$$\begin{aligned}
 L_{obs}(\lambda) &= L_{obj}(\lambda) + L_{ref}(\lambda) + L_{air}(\lambda) \\
 &= \tau(\lambda; d) \varepsilon(\lambda) B(\lambda; T) + \tau(\lambda; d) (1 - \varepsilon(\lambda)) \sum_{i=1}^N \frac{\Omega_i}{\pi} L_{e,i}(\lambda) + \dots \quad (9) \\
 &\dots + (1 - \tau(\lambda; d)) B(\lambda; T_{air}).
 \end{aligned}$$

2.3. RENDERIZADORES DE IMÁGENES

El renderizado fotorealista busca generar imágenes a partir de escenas tridimensionales sintéticas que resulten visualmente indistinguibles de fotografías reales²⁸. Para lograrlo, el renderizador necesita ser capaz de simular con precisión la naturaleza de la luz y su interacción con otros objetos que tengan determinadas propiedades físicas, en entornos virtuales. Esto implica modelar tanto la iluminación directa como indirecta, efectos ópticos complejos y la respuesta de cada superficie a la luz incidente²⁹.

²⁷ Gallastegi et al., ver n. 4.

²⁸ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26.

²⁹ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26.

2.3.1. Trazado de rayos Uno de los enfoques más utilizados para obtener resultados físicamente creíbles es el trazado de rayos (*ray tracing*), una técnica de renderizado que simula el trayecto de los rayos de luz desde una cámara virtual a través de un escenario tridimensional. Como se ve en la Figura 7, por cada píxel de la imagen, emerge un rayo que atraviesa el escenario y se calcula su intersección con el objeto más cercano. Este píxel adquiere el color de la superficie interceptada³⁰.

Este enfoque no solo resuelve la visibilidad de los objetos, sino que también permite simular con precisión sombras, reflejos especulares, refracciones y efectos de iluminación global³¹. Una de las extensiones más utilizadas en el trazado de rayos es el *path tracing*, un algoritmo basado en Monte Carlo que simula rebotes de luz y que permite obtener información más compleja de la escena³².

2.3.2. Ecuación de renderizado y BRDF El fundamento matemático de estos métodos es la ecuación de renderizado formulada por Kajiya en 1986³⁴, que modela la radiancia saliente en un punto como la suma de la radiancia emitida por el material y la luz reflejada proveniente de todas las direcciones del entorno. Utilizando una

³⁰ James D Foley. *Computer graphics: principles and practice*. Vol. 12110. Addison-Wesley Professional, 1996.

³¹ NVIDIA Developer. *Ray Tracing*. <https://developer.nvidia.com/discover/ray-tracing>. Accessed on 26 de abril de 2025. 2024.

³² Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26; Wenzel Jakob et al. *Mitsuba 3 renderer*. Ver. 3.1.1. <https://mitsuba-renderer.org>. 2022.

³³ NVIDIA Developer, ver n. 31.

³⁴ James T Kajiya. «The rendering equation». En: *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Association for Computing Machinery, 1986, págs. 143-150.

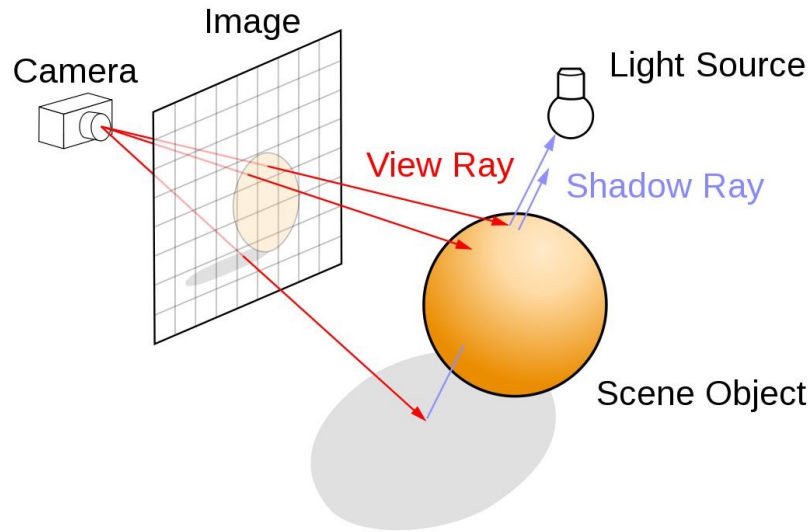


Figura 7. Ejemplo básico de renderizado por *ray tracing*, con un rebote. Aquellos rayos que, en un solo rebote, sean capaces de llegar a la fuente de iluminación, «colorean» la imagen con el color de la superficie; mientras tanto, aquellos que deban atravesar una superficie para llegar a la fuente de iluminación, se consideran sombras. Imagen obtenida de³³

interpretación más moderna del libro *Physically Based Rendering*³⁵, tenemos:

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_{S^2} f_r(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i| d\omega_i, \quad (10)$$

donde L_o representa la radiancia saliente en la dirección ω_o , L_e la radiancia emitida por el punto p , f_r la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF, del inglés *bidirectional reflectance distribution function*), L_i la radiancia incidente desde la dirección ω_i , θ_i el ángulo entre ω_i y la normal en p y S^2 el hemisferio de direcciones sobre el punto p .

La BRDF f_r , representada en la Figura 8, describe cómo cada superficie refleja luz en función de la dirección incidente y saliente, y permite modelar materiales con

³⁵ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26.

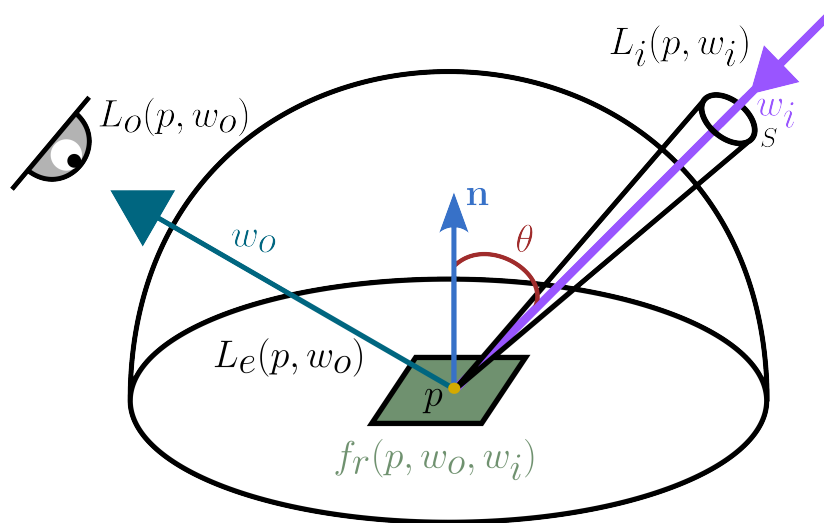


Figura 8. La función de renderizado nos muestra que la radiación observada desde un punto p en una dirección w_o es igual a la radiación emitida en el punto p en dirección de la dirección w_o y la suma de la radiación incidente en la semiesfera que llega al punto p y es redirigida en dirección w_o gracias a la BRDF. Imagen creada por los autores.

comportamiento difuso, especular o intermedio (*glossy*)³⁶. En la práctica, muchas superficies reales presentan irregularidades microscópicas que dispersan o refractan la luz según patrones característicos. Para simular estas interacciones, los algoritmos de *path tracing* utilizan técnicas de muestreo específicas para cada tipo de material³⁷.

2.3.3. Integración por Monte Carlo Muchas veces, la integración directa no es posible, y esto es especialmente cierto en integrales como la de la Ecuación de renderizado (10). En estos casos, solo quedan como alternativas simplificar el problema o utilizar integración numérica. El método de Monte Carlo permite la integración uti-

³⁶ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26.

³⁷ Junjie Wang. «Polarization and Hyperspectral Imaging for Synthetic Scene Rendering». Tesis de maestría. Purdue University, 2023.

lizando muestreos aleatorios sobre la integral³⁸. En el caso del renderizado, en cada rebote del rayo, se escoge una dirección aleatoria; según la BRDF del material, se mide la radiancia incidente desde esta dirección y se acumula su contribución ponderada por el ángulo de incidencia. Esta ecuación puede escribirse³⁹ como:

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, w_o) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{f_r(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) |\cos \theta_i|}{\rho(w_i)}, \quad (11)$$

donde $\rho(w_i)$ es la función de distribución de probabilidad en la dirección incidente ω_i , y el resto de términos se mantienen iguales a la Ecuación (10). Así, pasamos de hacer una integración infinita sobre la escena a una cantidad N de puntos. Entre más puntos N se simulen, mejor será la aproximación y menor será el ruido⁴⁰.

2.4. MOTORES DE RENDERIZADO

2.4.1. Mitsuba 3 Mitsuba es un motor de renderizado modular orientado a la investigación, con una arquitectura basada en *plugins* haciéndolo fácilmente extensible⁴¹. Este se encuentra escrito en C++ y cuenta con una librería de importación en Python. Entre sus características se encuentra la asignación de firmas de emisividad y coeficiente de decaimiento, relacionado con la atenuación del aire; estas características luego pueden ser utilizadas para renderizar en todo el espectro asignado o secciones de él. Otro de los puntos clave de Mitsuba es la capacidad de asignar las propiedades como la firma de emisividad a objetos, a través del comple-

³⁸ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26.

³⁹ Pharr, Jakob y Humphreys, ver n. 26; Wang, ver n. 37.

⁴⁰ Wang, ver n. 37.

⁴¹ Jakob et al., ver n. 32.



Figura 9. Ejemplo de emisor tipo *area* (izquierda), *spot* (centro) y *directional* (derecha). Imagen creada por los autores.

mento de emisores, característica que podemos utilizar para simular la emisión del cuerpo negro. Podemos ver un ejemplo en la Figura 9, donde se pueden observar algunos de los medios emisivos más importantes de Mitsuba, aunque no son los únicos.

El corazón de Mitsuba es *Dr.Jit* (JIT del inglés *Just-In-Time*), un motor de compilación en tiempo de ejecución para un renderizado diferenciable⁴². Este toma el código escrito en lenguaje de alto nivel (como Python), lo simplifica y genera unos núcleos de cálculo paralelos para CPU o GPU, utilizando el método de Monte Carlo para el renderizado. Para controlar la cantidad de muestras a simular, Mitsuba cuenta con el concepto de los *samples per pixel*, o *spp*, por sus siglas. Por cada píxel que hay en el sensor, simula n rayos, donde n es el valor asignado al *spp*.

2.4.2. Blender Blender es un software de código abierto que integra múltiples funciones, tales como animación, modelado 3D, edición de video y composición.

⁴² Wenzel Jakob et al. «Dr.Jit: A Just-In-Time Compiler for Differentiable Rendering». En: *Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)* 41.4 (jul. de 2022). DOI: 10.1145/3528223.3530099.

Entre sus capacidades se encuentra el renderizado de imágenes tridimensionales y la manipulación detallada de escenas. Para ello, incluye diversos motores de renderizado como Cycles y OptiX, además de permitir la incorporación de otros a través de complementos⁴³.

Gracias a su capacidad de extensibilidad, Blender admite la definición de propiedades avanzadas de materiales y escenas, tales como texturas, parámetros físicos y modelos BRDF. Estas características pueden ser aprovechadas por motores externos, como Mitsuba, mediante el uso de extensiones específicas, como *mitsuba-blender*, que permiten exportar las escenas creadas en Blender a un formato compatible con Mitsuba⁴⁴. De esta forma, Blender se convierte en una herramienta fundamental para la construcción y edición de escenarios tridimensionales, que posteriormente se pueden utilizar para diversas tareas en motores externos.

⁴³ Mitsuba Renderer Documentation. *Integration plugins – Blender plugin by Bartosz Styperek and Francesc Juhé*. Mitsuba documentation web page.

⁴⁴ Francesc Juhé y Bartosz Styperek. *Mitsuba integration add-on for Blender*. GitHub repository, mar. 2024.

3. MÉTODO PROPUESTO

En este trabajo se desarrolló un simulador de adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango del infrarrojo de onda larga (LWIR), orientado a escenarios tridimensionales con propiedades físicas definidas. El simulador cuenta con la capacidad de modelar la emisión térmica de los objetos en función de su temperatura, reflectividad y emisividad, junto con los efectos de absorción atmosférica que afectan la propagación de la radiación así como el aporte de la misma. De esta manera, podemos recrear condiciones cercanas a las de un sistema de captura real, sin necesidad de recurrir a sensores costosos o a procesos experimentales complejos.

Adicionalmente, se diseñó un flujo de trabajo en Python que simplifica la construcción de escenas, la configuración de parámetros y la generación de cubos hiperespectrales. Esto brinda la posibilidad de explorar variaciones de temperatura, emisividad y condiciones del medio, evaluando su efecto en la imagen resultante. Los resultados se presentan mediante gráficas espectrales, visualizaciones de intensidad en distintas longitudes de onda y comparaciones frente a modelos teóricos, lo que proporciona una representación completa y flexible de la radiación térmica y su propagación en escenarios 3D.

El método propuesto consiste en una plataforma robusta que integra la creación de escenas en Blender, exportándolas gracias al *plugin Mitsuba-Blender* hacia Mitsuba, la asignación de propiedades físicas a los materiales y la simulación espectral. A través de este proceso, se modela la radiación térmica emitida por los objetos, la interacción con la atmósfera y la adquisición por un sensor virtual configurado en diferentes rangos espectrales.

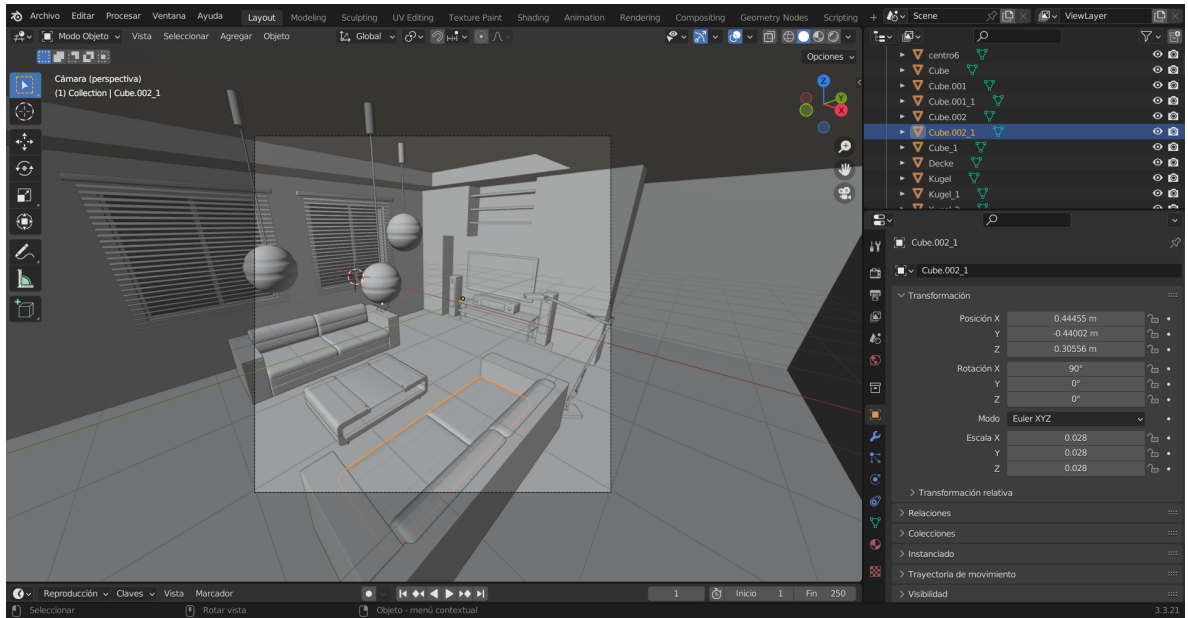


Figura 10. Ejemplo de la creación de una escena de 3D con Blender y su interfaz gráfica.

3.1. CREACIÓN DE ESCENARIOS 3D

La construcción de los escenarios que servirán como base para la simulación de la adquisición de imágenes hiperespectrales LWIR tuvo como objetivo disponer de entornos virtuales representativos de un sistema real, asignándole propiedades físicas a los objetos dentro del escenario incluyendo: la temperatura, la emisividad espectral $\varepsilon(\lambda)$ y su disposición dentro del escenario 3D; además, es posible asignar en el medio una firma de atenuación atmosférica $\alpha(\lambda)$.

En una primera instancia, se emplea Blender para organizar y definir la escena. Para esto, se realiza la importación de modelos 3D en formatos estándar, la aplicación de transformaciones geométricas a objetos y cámara, y la verificación de escala (véase la Figura 10). Una vez definidos, los escenarios se exportan a un formato compatible con Mitsuba 3 gracias a la ayuda de una herramienta que permite integrarla con Blender, llamada *Mitsuba-Blender*.

3.2. MODELADO DE RADIACIÓN TÉRMICA EN ESCENARIOS LWIR

Partiendo de la Ecuación (9), podemos extraer $L_{air}(\lambda)$, conocida como el aporte del aire a la medición como:

$$L_{air}(\lambda) = (1 - \tau(\lambda; d)) B(\lambda, T_{air}), \quad (12)$$

pudiéndose descomponer los términos con el fin de separar cada uno en una renderización como:

$$L_{air}(\lambda) = B(\lambda, T_{air}) - \tau(\lambda; d) B(\lambda, T_{air}), \quad (13)$$

de donde sabemos que $\tau(\lambda; d)$ es la transmitancia del medio, presentada originalmente en la Ecuación (5); sin embargo, por la forma en la que Mitsuba modela la transmitancia, debemos expresarlo como:

$$\tau(\lambda; d) = e^{-\alpha'(\lambda) d}. \quad (14)$$

Aquí, $\alpha'(\lambda)$ corresponde a la firma de atenuación empleada por Mitsuba. Para mantener consistencia con la definición original de la atenuación espectral $\alpha(\lambda)$ introducida en la Ecuación (6), ambas se vinculan mediante la relación:

$$\alpha'(\lambda) = \frac{\ln 10}{10} \alpha(\lambda). \quad (15)$$

De esta manera, la adaptación no supone un cambio conceptual, sino únicamente una reformulación necesaria para compatibilizar el modelo físico con la implementación de Mitsuba.

Mitsuba presenta ciertas limitaciones, en particular para simular de manera directa el aporte del aire $L_{air}(\lambda)$, teniendo así que descomponerla como se observa en la Ecuación (13), y haciendo una renderización por cada término de esta. Teniendo la

ecuación completa, es posible renderizar por separado cada uno de los términos sumándolos en la siguiente ecuación:

$$L_{obs}(\lambda) = [L_{obj}(\lambda) + L_{ref}(\lambda)] + B(\lambda, T_{air}) - \tau(\lambda; d)B(\lambda, T_{air}). \quad (16)$$

La radiación de cada objeto junto a la radiación reflejada por los otros objetos, $L_{obj}(\lambda) + L_{ref}(\lambda)$, puede ser renderizada directamente haciendo ajuste de parámetros en la escena. En cuanto a la radiación del cuerpo negro del aire, $B(\lambda, T_{air})$, debido a que Mitsuba no integra medios emisivos, se aproxima asignando un emisor global a la escena a la temperatura del aire. Para poder simular $\tau(\lambda; d)B(\lambda, T_{air})$ se crea una escena tal cual la original con el medio atenuante, con la singularidad de que todos los objetos de la escena emiten a temperatura del medio, simulando un aporte del aire proporcional a la cantidad del mismo entre el sensor y cada objeto; por último, queda completar la observación juntando las tres renderizaciones. En la Figura 11 se observa un ejemplo de la renderización de cada término y en la Figura 12 el resultado al unirlos como en la Ecuación (16).

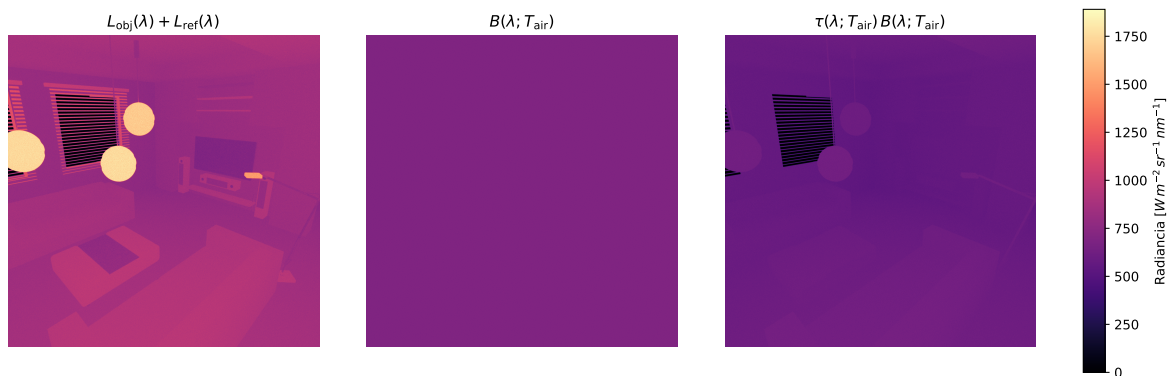


Figura 11. Componentes individuales renderizados necesarios para armar la medición completa del sensor, en una longitud de onda $\lambda = 10\mu m$. Imagen generada por los autores.

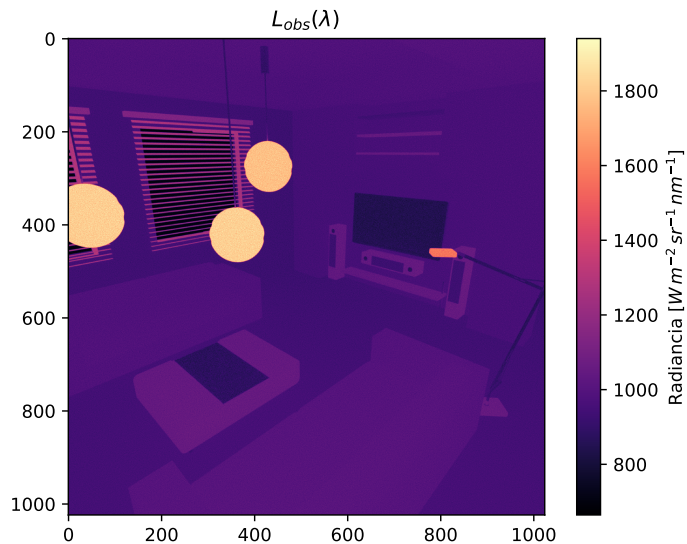


Figura 12. Imagen de radiancia renderizada a $\lambda = 10\mu m$, generada por los autores.

3.3. CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS 3D

Al importar una escena desde *Blender*, la herramienta inicializa una configuración básica que permite obtener el primer render. Por defecto, se asigna una resolución de 256×256 píxeles, un muestreo de 256 spp y un emisor de luz ambiental, que nos garantiza una renderización inicial en *RGB*.

Esta configuración inicial no es suficiente para generar los datos de radiancia. A partir del mismo escenario, se definen cinco configuraciones de simulación adicionales: una escena térmica $L_{obj}(\lambda) + L_{ref}(\lambda)$, la radiancia del cuerpo negro del aire $B(\lambda; T_{air})$, la emisividad del aire $T(\lambda)B(\lambda; T_{air})$, un mapa de profundidad (en metros) y una última para generar el mapa de temperatura. Para un ejemplo de las primeras 3, véase la Figura 11 y para los últimos 2, véase la Figura 13.

Los valores iniciales de la aplicación corresponden a 300 K para los objetos, 280 K para el aire, la firma de atenuación atmosférica vista en la Figura 6 y firma de emisividad “rock” observada en la Figura 4. Posteriormente, se realiza un muestreo

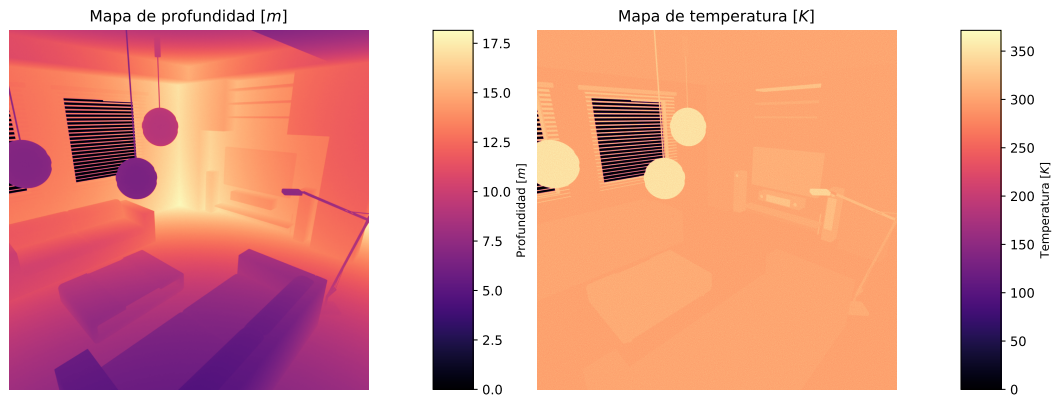


Figura 13. Renderizaciones adicionales de mapa de temperatura y profundidad. Imagen generada por los autores.

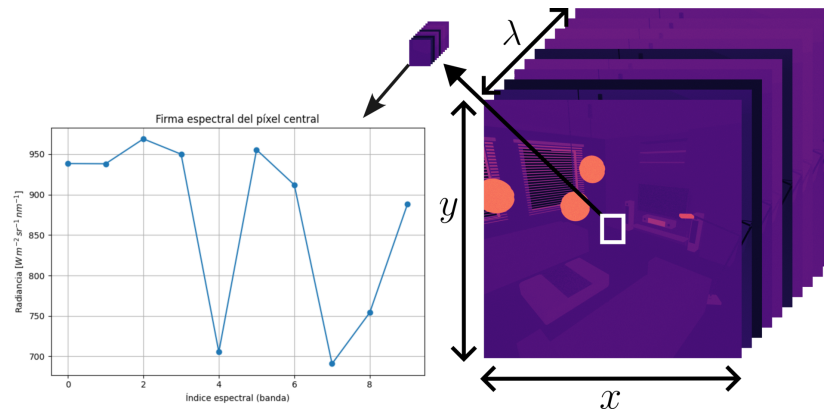


Figura 14. Cubo espectral generado por la herramienta. Imagen generada por los autores.

espectral de 10 mediciones equiespaciadas en el rango $10\text{--}12\ \mu\text{m}$, con las que el software construye un cubo espectral preliminar (véase la Figura 14).

Una vez realizada la configuración inicial, el usuario puede modificar los valores de las temperaturas, las firmas de emisividad por objetos, la temperatura del medio y la firma de atenuación. El software proporciona además una lista de firmas de emisividad y atenuación por defecto que el usuario puede seleccionar.

Configurada la escena, esta se descompone en configuraciones estándar que permitan estimar de forma independiente cada una de las contribuciones radiométricas.

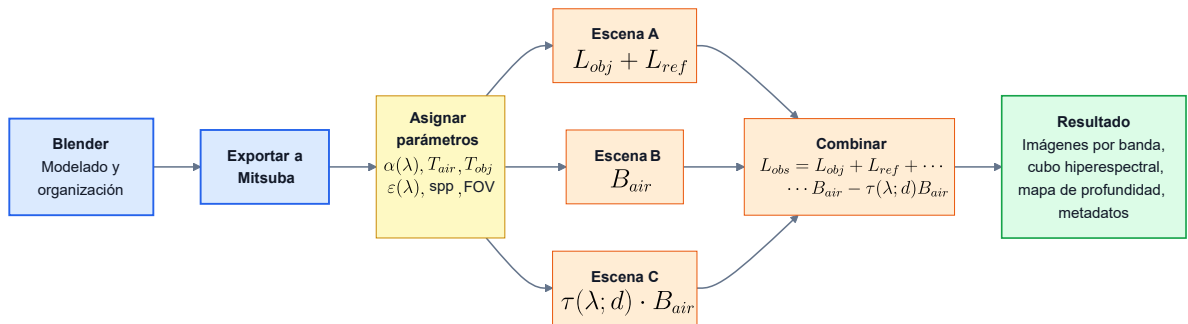


Figura 15. Flujo de trabajo del renderizador. Acá podemos observar la secuencia esperada al renderizar una escena: Creación del escenario, asignación de parámetros, procesamiento de datos, y obtención de los resultados. Imagen generada por los autores.

Estas contribuciones se unen más adelante para obtener el valor de la radiancia final observada por cada una de las bandas. Podemos observar un resumen del flujo en la Figura 15.

3.4. IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON CON MITSUBA 3

3.4.1. *Backend* con FastAPI :

La Figura 16 muestra un diagrama de clases simplificado del backend. Allí se aprecia la organización modular: *ObjService*, *RenderService* y *SceneService* concentran la lógica de negocio y actúan como orquestadores; estos, a su vez, delegan tareas a utilidades del núcleo de *mitsuba_core* (por ejemplo, *ObjectUtils* para manejo espectral, *RenderRGB/Thermal/Depth* para las modalidades de render, y *SceneParser* para la conversión entre estructuras Python y representaciones de Mitsuba en XML). En el lado de los orquestadores, *ObjService* se encarga de tareas tales como actualización de firmas de emisividad y temperatura de los objetos, devolver la lista de emisividades predeterminadas y el retorno de información de los objetos. *RenderService* concentra todas las tareas a la hora de renderizar, llamando los métodos necesarios para que cada renderización funcione. *SceneService* se encarga de las tareas tales como la carga inicial de escenarios, asignación de los valores

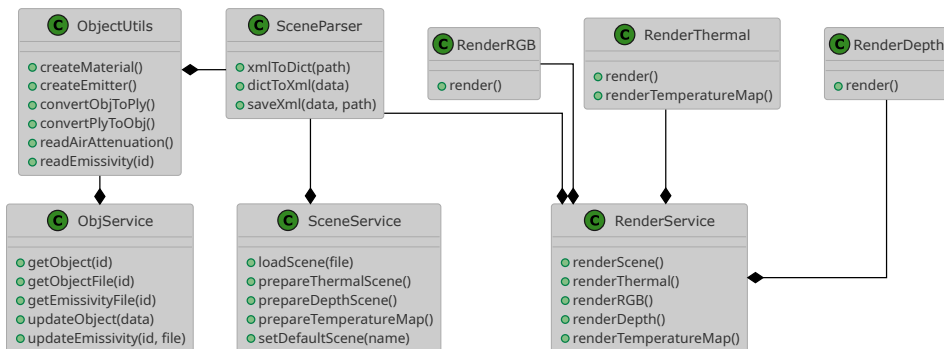


Figura 16. Diagrama de clases simplificado del *backend*. *ObjectUtils* y *ObjService* gestionan objetos, materiales y firmas espectrales. *SceneParser* maneja la entrada y salida de la escena y *SceneService* prepara y modifica las configuraciones en cada escena (térmica, mapa de profundidad, mapa de temperatura). *RenderService* orquesta la ejecución y delega a los módulos especializados *RenderRGB*, *RenderThermal* y *RenderDepth*.

predeterminados, la generación de los *xml* necesarios para las renderizaciones y la generación del *zip* utilizado para guardar el escenario completo.

Todos estos *services* son llamados a su vez por los controladores. Estos los tenemos separados por responsabilidades: el de configuración, renderizado, escenarios y objetos. Ellos se encargan de habilitar la comunicación entre los usuarios y los *services*, mediante API REST.

El *backend* se implementó mediante *FastAPI*, como parte de una arquitectura cliente–servidor cuya finalidad es centralizar la lógica de simulación y permitir la ejecución de procesos de renderizado en máquinas remotas con mayor capacidad computacional. El servidor expone *endpoints* REST que reciben las configuraciones del usuario (parámetros de cámara, propiedades espectrales, archivos de emisividad y atenuación, selección de escena, etc.), que a su vez se validan y normalizan mediante objetos de transferencia de datos (DTO del inglés, *data transfer object*), y orquestan la preparación de la escena y ejecución de los procesos de renderización sobre *Mitsuba 3*.

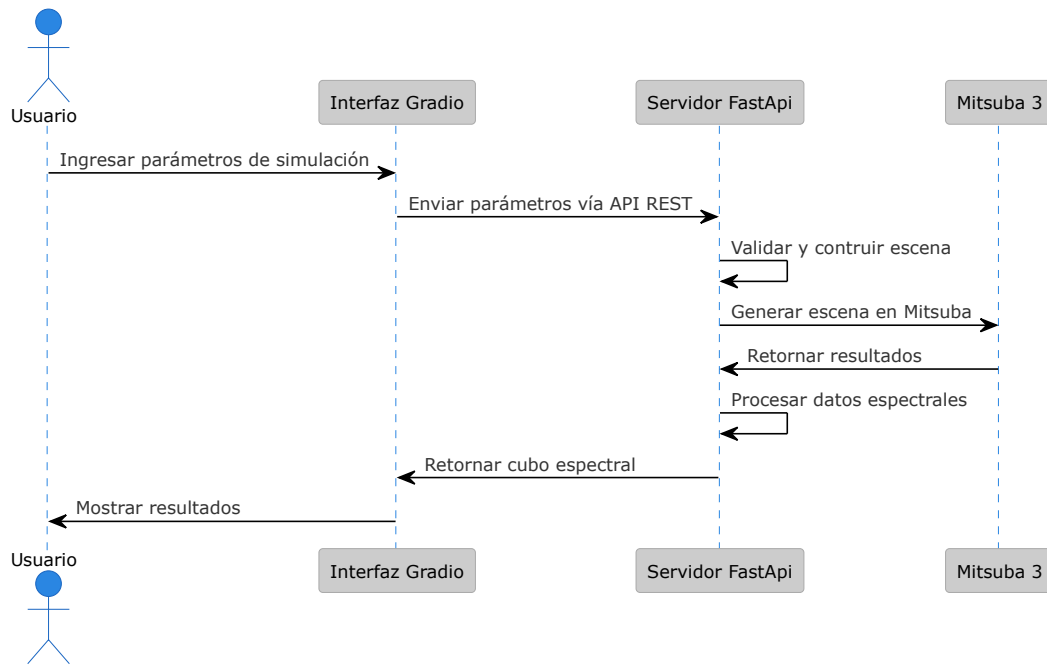


Figura 17. Diagrama de proceso de obtención de un cubo espectral. El usuario ingresa los parámetros de la renderización en la interfaz, que se comunica con el *backend* y este mediante operaciones internas, genera los resultados que son devueltos al *frontend* y este al usuario al final. Imagen generada por los autores.

3.4.2. Frontend con Gradio :

El frontend fue desarrollado con *Gradio*, seleccionado por su capacidad para construir rápidamente interfaces interactivas web que permiten la entrada de parámetros, la carga de archivos y la visualización de resultados de forma accesible. La interfaz actúa como cliente de la API del backend: realiza validaciones básicas en la entrada de datos, envía solicitudes HTTP a los endpoints correspondientes y presenta los resultados (imágenes térmicas, mapas de temperatura, mapas de profundidad, archivos comprimidos de salida) en formatos descargables.

La integración entre frontend y backend se sintetiza en la Figura 17, donde se muestra cómo la interfaz en Gradio comunica parámetros y archivos hacia FastAPI, el cual invoca la lógica de renderizado soportada por *Mitsuba 3*.

El frontend cuenta con cuatro pestañas: “Cargar Escena”, “Visualización”, “Objetos

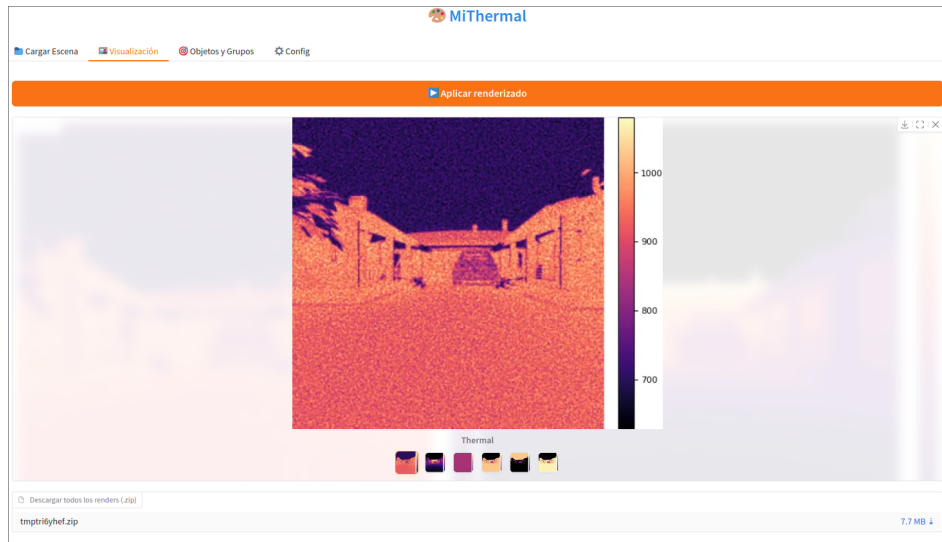


Figura 18. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de renderizado. Imagen generada por los autores.

y grupos” y “Configuración”.

El primero de ellos, “Cargar Escena”, nos permite cargar un escenario ya sea creado por el usuario, como uno de los predeterminados. También permite descargar un archivo comprimido con todos los resultados y el escenario actualmente cargado.

Luego de eso, tenemos la pestaña de visualización. En esta, se muestran todos los *renders* (en la primera banda disponible) que genera la herramienta. Se puede ver un ejemplo de las imágenes generadas observando la Figura 13 y la Figura 11, además del renderizado térmico en la Figura 12.

En la pestaña de “Objetos y grupos”, podemos ajustar la temperatura y emisividad por objeto, o en su defecto, por grupos de objetos. Podemos ver la interfaz de objeto en la Figura 19.

Para finalizar, tenemos el menú de configuración de escena, donde podemos cambiar valores tales como el coeficiente de extinción atmosférica, el número de bandas a renderizar, el rango de bandas espectrales, el tamaño de la imagen, la cantidad de *spp*, etc. Podemos ver el menú en la Figura 20.

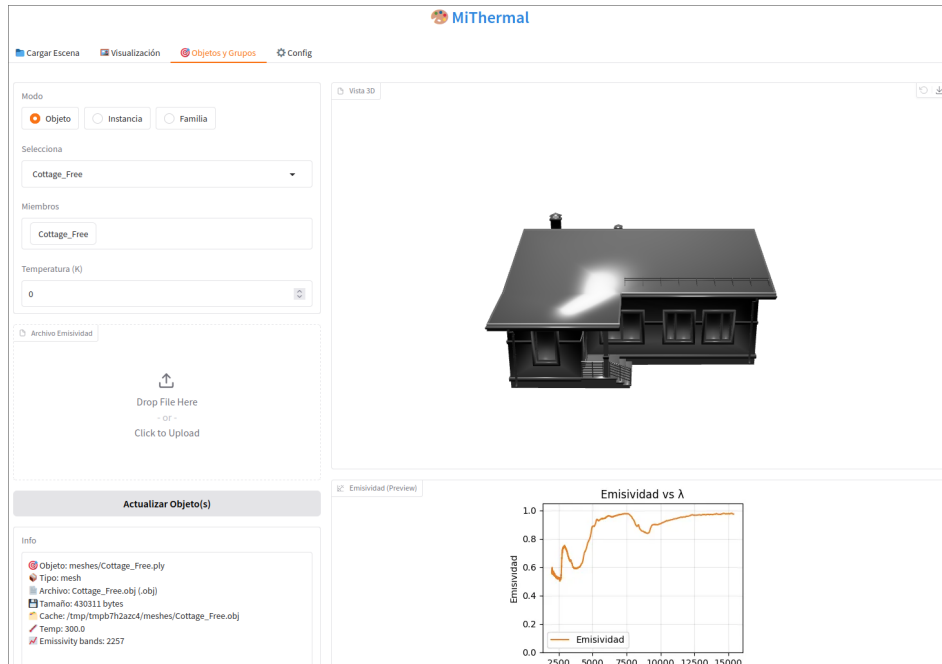


Figura 19. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de modificación de propiedades de los objetos. Imagen generada por los autores.

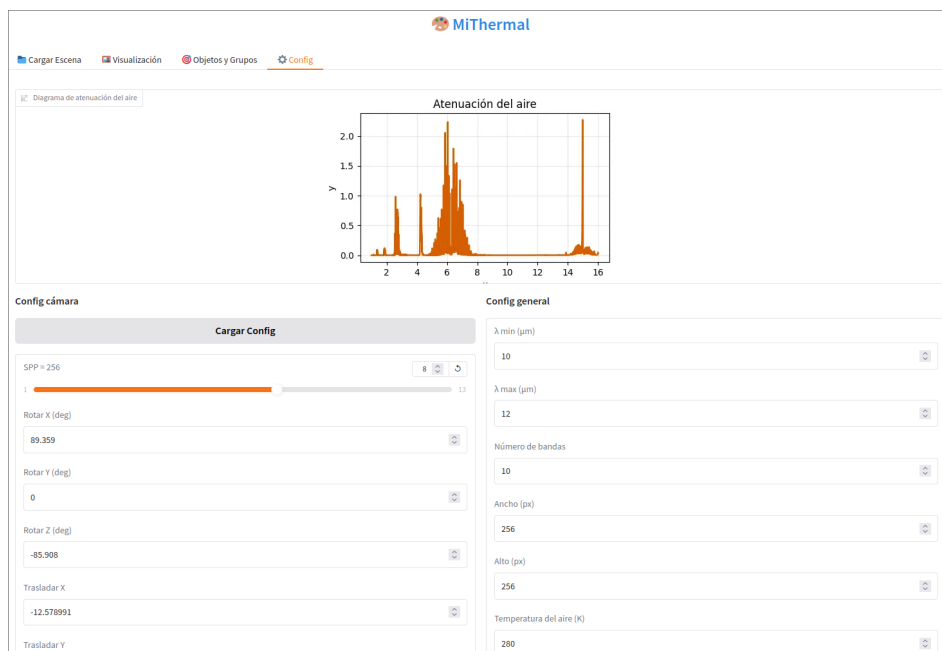


Figura 20. Interfaz del simulador desarrollado en Gradio: menú de configuración de la escena. Imagen generada por los autores.

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En esta sección presentamos las simulaciones realizadas para evaluar el comportamiento radiométrico del simulador propuesto en el rango LWIR con imágenes hiperespectrales. El objetivo es contrastar, bajo condiciones controladas, la radiancia observada por el sensor con su referencia teórica derivada de la ley de Planck, la emisividad espectral del material y la transmitancia del medio, así como estudiar la incidencia de parámetros de captura y de escena sobre la precisión y el costo computacional.

Partimos de escenas construidas en Blender y renderizadas en Mitsuba 3, donde se parametrizan: temperatura de los objetos y del aire, firmas de emisividad y atenuación $\alpha(\lambda)$, distancias ópticas, y la configuración del sensor (número de bandas, resolución, *spp*, AOV y posición de cámara). Los resultados se reportan por banda y por punto de muestreo mediante métricas cuantitativas como el *root mean square error* (RMSE) y visualizaciones de apoyo como gráficas de radiancia.

4.1. VARIACIÓN SOBRE LOS OBJETOS

En el espectro electromagnético, la radiancia de un objeto está determinada por la temperatura, la emisividad y las interacciones con el medio. En esta sección, se analizan exclusivamente variaciones de temperatura y emisividad, y se contrastan los resultados con referencias teóricas, como el que se puede apreciar en la Figura 21. Para aislar estos efectos, se desprecia la contribución de la atmósfera y la atenuación de la atmósfera, asumiendo una transmitancia teórica de $\tau(\lambda) = 1$.

Para realizar el análisis, se fija la distancia a una distancia de aproximadamente 30 metros, el *spp* a 16, 384 y el sensor registra un cubo hiperespectral compuesto por 256×256 píxeles espaciales y 49 bandas equidistantes distribuidas en el rango

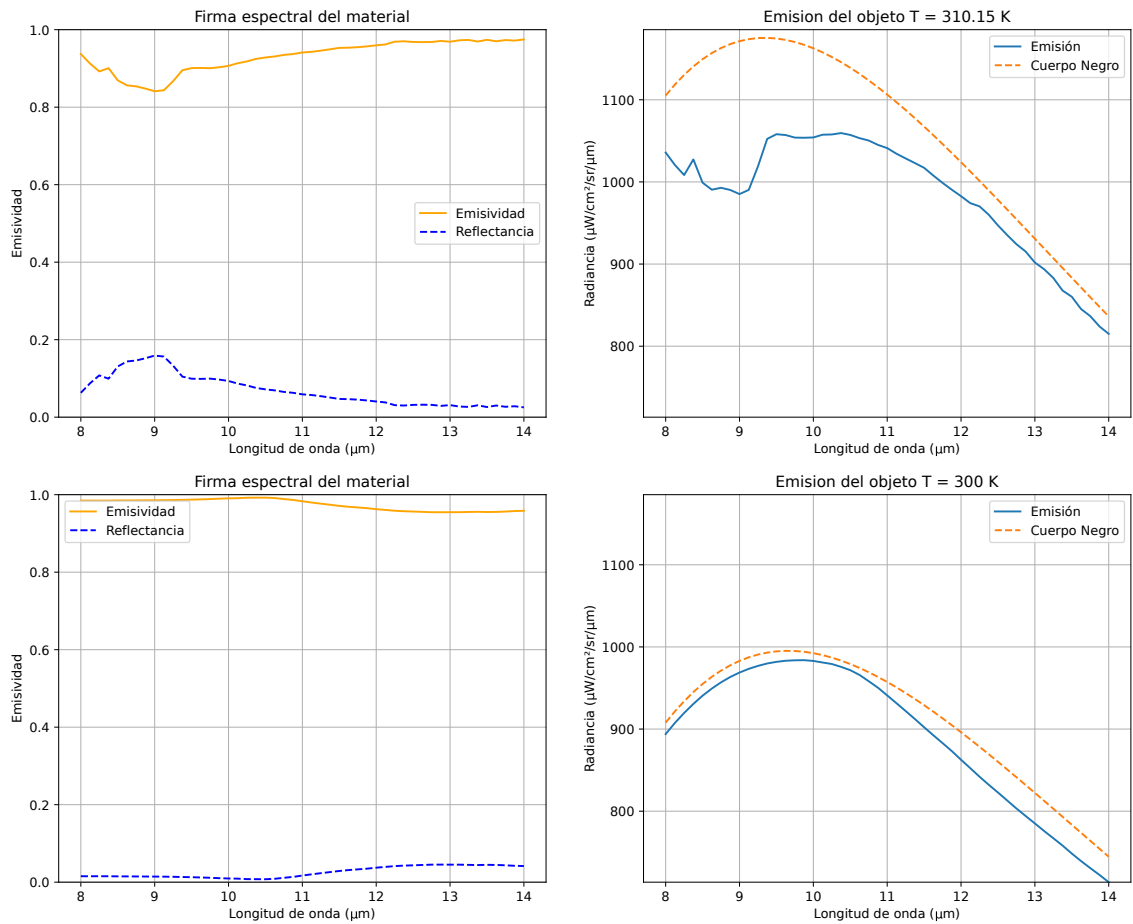


Figura 21. Dos ejemplos de firmas de emisividad $\varepsilon(\lambda)$ y dos temperaturas diferentes en el objeto T_{obj} . En la fila superior se observa un objeto a 310.15 K comparando la radiancia del cuerpo negro $B(\lambda; T_{obj})$ junto a su emisión $\varepsilon(\lambda)B(\lambda; T_{obj})$. En la fila inferior se observa otro objeto con una temperatura de 300 K y una firma de emisividad diferente.

espectral de $8\ \mu\text{m}$ a $14\ \mu\text{m}$.

Variación en la temperatura: El comportamiento del cuerpo negro hace que gran parte de la radiancia asociada a las temperaturas cercanas a condiciones ambiente se concentre en el rango de LWIR. Esta característica permite obtener imágenes térmicas en distintas escenas. En particular, la herramienta permite la asignación de temperatura y emisividad de manera independiente a cada objeto de la

escena.

Para un primer experimento, se fija la emisividad del objeto a la observada en la fila superior de la Figura 21. Para evitar interferencia de la medición debido a la radiancia de objetos externos, el objeto se simula en un entorno completamente vacío, eliminando así la posibilidad de que la medición se vea afectada por la reflectancia, y obteniendo así únicamente el componente de radiación inducido por la emisividad. En la Figura 22 se puede ver un objeto situado en el vacío, y el coeficiente de atenuación del medio es nulo, lo cual lo hace el escenario perfecto para probar un escenario donde no afecta la reflectancia. Para comprobar los resultados, se llevaron a cabo un total de 6 renderizaciones en un rango de temperaturas desde $250 K$ a los $350 K$. Los experimentos se pueden ver en la Figura 23.

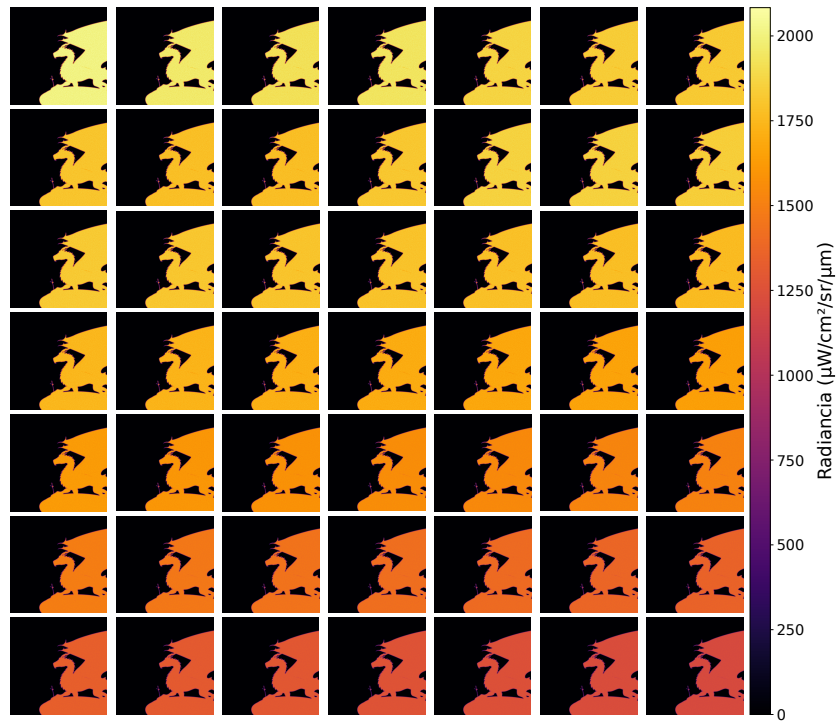


Figura 22. Visualización de las 49 bandas de la renderización de una escena con un único objeto, sin interacción con el medio, ni reflectividad, a una temperatura de $350 K$ y la firma de emisividad observada en la fila superior de la Figura 21.

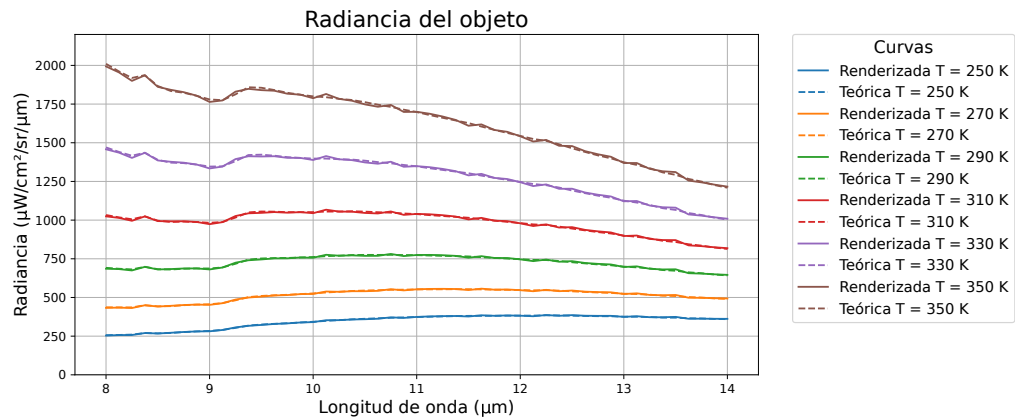


Figura 23. Comparación gráfica de resultados del renderizador contra el teórico para objetos a diferentes temperaturas sin luz ambiente ni reflectancia.

Variaciones en la emisividad: Para la validación de la emisividad, se utilizan las firmas obtenidas de la librería ECOSTRESS⁴⁵. Al igual que el experimento anterior, el objeto fue puesto en un entorno aislado simulando el vacío, para explorar con mayor fiabilidad los valores de emisividad con respecto a sus valores teóricos. Se utiliza una firma sintética, como la observada en la Figura 24, y se calculan los valores teóricos esperados para comparar el funcionamiento del renderizado.

La importancia de la reflectancia: Debido a limitaciones de Mitsuba en torno a la falta de medios emisivos, la reflectancia obtenida a partir de la Ecuación (7) no se podría modelar con el arreglo propuesto, debido a simplificaciones realizadas. Sin embargo, es un parámetro fundamental a la hora de obtener escenas realistas ya que permite modelar la interacción con el entorno.

Para evidenciar el efecto de la reflectancia, se recreó la escena vista en la Figura 24, incorporando ahora una fuente de radiación ambiental que simula el aporte del aire a las mediciones. El objeto a renderizar conserva los mismos parámetros de temperatura y emisividad.

⁴⁵ Meerdink et al., ver n. 17.

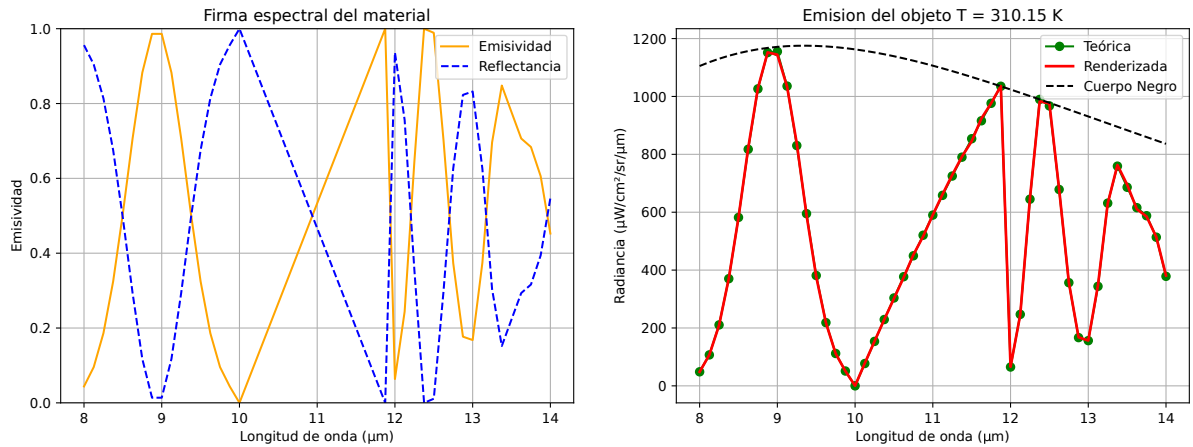


Figura 24. Comparación gráfica de un resultado del renderizador a partir de una firma sintética (izquierda), contra el resultado simulado y teórico esperado (derecha), para un objeto con una temperatura de 310.15 K . Con esto se comprueba la fidelidad del renderizado.

En la Figura 25, se pueden ver los resultados para un objeto a temperatura fija de 310.15 K , mientras la temperatura ambiental (aire) se varía entre 300 K , 310.15 K y 320 K , para observar los resultados obtenidos cuando la temperatura es menor, mayor e igual a la temperatura ambiente.

Observando los resultados, se evidencia que la medición final no se debe únicamente a la emisión del objeto, sino también a alguna fuente externa, presumiblemente de la reflectancia, debido a que en los puntos donde la emisividad es 0, aún se puede captar radiancia desde el objeto muy cercana al valor de la radiancia emitida por el aire.

4.2. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DE LA ESCENA

Además de las propiedades intrínsecas de los objetos, resulta relevante considerar su disposición en la escena, así como el medio óptico a través del cual la radiación llega al sensor. En esta sección se analizan la atenuación del medio, su temperatura y los efectos de la distancia entre objetos y sensor. Los parámetros del sensor se mantienen constantes: un *spp* de 16, 384, un cubo hiperespectral de 256×256 píxeles

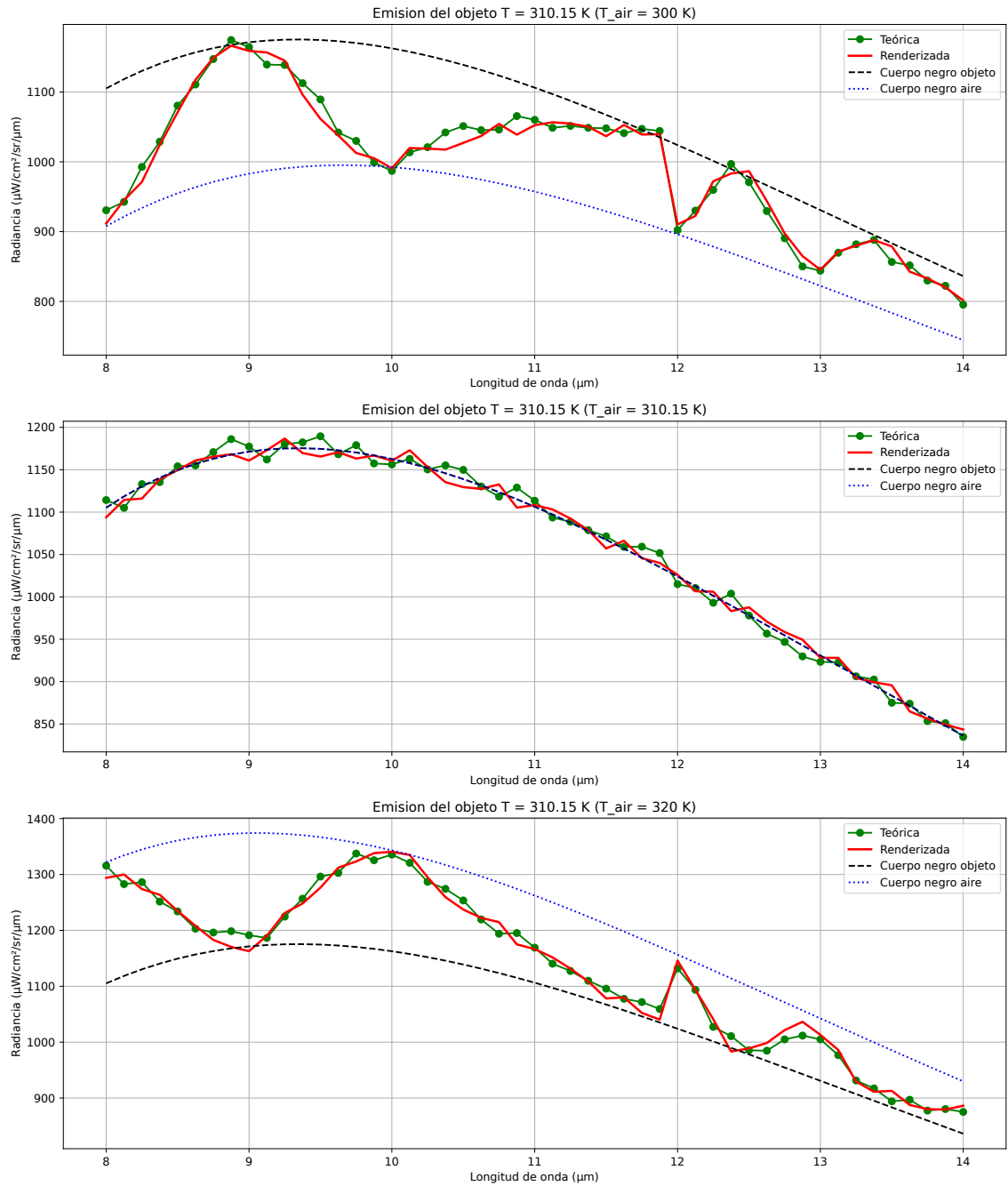


Figura 25. Comportamiento de la medición observada de un objeto a temperatura fija con la firma de emisividad observada en la Figura 24 teniendo en cuenta la reflectividad a 3 diferentes temperaturas de 300, 310.15 y 320 Kelvin de arriba hacia abajo respectivamente. En cada uno se comparan las emisiones del cuerpo negro en cada caso, la observación renderizada y la calculada teóricamente.

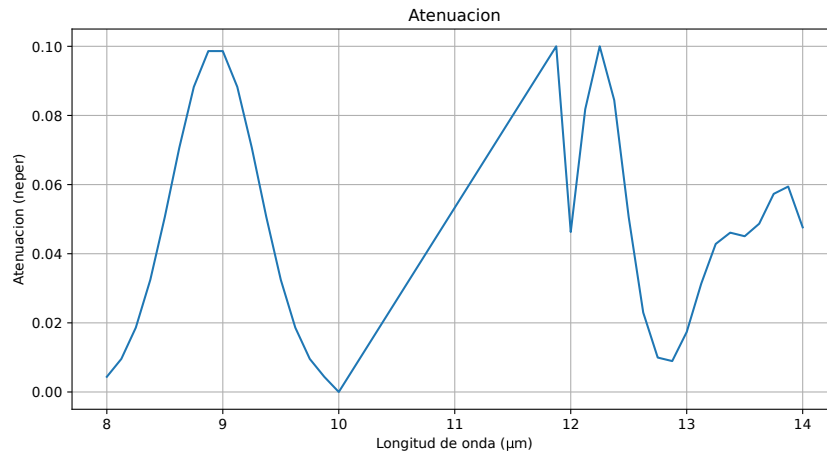


Figura 26. Firma sintética del coeficiente de atenuación espectral $\alpha(\lambda)$ en el rango LWIR, utilizada de forma común en varios experimentos. La curva incluye picos y valles deliberados para representar regiones de mayor y menor transparencia del medio y así analizar la sensibilidad de la radiancia a variaciones de $\alpha(\lambda)$.

espaciales con 49 bandas, y materiales completamente emisivos $\varepsilon(\lambda) = 1$ para fines prácticos.

Variaciones en la atenuación: Para estudiar cómo los distintos valores de la emisividad afectan a la medición, se generó una firma sintética de emisividad, que simula una emisividad altamente variable, conteniendo además valles donde llega a 0, observable en la Figura 26.

Como se fija la emisividad en un valor constante de 1, la Ecuación (4) se simplifica, eliminando la emisividad, por lo que nos queda:

$$L_{obj} = \tau(\lambda)B(\lambda; T). \tag{17}$$

Gracias a esta Ecuación (17), se simplifica el problema y es posible extraer el valor de la transmitancia, lo cual permite compararlo con su valor teórico, como se ve en la Figura 27.

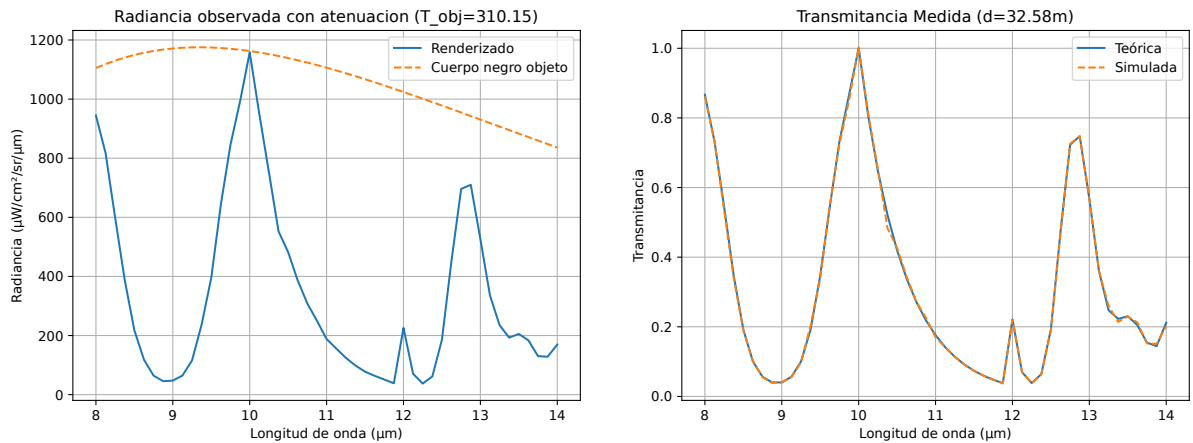


Figura 27. La emisión medida por el sensor de un objeto completamente emisivo a la temperatura de 310.15 Kelvin, una distancia de 32.58 metros justo en el píxel analizado, en un medio con la firma de atenuación vista en la Figura 6 y su comparación con la radiancia del cuerpo negro $B(\lambda; T_{obj})$ (izquierda). Comparativa de la transmitancia $\tau(\lambda)$ renderizada y calculada teóricamente mediante la Ecuación (14) (derecha).

Variaciones de las distancias ópticas: Ahora, se evaluará cómo la variación de la distancia afecta la medición. Gracias a la Ecuación (14), se sabe que si el coeficiente de atenuación es distinto de 0, la radiancia observada del objeto disminuye con la distancia. Para la simulación, se asignó un único objeto, sin medio emisivo, para solamente considerar la radiancia del objeto. Se fija una temperatura de 310.15 K y una emisividad $\varepsilon = 1$. El objeto fue puesto a 3 distancias distintas, y se captó la radiancia emitida en el píxel central, como se ve en la Figura 28. La radiancia teórica se calculó usando el mapa de profundidad, la radiación de cuerpo negro del objeto y su firma de emisividad, que son valores conocidos.

La importancia del aporte atmosférico: Gracias a la atenuación del medio, en distancias lo suficientemente lejanas, la radiancia captada tiende a ser la del cuerpo negro del aire. Para estudiar este fenómeno, se emplea la firma de atenuación vista en la Figura 6 y se exploran distintos segmentos del espectro, lo cual nos permite aislar y cuantificar $L_{air}(\lambda)$ a distintas temperaturas. Los resultados se presentan en

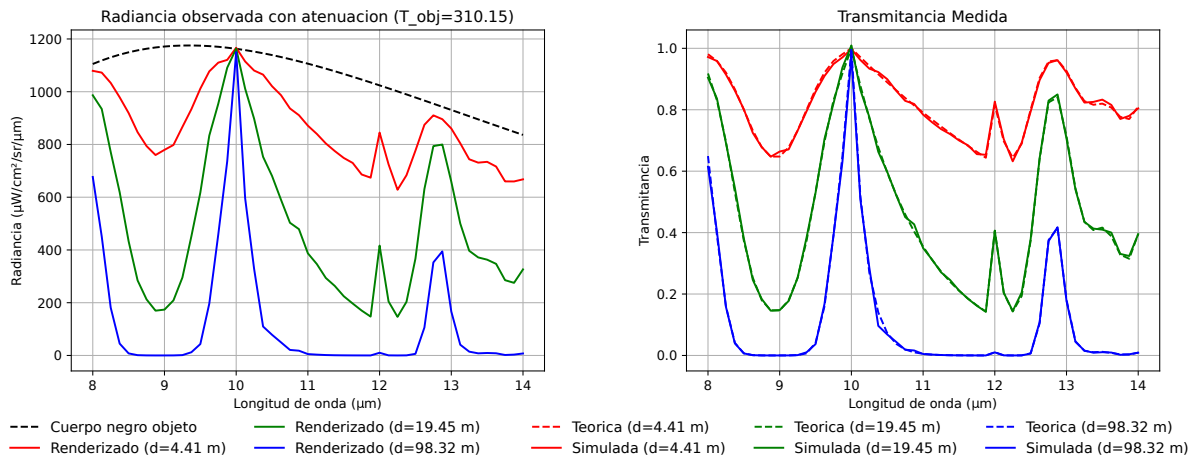


Figura 28. Comparación del comportamiento de un objeto en un medio atenuante a diferentes distancias del sensor con una firma de atenuación vista en la Figura 6. Se aprecia la observación renderizada a varias distancias versus el cuerpo negro del objeto (izquierda). Se compara la transmitancia observada contra la teórica en diferentes distancias (derecha).

la Figura 29.

4.3. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DEL SENSOR

Dependiendo de los parámetros configurados en el sensor, se determina la calidad y el costo computacional de las renderizaciones. Se analizan 4 parámetros clave: las muestras por píxel (*spp*), la resolución espacial, el número de bandas y el campo de visión.

Variaciones del muestreo por píxel (*spp*): El *spp* en valores lo suficientemente altos mejora la renderización, pero al mismo tiempo aumenta el costo computacional. Estas validaciones se llevaron a cabo con una resolución fija de 256×256 , utilizando una GPU NVIDIA GeForce RTX 3050 de 4 GB de VRAM. Los experimentos muestran una tendencia lineal en la relación tiempo y cantidad, como se ve en la Figura 30.

En la Figura 31, se puede observar también que el error (RMSE) disminuye a medida

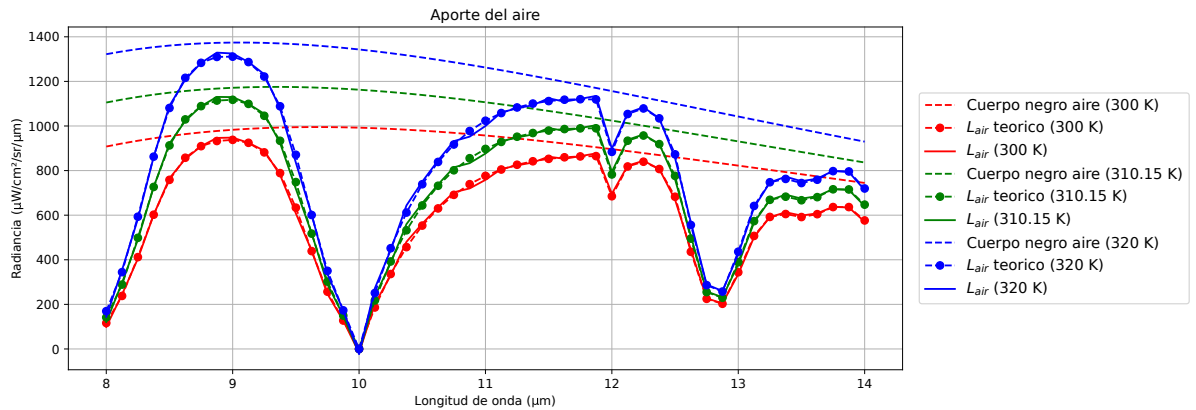


Figura 29. Comparativa de la $L_{air}(\lambda)$ observada con diferentes temperaturas contra la esperada teóricamente. Se proporciona información también sobre el límite que podría observarse ($B(\lambda; T_{air})$).

Cuadro 1. Relación el tamaño de la imagen (pixeles), el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena con un spp de 1, 024 y 49 bandas. Aumento en el tiempo de renderización al aumentar el tamaño del cubo de forma espacial.

Tamaño (px)	Tiempo	RMSE
128 × 128	00:04.22	44.933021
256 × 256	00:16.60	33.918091
512 × 512	01:07.90	42.225787
1024 × 1024	04:36.89	47.261312
2000 × 2000	17:34.62	37.899484

que se aumenta el spp .

Variaciones en la resolución: La resolución de la imagen obtenida también afecta a la calidad de la imagen, pero al igual que el spp , supone una carga en el costo computacional. Se experimentó con diversas resoluciones, manteniendo una relación de aspecto 1 : 1, fijando el spp , y renderizando 49 bandas. Los resultados se pueden ver en el Cuadro 1, donde podemos ver la relación entre el tamaño de la imagen, el tiempo de renderización y el error RMSE.

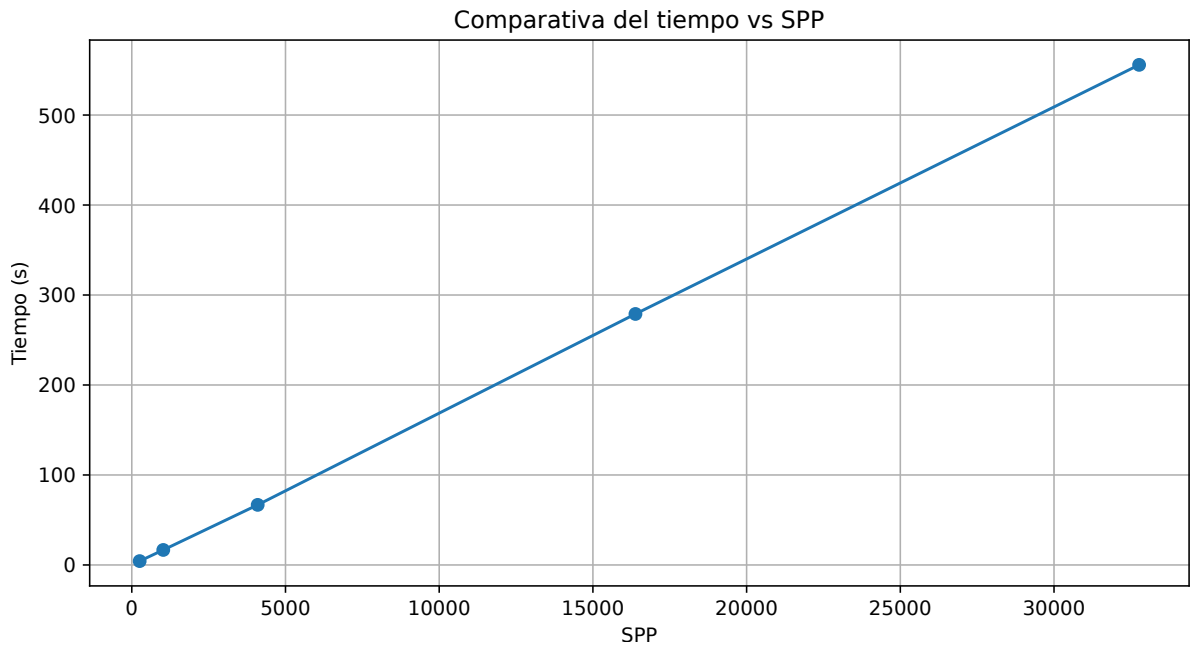


Figura 30. Comparativa entre la cantidad de muestreos por píxel (*spp*) y el tiempo de renderización en segundos, con imágenes de 256×256 píxeles y 49 bandas espectrales.

Variación de la cantidad de bandas espectrales: En una imagen de 256×256 píxeles, dentro del rango de $8 \mu m$ a $14 \mu m$, y con un *spp* fijo de 1,024, se obtuvieron los resultados presentados en el Cuadro 2. Sin embargo, al incrementar el número de bandas, la proporción de muestreo por píxel disminuye. Para mantener la calidad de la observación, es necesario aumentar el *spp* en proporción a la resolución espectral, tal como se muestra en el Cuadro 3.

Variaciones de posición y AOV: La geometría de adquisición se evaluó mediante la variación del campo de visión (AOV) y la posición de la cámara. Un AOV amplio incrementa la cobertura de la escena, pero reduce la resolución espacial efectiva por píxel y acentúa los efectos angulares. En contraste, un AOV estrecho concentra el detalle en áreas más pequeñas. Para este análisis se realizaron pruebas con diferentes valores de AOV manteniendo constante el *spp* y la resolución, como se

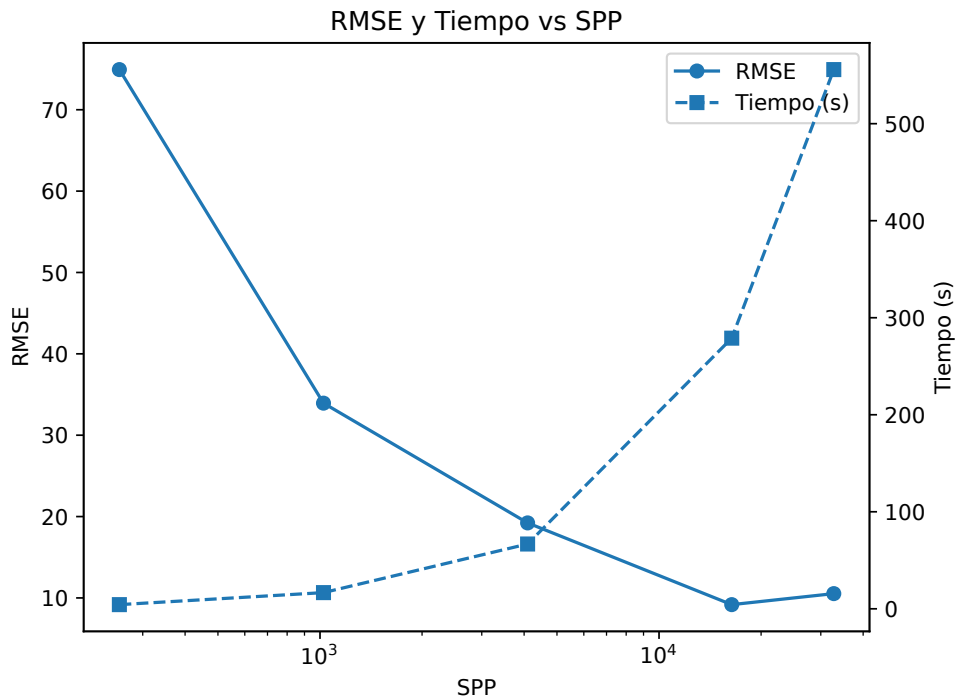


Figura 31. Comparativa entre la cantidad de muestreos por píxel (*spp*) contra el tiempo de renderización en segundos y el error en RMSE en comparación de la calculada teóricamente, con imágenes de 256×256 y 49 bandas.

muestra en el Cuadro 4. A AOV fijo, el desplazamiento de la cámara modifica simultáneamente la distancia, el ángulo de observación y la longitud óptica del medio, lo que afecta tanto la atenuación atmosférica como la contribución emitida y reflejada por los objetos, tal como se ilustra en la Figura 28.

4.4. VALIDACIÓN DEL SIMULADOR

Ahora validaremos los resultados finales de la simulación, donde comprobaremos los resultados finales y comprobar si coinciden con los resultados esperados. En la validación del simulador, se fija la temperatura del aire se fijó en $293.15K$ ($\approx 20^\circ C$), la firma de atenuación vista en la Figura 32 y un total de 10 bandas comprendidas entre los $10 \mu m$ hasta los $12 \mu m$ incluyéndolas.

Los objetos vistos dentro de la escena tienen una serie de temperaturas diferentes,

Cuadro 2. Relación entre la cantidad de bandas, el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena con un *spp* de 1,024 y 256×256 píxeles. Aumento del tiempo de cómputo al aumentar el número de bandas; además, incremento de error al mantener el *spp* constante, debido a que hay menos muestras por cada banda.

N° bandas	Tiempo (mm:ss.ms)	RMSE
5	00:02.38	4.444238
20	00:07.05	21.382043
50	00:16.64	37.226026
100	00:35.69	64.681787
150	01:39.85	81.282630

Cuadro 3. Relación entre la cantidad de bandas, un *spp* proporcional a la cantidad de bandas, el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena a 256×256 y 49 bandas. Se mantiene un error aproximadamente constante al aumentar el *spp* proporcional a la cantidad de bandas, logrando así mantener el muestreo en cada banda.

N° bandas	SPP	Tiempo (mm:ss.ms)	RMSE
5	500	00:01.28	5.061195
20	2,000	00:14.30	20.498081
50	5,000	01:26.85	19.292013
100	10,000	06:12.60	18.811128
150	15,000	19:31.33	19.196352

y firmas de emisividad ya definidas. Una vez renderizados los diferentes resultados, contamos con la libertad de analizar puntos de interés, como por ejemplo, objetos a temperaturas muy similares en diferentes ubicaciones de la escena, como se observa en la Figura 33, con 3 objetos que comparten la misma emisividad. Señalando cada píxel de observación en 3 diferentes visualizaciones, el mapa de profundidad (los ceros podrían indicar vacío y/o ausencia de información), de temperatura y el cubo espectral en una longitud de onda específica, cada una junto a la observación de ese punto.

Los valores de observación se encuentran acotados por las envolventes dadas por

Cuadro 4. Relación entre el AOV ($^{\circ}$), el tiempo de renderización (formato mm:ss.cc) y error RMSE para una misma escena a 256×256 , 49 bandas y un *spp* de 16, 384.

AOV	Tiempo	RMSE
30	04:24.56	10.578844
60	03:13.91	8.996097
90	02:00.09	12.231303
120	01:34.71	9.227192
150	01:25.03	8.885588

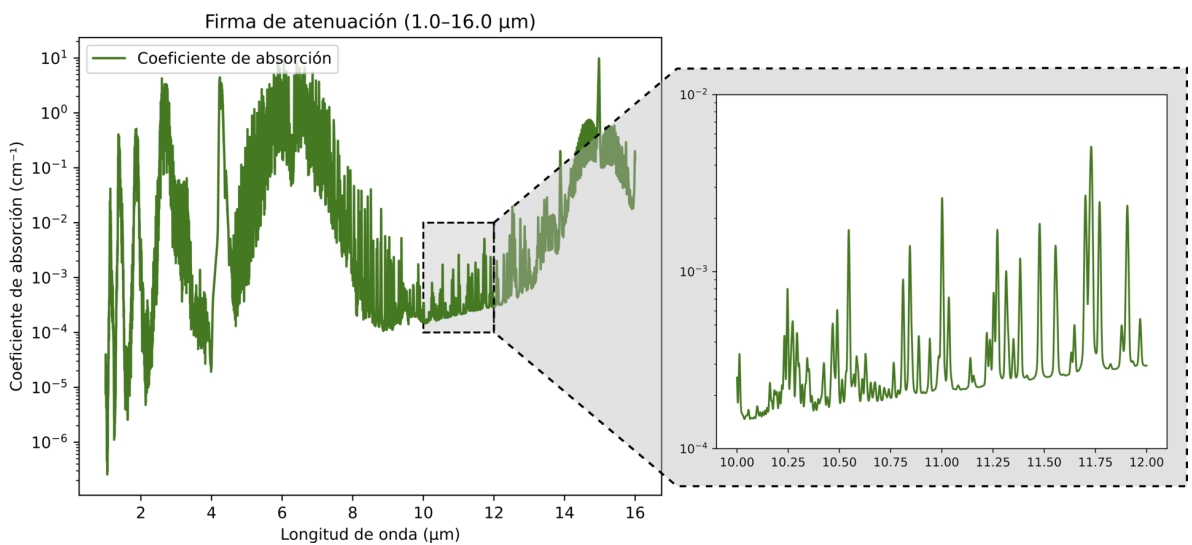


Figura 32. Firma de atenuación por defecto usada en la validación del simulador de entre los $10 \mu m$ hasta los $12 \mu m$. Utilizamos una parte de la firma que podemos ver en la Figura 6.

la emisión máxima del objeto si fuera un cuerpo negro perfecto $B(\lambda; T_{obj})$ y por la emisión máxima del aire $B(\lambda; T_{air})$. Dado que el objeto presenta baja reflectancia y la escena no incluye fuentes extremadamente calientes, no se esperan contribuciones adicionales significativas; por tanto, las diferencias entre mediciones se explican principalmente por las distancias al sensor, como se aprecia en la Figura 34.

Se obtuvo una visualización de las mediciones realizadas para objetos prácticamente iguales en diferentes regiones en la escena; sin embargo, es importante tener una visualización del comportamiento de los diferentes objetos dentro de la escena y la

radiancia observada. En una escena exactamente igual que la anterior, se toman muestras de 3 objetos diferentes entre si, tanto en sus temperaturas, ubicaciones dentro de la escena y emisividad como se observa en la Figura 35, y el resultado de cada uno de estos se observa en la Figura 36 con la ayuda de colores para diferenciar cada uno en cada una de las figuras presentadas.

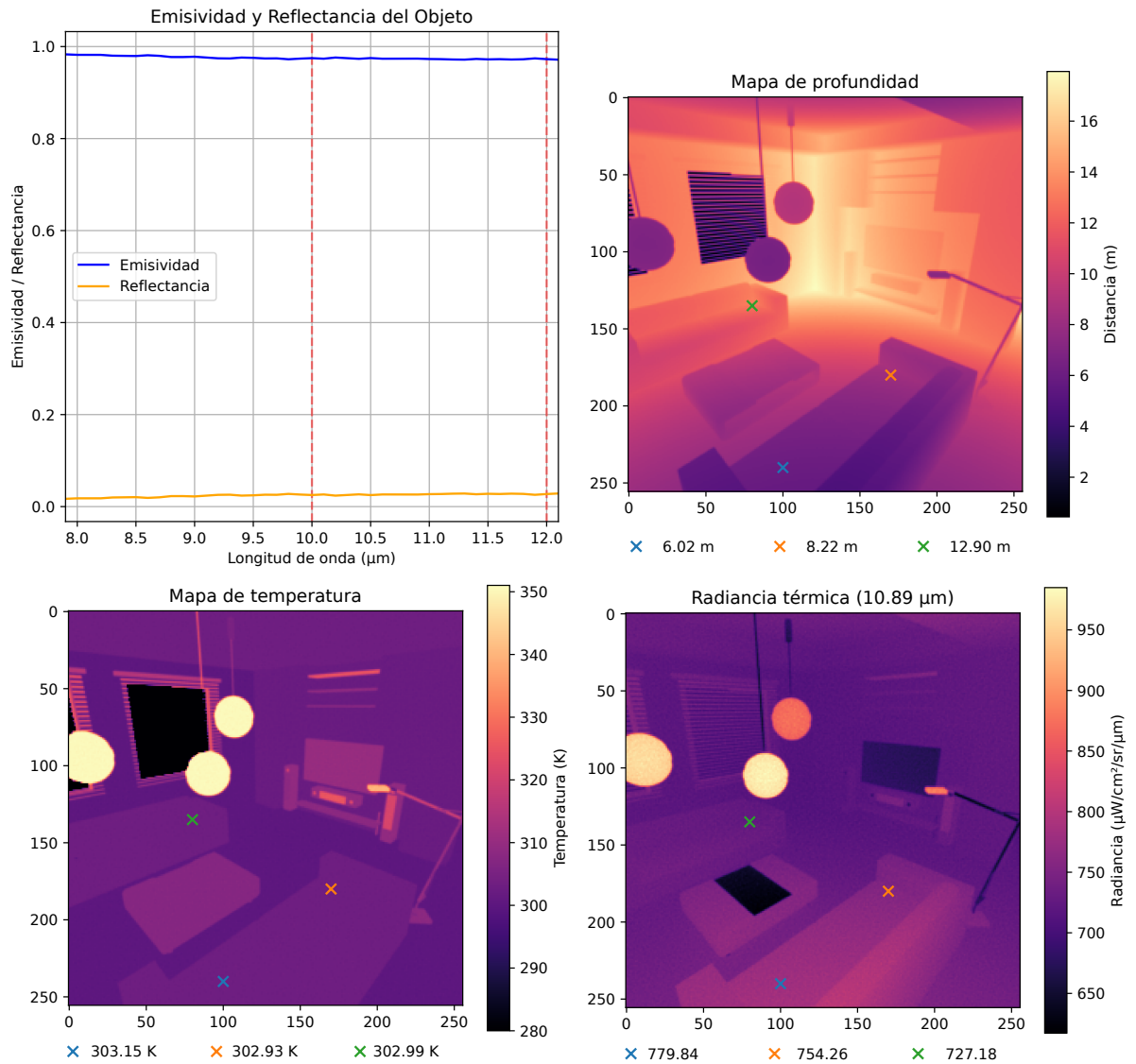


Figura 33. Comparación de resultados para la selección de 3 objetos con misma temperatura y emisividad. Podemos observar la firma de emisividad y reflectancia (arriba izquierda), mapa de profundidad (arriba derecha) mapa de temperatura (abajo izquierda) y radiancia resultante tomada a $10.89 \mu\text{m}$ (abajo derecha).

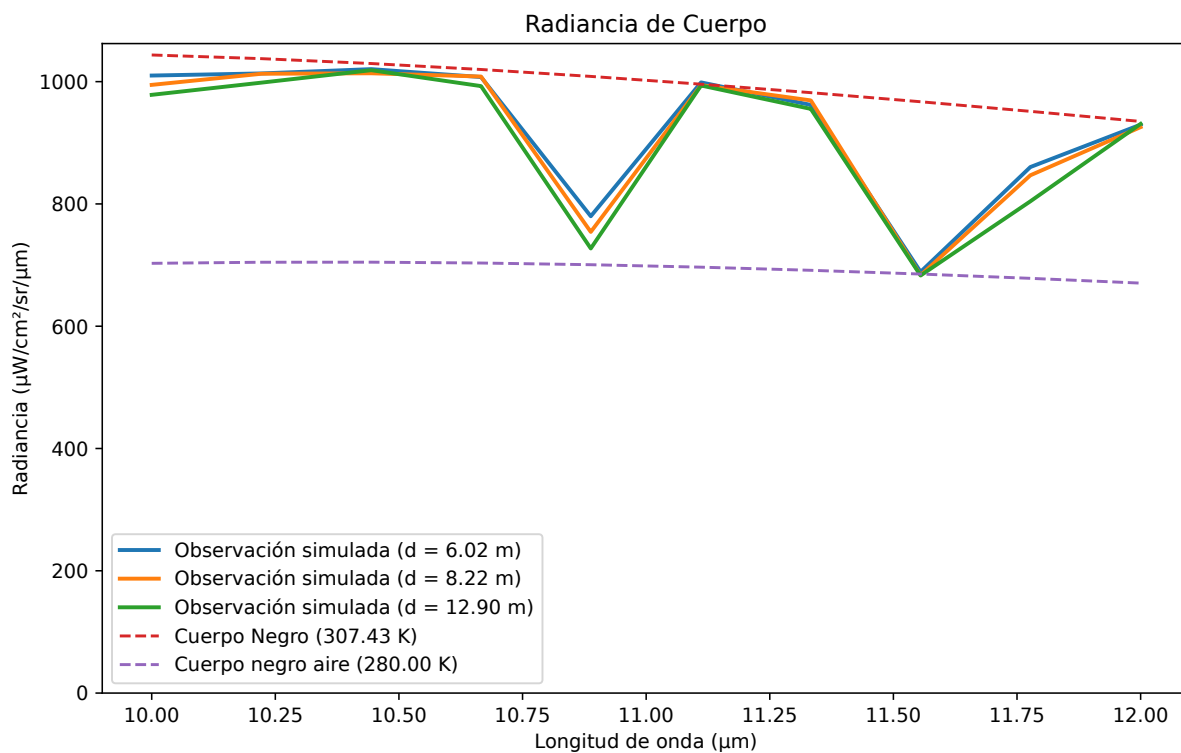


Figura 34. Resultados de las observaciones de los puntos de interés denotados en la Figura 33 con la cota teórica (cuerpo negro) del objeto y del aire.

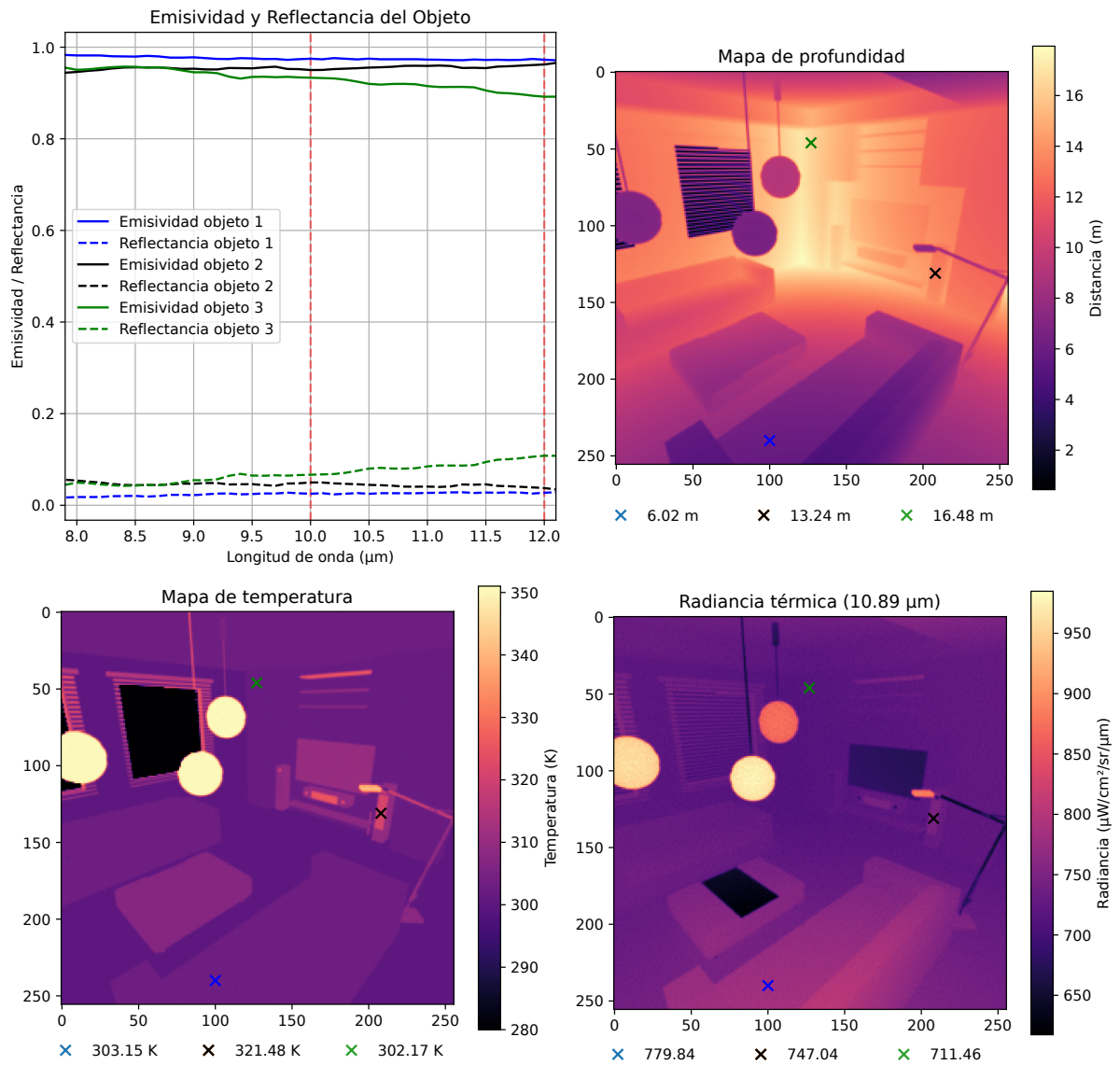


Figura 35. Comparación de resultados para la selección de 3 objetos con temperatura, emisividad y distancias distintas. Podemos observar la firma de emisividad y reflectancia (arriba izquierda), mapa de profundidad (arriba derecha) mapa de temperatura (abajo izquierda) y radiancia resultante tomada a $10.89 \mu m$ (abajo derecha).

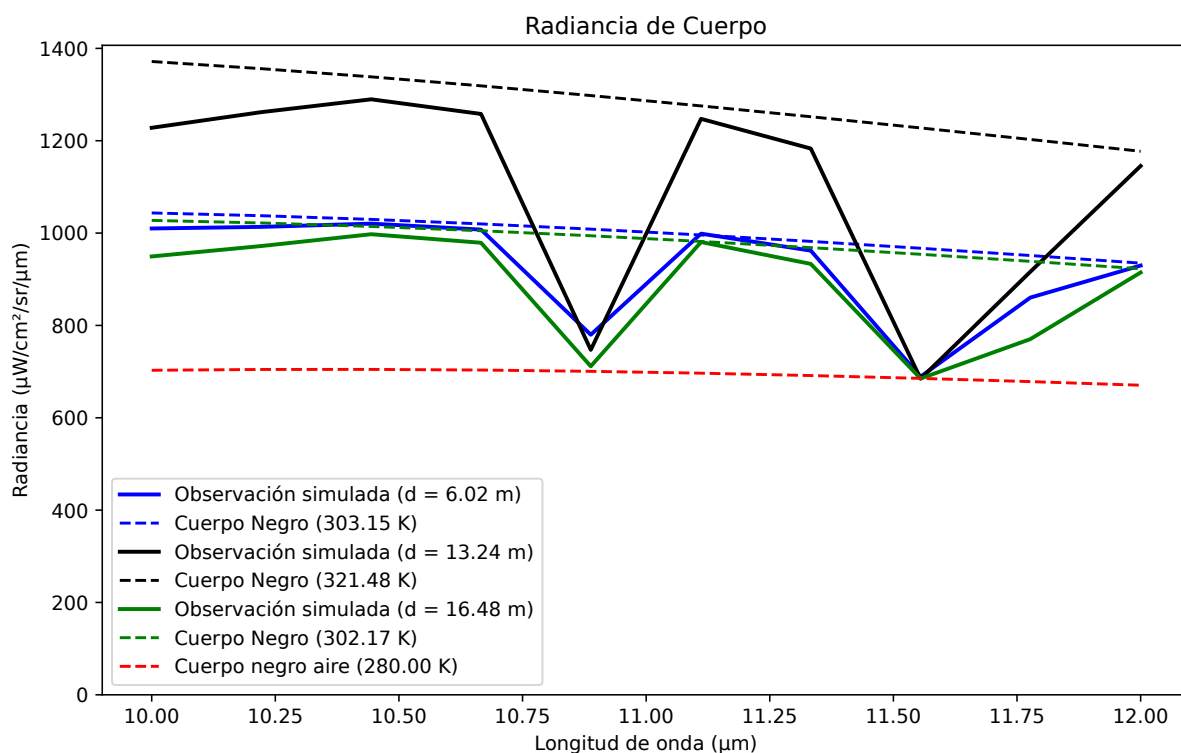


Figura 36. Resultados de las observaciones de los puntos de interés denotados en la Figura 35 con la cota teórica (cuerpo negro) del objeto y del aire para cada uno de los casos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un simulador de una cámara hiperspectral LWIR orientado al análisis físico de escenas sintetizadas, capaz de integrar de forma controlada la emisión térmica de los objetos, la reflectancia difusa del entorno y la atenuación atmosférica. El sistema se apoya en Mitsuba 3 y en un flujo que permite construir escenarios en Blender, asignar firmas espectrales (emisividad y atenuación), y parametrizar el sensor (bandas, AOV, resolución, spp). Ante la ausencia de un aporte atmosférico emisivo directo en el renderizador, se diseñaron estrategias de separación y recombinación de términos (escenas auxiliares y post-composición) y emisores locales controlados, lo que habilitó estimaciones coherentes con la ecuación de transferencia radiativa y comparables contra modelos teóricos.

La plataforma incorpora una interfaz cliente-servidor (FastAPI + Gradio) que facilita la configuración de la escena y asignación sistemática de parámetros, habilitando estudios reproducibles sin requerir equipamiento de laboratorio. En la validación, se ejecutaron experimentos con objetos que comparten emisividad y con objetos de emisividades y temperaturas diferentes, contrastando la radiancia simulada frente a su par teórico (Planck modulado por emisividad y transmitancia). Los resultados mostraron tendencias consistentes: reducción de error al aumentar spp (con costo temporal casi lineal), incremento de ruido por banda al aumentar el muestreo espectral (si no se ajusta spp), y efectos geométricos esperados al variar AOV y posición de cámara (cobertura vs. detalle, trayectos ópticos y proyección angular).

En conjunto, el simulador ofrece una herramienta versátil y trazable para explorar configuraciones LWIR hiperspectrales, evaluar sensibilidades (temperatura, firmas de emisividad, atenuación, distancias) y cuantificar compromisos precisión-tiempo con una métrica objetiva (RMSE). Su diseño favorece el prototipado de algoritmos y la generación de datos de referencia sin acceso a equipos costosos, acercando es-

tas capacidades a etapas tempranas de investigación. Como trabajo futuro se prevé incorporar modelos de cielo/sol térmicos o mapas hemisféricos, mejorar la estratificación espectral para reducir varianza a spp moderados, ampliar la orquestación de renders (multiusuario/multiescena) y realizar validaciones cruzadas con mediciones físicas y bibliotecas de materiales, acercando los resultados de simulación y la realidad.

6. TRABAJO FUTURO

Entre trabajo futuro, se piensa implementar varias extensiones y mejoras, especialmente el mismo motor de Mitsuba. Una de nuestras propuestas es la implementación de un integrador y sampler que nos permita la renderización de medios emisivos dentro de Mitsuba, basándonos posiblemente en la implementación actual de *volpathmin*. Esto nos permitiría aportar a la comunidad del software libre y nos permitiría simplificar en gran medida la arquitectura del simulador térmico.

Otra de las ideas que tenemos es la mejora e implementación de efectos de dispersión de la luz en los medios renderizados (*scattering*). Actualmente, el modelo implementa la absorción y atenuación en el rango espectral, pero el *scattering* puede influir de manera significativa, aportando condiciones que acerquen más a condiciones naturales. Implementar otros modelos de dispersión ampliaría la fidelidad de las simulaciones y nos permitiría estudiar otros efectos que actualmente no podemos.

En cuanto al rendimiento computacional, se plantea la incorporación de estrategias de paralelización, como la creación simultánea de múltiples escenas o el uso de varias cámaras en paralelo, con el fin de optimizar la generación de grandes volúmenes de datos sintéticos.

Finalmente, se espera que la herramienta desarrollada se convierta en una base sólida para futuros proyectos en los que la simulación hiperespectral sea necesaria, ya sea para entrenar y validar algoritmos de visión por computadora, probar métodos de fusión de datos o explorar aplicaciones en teledetección y monitoreo remoto.

BIBLIOGRAFÍA

- Adibekyan, Albert. «High-accuracy spectral emissivity measurement for industrial and remote sensing applications». Tesis doct. Wuppertal, Univ., Diss., 2016 (vid. págs. 17, 23).
- Baldrige, A.M. et al. «The ASTER spectral library version 2.0». En: *Remote Sensing of Environment* 113.4 (2009), págs. 711-715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.007> (vid. pág. 28).
- Bao, Fanglin et al. «Heat-assisted detection and ranging». En: *Nature* 619.7971 (2023), págs. 743-748 (vid. pág. 16).
- Bhargava, Anuja et al. «Hyperspectral imaging and its applications: A review». En: *Heliyon* 10.12 (2024) (vid. pág. 20).
- Foley, James D. *Computer graphics: principles and practice*. Vol. 12110. Addison-Wesley Professional, 1996 (vid. pág. 30).
- Gallastegi, Unay Dorken et al. «Absorption-Based, Passive Range Imaging from Hyperspectral Thermal Measurements». En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2025), págs. 1-18. DOI: 10.1109/TPAMI.2025.3538711 (vid. págs. 16, 23, 24, 28, 29).
- Ghosh, Suman y Sumit Nandi. «A Comprehensive Review on UV-Visible Spectroscopy and Its Application». En: *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)* 12.1 (2024) (vid. págs. 17, 25).

- Girard, Sylvain, Vincenzo De Michele y Adriana Morana. «Spectroscopic studies of radiation effects on optical materials». En: *Spectroscopy for Materials Characterization* (2021), págs. 229-251 (vid. págs. 17, 25, 26).
- Gordon, I. E. et al. «The HITRAN2020 molecular spectroscopic database». En: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 277, 107949 (ene. de 2022), pág. 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949 (vid. pág. 26).
- Halliday, David, Robert Resnick y Jearl Walker. *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, 2013 (vid. pág. 23).
- Jakob, Wenzel et al. «Dr.Jit: A Just-In-Time Compiler for Differentiable Rendering». En: *Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)* 41.4 (jul. de 2022). DOI: 10.1145/3528223.3530099 (vid. pág. 34).
- Jakob, Wenzel et al. *Mitsuba 3 renderer*. Ver. 3.1.1. <https://mitsuba-renderer.org>. 2022 (vid. págs. 30, 33).
- Juhé, Francesc y Bartosz Styperek. *Mitsuba integration add-on for Blender*. GitHub repository, mar. 2024 (vid. pág. 35).
- Kajiya, James T. «The rendering equation». En: *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Association for Computing Machinery, 1986, págs. 143-150 (vid. pág. 30).
- Kastek, M et al. «Hyperspectral imaging infrared sensor used for environmental monitoring». En: *Acta Physica Polonica A* 124.3 (2013), págs. 463-467 (vid. pág. 16).
- Manickavasagan, A., D. S. Jayas y N. D. G. White. «Applications of thermal imaging in agriculture—a review». En: *Proceedings of the Canadian Society for Bioengi-*

- neering (CSBE/SCGAB) Annual Meeting*. Winnipeg, MB, Canada, 2005, págs. 1-12 (vid. pág. 16).
- Manolakis, Dimitris et al. «Longwave Infrared Hyperspectral Imaging: Principles, Progress, and Challenges». En: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 7.2 (2019), págs. 72-100. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2889610 (vid. págs. 20, 21, 23, 24).
- Meerdink, Susan K et al. «The ECOSTRESS spectral library version 1.0». En: *Remote Sensing of Environment* 230 (2019), pág. 111196 (vid. págs. 24, 27, 50).
- Mitsuba Renderer Documentation. *Integration plugins – Blender plugin by Bartosz Styperek and Francesc Juhé*. Mitsuba documentation web page (vid. pág. 35).
- Nagase, Yasuto et al. «Shape from Thermal Radiation: Passive Ranging Using Multi-spectral LWIR Measurements». En: *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022, págs. 12651-12661. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01233 (vid. págs. 16, 17).
- NVIDIA Developer. *Ray Tracing*. <https://developer.nvidia.com/discover/ray-tracing>. Accessed on 26 de abril de 2025. 2024 (vid. pág. 30).
- Pharr, Matt, Wenzel Jakob y Greg Humphreys. *Physically based rendering: From theory to implementation*. MIT Press, 2023 (vid. págs. 28-33).
- Planck, Max. «The theory of heat radiation». En: *Entropie* 144.190 (1900), pág. 164 (vid. pág. 23).
- Polder, Gerrit, Erik Pekkeriet y Marco Snickers. «A Spectral Imaging System for Detection of Botrytis in Greenhouses». En: jul. de 2013 (vid. pág. 20).

Saponaro, Philip et al. «Material classification with thermal imagery». En: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015, págs. 4649-4656 (vid. pág. 16).

Wang, Junjie. «Polarization and Hyperspectral Imaging for Synthetic Scene Rendering». Tesis de maestría. Purdue University, 2023 (vid. págs. 32, 33).