



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



DESARROLLO DE MODELO DE COLORIMETRÍA EN EL SWIR

POR

Matías Ignacio Puentes Espinoza

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Electrónico

Profesor Guía
Luis Emiliano Arias Parada

Abril 2024
Concepción (Chile)

©2024 Matías Ignacio Puentes Espinoza

©2024 Matías Ignacio Puentes Espinoza

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional. En especial a mis padres por confiar en mí y alentarme a seguir cuando estaba con un pie afuera de la universidad.

También agradecer a mi abuela Marlen y Francisco Uribe, los cuales les prometí que lograría esto para enorgullecerlos donde sea que estén. Sé que siempre estuvieron ahí para darme fuerzas donde no había.

Agradecer al profesor Luis Arias, el cual desde el primer momento que tuve una clase con él me marcó al no empezar la asignatura con un syllabus, sino con una charla sobre “Qué les motiva a estar acá”, buscando inspirar y valorar esta etapa universitaria, más allá de sólo clases. Esto coincidió con procesos personales y me hizo reflexionar sobre lo que estaba pasando. No me equivoqué en elegirlo como profesor guía. Agradezco enormemente su vocación, interés en motivar e ir más allá de lo académico.

Gracias a esta hermosa y difícil etapa pude formarme como persona, transformándome en una persona resiliente y perseverante, que es capaz de lograr todo lo que se propone, convencido de que con esfuerzo y disciplina todo se puede lograr por más difícil que se ponga la situación.

GRACIAS TOTALES.

Sumario

En el contexto del avance del desarrollo de imágenes en el espectro infrarrojo y la ciencia de la colorimetría, se identificó la oportunidad de aprovechar las propiedades del SWIR, a través de la colorimetría.

En el presente informe para Memoria de Título “Desarrollo de modelo de colorimetría en el SWIR” se estudiaría a fondo la colorimetría, donde se buscará obtener un modelo para conseguir color en el SWIR, aprovechando de esta manera las características de este espectro, tales como visión en condiciones de neblina, visión del contenido de recipientes de algunos materiales, análisis del estado de agricultura, entre otros.

Para abordar esta investigación, primero se estudiará de forma exhaustiva cada concepto de colorimetría, donde luego se montará un set-up óptico para obtener imágenes en el espectro estudiado. Con esto se realizarán diferentes experimentos, analizando y procesando estas imágenes.

Como resultado, se logró desarrollar un modelo de colorimetría en el SWIR, lo que permitió reconstruir, a partir de imágenes monocromáticas en el SWIR, imágenes a color mediante Síntesis Aditiva de Color, obteniendo así propiedades destacadas de Colorimetría e Infrarrojo. Las imágenes obtenidas correspondieron a elementos cuya reflectancia en el SWIR difiere del rango VIS, cuyo color se obtuvo del diagrama de cromaticidad calculado para el sistema óptico diseñado. Lo expuesto en este trabajo y sus resultados muestran un avance metodológico en la evolución de la obtención de imágenes a color, a partir de imágenes en el infrarrojo.

Este trabajo fue financiado por el proyecto Fondecyt N° 1211184.

Summary

In the context of the advancement of imaging development in the infrared spectrum and the science of colorimetry, the opportunity to take advantage of the properties of SWIR, through colorimetry, was identified.

In this report for the Title Report “Development of a colorimetry model in the SWIR” colorimetry would be studied in depth, where an attempt will be made to obtain a model to achieve color in the SWIR, thus taking advantage of the characteristics of this spectrum, such as vision in foggy conditions, vision of the contents of containers of some materials, analysis of the state of agriculture, among others.

To address this research, first each colorimetry concept will be exhaustively studied, where an optical set-up will then be set up to obtain images in the studied spectrum. With this, different experiments will be carried out, analyzing and processing these images.

As a result, it was possible to develop a colorimetry model in the SWIR, which made it possible to reconstruct, from monochromatic images in the SWIR, color images through Additive Color Synthesis, thus obtaining outstanding Colorimetry and Infrared properties. The images obtained corresponded to elements whose reflectance in the SWIR differs from the VIS range, whose color was obtained from the chromaticity diagram calculated for the designed optical system. What is presented in this work and its results show a methodological advance in the evolution of obtaining color images from infrared images.

This work was funded by Fondecyt project N° 1211184.

Tabla de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2.	TRABAJOS PREVIOS	2
1.2.1	<i>Espectro electromagnético e Interacción de la luz.</i>	2
1.2.2	<i>Fundamentos y teoría del SWIR</i>	2
1.2.3	<i>Cámara SWIR y sus lentes.</i>	3
1.2.4	<i>Colorimetría y análisis de imágenes.</i>	3
1.3.	DISCUSIÓN	5
1.4.	OBJETIVOS	5
1.4.1	<i>Objetivo General</i>	5
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5.	ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.6.	METODOLOGÍA Y TEMARIO	6
1.7.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	7
1.8.	HIPÓTESIS DE TRABAJO	7
2.	MARCO TEÓRICO	9
2.1.	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	9
2.2.	INTERACCIÓN ENTRE LA LUZ Y LA MATERIA	10
2.2.1	<i>Absorción</i>	10
2.3.	SHORT-WAVE INFRARED (SWIR).....	11
2.4.	RADIOMETRÍA.....	12
2.4.1	<i>Ángulo sólido</i>	13
2.4.2	<i>Flujo Radiante (Φ_e)</i>	13
2.4.3	<i>Intensidad Radiante (I_e):</i>	13
2.4.4	<i>Irradiancia (E):</i>	14
2.4.5	<i>Radiancia (L_e)</i>	14
2.5.	FOTOMETRÍA.....	14
2.5.1	<i>Flujo luminoso (Φ_v)</i>	15
2.5.2	<i>Intensidad luminosa (I_v)</i>	15
2.5.3	<i>Iluminancia (E)</i>	15
2.5.4	<i>Luminancia (L_v)</i>	15
2.6.	CIENCIA DE LA COLORIMETRÍA.....	16
2.7.	PERCEPCIÓN DEL COLOR	16
2.7.1	<i>Estructura y funcionamiento del ojo humano</i>	17
2.7.2	<i>Conos y bastones</i>	17
2.7.3	<i>Sistema LMS</i>	18
2.8.	TEORÍA TRICROMÁTICA.....	19
2.9.	COLOR MATCHING FUNCTIONS.....	19
2.10.	ESPACIO DE COLOR CIE RGB.....	20
2.11.	ESPACIO DE COLOR CIE XYZ.....	21
2.12.	DIAGRAMA DE CROMATICIDAD.....	22
2.13.	CARACTERÍSTICAS DEL COLOR	23
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1.	MEDICIÓN IRRADIANCIA	24
3.1.1	<i>Descripción de la experiencia</i>	24
3.1.2	<i>Set-up</i>	24
3.1.3	<i>Resultados</i>	26
3.2.	CAPTURA Y RECONSTRUCCIÓN DE IMÁGENES EN EL SWIR.....	28
3.2.1	<i>Descripción de la experiencia</i>	28
3.2.2	<i>Problemas y observaciones</i>	28
3.2.3	<i>Set-up</i>	28

3.2.4	<i>Resultados</i>	29
3.3.	MODELO DE COLORIMETRÍA EN EL SWIR.	36
3.3.1	<i>Descripción de la experiencia</i>	36
3.3.2	<i>Set-up</i>	36
3.3.3	<i>Resultados</i>	36
4.	CONCLUSIONES	42
4.1.	CONCLUSIÓN	42
4.2.	TRABAJO A FUTURO	43
	REFERENCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Espectro Visible [1]	9
Figura 2.2: Fenómeno Absorción [1]	10
Figura 2.3: Fenómeno Reflexión [1]	10
Figura 2.4: Fenómeno Transmisión [1]	11
Figura 2.5: Fenómeno Refracción [1]	11
Figura 2.6: Espectro Short-Wave Infrared (SWIR) [3]	11
Figura 2.7: Ángulo sólido [5]	13
Figura 2.8: Estructura del ojo humano [8]	17
Figura 2.9: Sensibilidad espectral de los Conos [8]	18
Figura 2.10: Color Matching Functions (CMF) [8]	20
Figura 2.11: Experimento Color Matching Function (CMF) [8]	20
Figura 2.12: Espacio de Color CIE RGB Color Matching Functions [8]	21
Figura 2.13: Espacio de Color CIE XYZ [8]	22
Figura 2.14: Diagrama de Cromaticidad [8]	23
Figura 3.1: Set-up de Medición de Irradiancia. Fuente elaboración propia.	24
Figura 3.2: Set-up Medición de Irradiancia montado en Exterior. Fuente elaboración propia.	25
Figura 3.3: Medición de Irradiancia de Agua. Fuente elaboración propia.	25
Figura 3.4: Medición de Irradiancia de Suelos desnudos. Fuente elaboración propia.	26
Figura 3.5: Comparación Irradiancias medidas. Fuente elaboración propia.	26
Figura 3.6: Comparación Irradiancias medidas sin sol cielo. Fuente elaboración propia.	27
Figura 3.7: Set-up óptico de Cáptura de imágenes SWIR. Fuente elaboración propia.	29
Figura 3.8: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.	29
Figura 3.9: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.	30
Figura 3.10: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FB1300. Fuente elaboración propia.	30
Figura 3.11: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FB1750. Fuente elaboración propia.	30
Figura 3.12: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.	31
Figura 3.13: Frutas en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.	31
Figura 3.14: Frutas con Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.	32
Figura 3.15: Frutas con Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.	32
Figura 3.16: Frutas con Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.	32
Figura 3.17: Frutas. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.	33
Figura 3.18: Madera y flores en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.	33
Figura 3.19: Madera y flores con Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.	34
Figura 3.20: Madera y flores con Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.	34
Figura 3.21: Madera y flores con Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.	34
Figura 3.22: Madera y flores. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.	35
Figura 3.23: Transmitancia Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.	37
Figura 3.24: Transmitancia Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.	37
Figura 3.25: Transmitancia Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.	38

Figura 3.26: Irradiancia Lampara Halógeno. Fuente elaboración propia. 38
Figura 3.27: Curva Sensibilidad Sensor Cámara Acuros 1920 GigE. Fuente elaboración propia..... 39
Figura 3.28: Transmitancia Lente 25mm. Fuente elaboración propia. 39
Figura 3.29: Canales en espectro SWIR. Fuente elaboración propia..... 40
Figura 3.30: Comparación Diagrama de Cromaticidad en Espectro Visible y Espectro SWIR. Fuente elaboración propia. 41

1. Introducción

1.1. Introducción General

A medida que la tecnología avanza, se han desarrollado diversas técnicas y sistemas para capturar imágenes en diferentes rangos espectrales, lo que ha permitido la obtención de información más detallada y especializada para uso en distintas aplicaciones, tanto científicos como tecnológicos.

Esta investigación se centra en el estudio de la colorimetría en la captura de imágenes en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR, Short-Wave Infrared). El SWIR abarca una porción del espectro electromagnético que se extiende más allá del espectro visible, aproximadamente entre 1000[nm] y 2500[nm], permitiendo la captura de información que no es visible al ojo humano.

En este estudio se trabajará con una cámara SWIR de alta sensibilidad y resolución. Además, se considerarán los componentes esenciales del set-up óptico, incluyendo filtros y lentes, que desempeñan un papel importante en la selección y manipulación de las longitudes de onda en las que se busca trabajar.

Una característica importante a tener en cuenta es que las imágenes capturadas en el SWIR son monocromáticas, por lo que no tiene información de colores. Este estudio se basará en obtener imágenes a color a partir de capturas SWIR mediante el uso de filtros selectivos de diferentes longitudes de onda, y posteriormente asignar a cada imagen monocromática un canal del RGB (Rojo, Verde, Azul), finalmente se busca desarrollar un modelo para obtener imágenes a color en el SWIR.

La capacidad de obtener imágenes a color en el rango SWIR puede abrir nuevas posibilidades en una variedad de aplicaciones. Actualmente se utiliza para usos como la identificación de materiales, la visión nocturna mejorada, la detección de objetos ocultos y muchas otras áreas de interés científico y tecnológico.

Se explorarán los fundamentos teóricos, el diseño experimental, el procesamiento de imágenes y el análisis de resultados relacionados con la captura para finalmente realizar la reconstrucción de las imágenes a color.

1.2. Trabajos Previos

A continuación, se presentará la revisión bibliográfica para el proyecto, cuyo propósito es comprender y familiarizarse con los conceptos y fenómenos físicos con los que se va a trabajar. Además de un estudio de los componentes a utilizar en el set-up, la obtención y análisis de imágenes, y el estudio de colorimetría.

1.2.1 *Espectro electromagnético e Interacción de la luz.*

[1] E. Hecht, Optics. Addison-Wesley, 2002.

Proporciona una comprensión detallada de los principios fundamentales y las aplicaciones de la óptica. Cubre temas como la propagación de la luz, la absorción, reflexión, transmisión y refracción, proporcionando una base sólida para comprender la interacción entre la luz y la materia.

[2] P. A. Tipler y G. Mosca, Physics for Scientists and Engineers: With Modern Physics (Vol. 3). W. H. Freeman, 2017.

Ofrece una visión detallada de cómo varía la energía y las propiedades de las ondas electromagnéticas en diferentes regiones del espectro, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Incluido el espectro SWIR, que es el rango espectral de interés para este estudio.

1.2.2 *Fundamentos y teoría del SWIR*

[3] S. V. Lights, "A Short Introduction to Shortwave Infrared (SWIR) imaging," Technology White Paper. 2019.

En este paper se puede obtener información sobre las longitudes de onda correspondientes al espectro infrarrojo, además de las estructuras de los sensores que trabajan en esta zona y diversas aplicaciones relacionadas, las cuales pueden ser útiles para conocer el potencial de esta área.

[4] T. Tobita, "Short-Wavelength Infrared Imaging: Theory, Techniques, and Applications," Springer, 2006.

Las imágenes en el infrarrojo de onda corta (SWIR) pueden aportar un contraste útil a situaciones y aplicaciones en las que el visible o las cámaras termográficas son ineficaces. Este documento definirá la tecnología infrarroja de onda corta y discutirá desarrollo de aplicaciones de imágenes.

1.2.3 Cámara SWIR y sus lentes.

[5] B. E. A. Saleh, "Fundamentals of photonics," Wiley, 1991.

En este libro se puede encontrar información en conceptos tales como:

- Propiedades de los medios ópticos, lo que ayudaría a comprender cómo la luz se comporta al pasar a través de diferentes materiales y cómo eso afecta la formación de imágenes.
- Teoría de las ondas electromagnéticas y la naturaleza de la luz, ya que esto podría proporcionar una base para comprender los conceptos de espectro electromagnético y cómo se relaciona con la captura de imágenes en el rango SWIR.
- Sistemas ópticos, incluyendo lentes, prismas y sistemas de iluminación, ya que estos componentes son esenciales para la captura de imágenes de calidad y podrían ser relevantes para entender cómo se pueden mejorar las imágenes capturadas con cámaras SWIR.

[6] M. P. Hansen, "Overview of SWIR detectors, cameras, and applications," in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, vol. 6940, p. 694002-1-694002-12, 2008.

De este paper se analiza el aporte en distintas situaciones que puede entregar las imágenes tomadas en el SWIR, aplicaciones muy útiles, como por ejemplo en vigilancia cuando hay un ambiente con espesa neblina.

Resalta la importancia de estas cámaras y los valiosos usos que se le puede dar a través de lo que se puede llegar a observar con ellas.

1.2.4 Colorimetría y análisis de imágenes.

[7] S. Shevell, "The Science of Color," Oxford University Press, 2003.

Este libro es una introducción a la ciencia del color para aquellos que no tienen experiencia previa en el tema. Los autores describen los conceptos fundamentales de la medición y especificación del color, y ofrecen una amplia cobertura de la teoría del color y la percepción del color.

[8] D. Malacara, Color Vision and Colorimetry: Theory and Application. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

Proporciona una cobertura exhaustiva de los conceptos básicos de la percepción del color, incluidos los aspectos fisiológicos y psicológicos, así como los modelos matemáticos utilizados para describir y cuantificar el color.

[9] Z. Guo, Q. Guo, H. Gao et al., "Coloring the Short-Wave Infrared: A Study on False Color Mapping for SWIR Images," in *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 9, pp. 4500-4512, 2019.

Este estudio se centra en el desarrollo de técnicas de asignación de colores para imágenes en SWIR con el objetivo de mejorar la visualización de características geológicas y la interpretación de datos. Se exploran diferentes métodos de mapeo de colores y se evalúa su efectividad a través de experimentos y comparaciones visuales.

[10] Liu, Y. Fu, P. Zhou, Y. Zhuan, K. Zhong and B. Guan, "A real-time 3D shape measurement with color texture using a monochromatic camera," in *Optics Communications*, vol. 474, p. 126088, 2020.

En este artículo se puede estudiar la construcción de imágenes a color a partir de una cámara monocromática, cabe destacar que en el campo de la fotografía, las cámaras RGB suelen ser mucho más caras que las cámaras monocromáticas.

En el espacio de color RGB, el rojo, el verde y el azul se definen como tres colores base y el color resultante es una combinación lineal de los colores base. Como resultado, si se conocen los componentes de rojo, verde y azul, se puede obtener el color real combinándolo, por tanto, la imagen en color real se puede obtener combinando los tres monocromos capturados con diferentes colores de proyección.

[11] M. Gerken, H. Schlemmer, C. Siemens, "Colorimetry and multispectral imaging in the shortwave infrared," *Proc. SPIE 10624, Infrared Technology and Applications XLIV*, May 2018.

Este documento tiene un estudio similar a lo que se quiere hacer, se centra en experimentos sobre la colorimetría en imágenes en el SWIR, incluye temas como principios básicos de la colorimetría SWIR, selección de filtros, comparación de colores de diferentes objetos y su representación en un diagrama de cromaticidad, medición de reflectancia, y comparación de resultados de colorimetría en el SWIR y colorimetría en el visible.

Permitirá obtener información valiosa para la familiarización con el experimento a realizar.

1.3. Discusión

Para el primer apartado, se proporciona una base sólida para comprender el espectro infrarrojo de onda corta y su aplicación en imágenes, donde podemos analizar la relevancia que tiene trabajar en este espectro y las propiedades que nos puede entregar. Se introduce además los equipos necesarios para trabajar en esta área, de los cuales destacan cámaras, filtros, entre otros. Por otra parte, se compara y se enfatiza en la utilidad que tienen estas cámaras en situaciones donde las cámaras visibles o termográfica son ineficientes.

En la segunda parte, se centra en el estudio del equipo necesario para trabajar en este espectro, lo que será útil para el armado de nuestro set-up óptico. Se puede ver la información sobre las propiedades de los medios ópticos, teoría de ondas electromagnéticas, y todo lo relacionado con cómo se comporta la luz al pasar a través de diferentes materiales. También nos permitirá familiarizarnos con sistemas ópticos que se utilizarán en nuestros experimentos, donde utilizaremos lentes, filtros y cámaras principalmente. Por otro lado, destaca las contribuciones que se han hecho al trabajar con la captura de imágenes en el SWIR, tales como en el área de vigilancia en condiciones de neblina, análisis de estados de minerales y en agricultura.

Finalmente, se estudió colorimetría, la cual es la parte final y fundamental para poder desarrollar un modelo de colorimetría en este espectro, luego de ya haber obtenido las imágenes monocromáticas, se espera hacer un trabajo y análisis profundo en la transformación a color y el color obtenido, a través de la comparación de colores de diferentes objetos y su representación en un diagrama de cromaticidad, medición de reflectancia, comparación de resultados de colorimetría en el SWIR y colorimetría en el visible. Para ello necesitamos tener una base teórica firme, la cual la obtendremos de la bibliografía presentada en este ítem, donde se estudiará la teoría y percepción del color, técnicas de asignación de colores, entre otros.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un modelo de colorimetría para imágenes obtenidas en el SWIR. Para ello, primero se necesita hacer un estudio acerca de este espectro y las características esperadas que nos puede entregar, además de un estudio riguroso de conceptos de colorimetría. Luego, se estudiará el funcionamiento de una cámara IR y los elementos que la componen. Además de los análisis previos que se necesitan para escoger los filtros a ocupar.

Finalmente, estudiar la colorimetría de estas imágenes, obteniendo un modelo de colorimetría para las capturas monocromáticas en este espectro, lo que permitirá apreciar a color y las distintas características que ofrece el SWIR.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la colorimetría y las distintas características que se pueden obtener en imágenes en el SWIR y no en el espectro visible.
- Implementación de un set-up óptico capaz de obtener imágenes en distintas bandas espectrales dentro del SWIR.
- Analizar y procesar imágenes SWIR, a través del procesamiento de datos y reconstrucción RGB mediante Síntesis Aditiva de Color.
- Desarrollar un modelo que permita estudiar y obtener la colorimetría de imágenes en el SWIR.

1.5. Alcances y Limitaciones

- El alcance es la cámara montada, operando en un software adecuado.
- Los análisis y gráficos resultantes de modelarán en MatLab y Excel.
- La limitación será el uso exclusivo del software y hardware disponible en el laboratorio SP&R.
- Cámara utilizada por varios alumnos.
- Disponibilidad limitada de uso de la cámara, se puede utilizar sólo bajo supervisión de profesor y/o ayudante.

1.6. Metodología y Temario

La metodología de trabajo será presencial, la implementación del set-up óptico se realizará en el Laboratorio SP&R, acá se obtendrán las imágenes en distintas bandas espectrales del SWIR. Mientras que el trabajo de los resultados se hará en los software MatLab y Excel, que es donde se llevará a cabo el procesamiento de los datos, el análisis y la reconstrucción de las imágenes monocromáticas de cada banda para obtener la imagen a color mediante Síntesis Aditiva de Color.

Para el desarrollo de esta Memoria, el temario se conforma primero por los fundamentos teóricos, lo cual se basa principalmente en conceptos de la ciencia de la Colorimetría, y el espectro SWIR y sus propiedades. Luego, se muestra la implementación del set-up utilizado y sus componentes.

Finalmente, se muestran los resultados, procesamiento, reconstrucción de imágenes y las conclusiones.

1.7. Definición del Problema

En la actualidad, las imágenes a color son reconstruidas a partir de imágenes monocromáticas en el rango visible y el diagrama de cromaticidad. Para imágenes capturadas fuera del rango visible, se ha intentado obtener imágenes a color mediante el concepto de "falso color". Sin embargo, hasta la fecha, esta práctica carece de una metodología basada en la colorimetría.

En este trabajo, proponemos abordar esta problemática mediante la adaptación de los conceptos de colorimetría para su aplicación en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR). Nuestra propuesta implica desarrollar una metodología sistemática que permita obtener imágenes a color en el SWIR, utilizando como base los principios de la colorimetría.

Para lograr este objetivo, diseñaremos y desarrollaremos un sistema óptico especializado para la captura de imágenes en el espectro SWIR. Este sistema será tricromático, lo que implica capturar información en tres bandas espectrales específicas. Utilizaremos una cámara SWIR Acuros 1920 de alta sensibilidad y resolución para la adquisición de datos.

Una vez obtenidas las imágenes en el SWIR, aplicaremos técnicas de procesamiento de imágenes y colorimetría para reconstruir las imágenes a color. Además, generaremos un diagrama de cromaticidad correspondiente al espectro SWIR, lo que nos permitirá visualizar y analizar las características cromáticas de las imágenes capturadas en este rango espectral.

Nuestra solución no solo contribuirá a la mejora de la calidad y utilidad de las imágenes en el SWIR, sino que también abrirá nuevas posibilidades de aplicación en diversas áreas donde ya se trabajará en este espectro, pero de manera monocromática, como la agricultura, la seguridad, la exploración geológica y la inspección de materiales.

1.8. Hipótesis de Trabajo

Es posible, mediante imágenes tricromáticas en el SWIR, construir una imagen a color utilizando técnicas de colorimetría. Esta metodología permitirá capturar información en tres diferentes longitudes de onda dentro del rango del SWIR y asignarla a los canales RGB, generando una representación visual que combine las propiedades espectrales del SWIR con las características perceptuales del color humano. Dado que el SWIR proporciona información valiosa sobre la reflectancia y absorción de los materiales, se espera que la imagen resultante conserve estas

propiedades, lo que permitirá una mejor caracterización y distinción de los objetos y materiales en la escena. Este enfoque innovador también podría proporcionar una mayor fidelidad y precisión en la representación de colores en comparación con los métodos existentes de "falso color" en el SWIR. Además, se espera que el desarrollo de un modelo de colorimetría específico para el SWIR abra nuevas posibilidades en una variedad de aplicaciones, como la agricultura, la seguridad, la exploración geológica y la inspección de materiales, al permitir la obtención de imágenes a color en un espectro hasta ahora poco explorado.

2. Marco teórico

A continuación, presentamos el marco teórico que describe los elementos esenciales utilizados para abordar el problema identificado y la metodología propuesta para su solución.

2.1. Espectro Electromagnético

Se define como la representación gráfica de un conjunto de ondas electromagnéticas caracterizadas por la radiación emitida, se visualiza en la Figura 2.1. El espectro electromagnético está definido por bandas de operación catalogadas por su longitud de onda de operación o por la potencia de sus ondas electromagnéticas. Este incluye Rayos Gamma, Rayos X, Radiación UV, Luz Visible, Radiación Infrarroja y Ondas Radioeléctricas. La banda más conocida corresponde al Visible (VIS) que representa todas las ondas visibles por el ojo humano.[2]

En este estudio se trabaja con la banda del SWIR (sub rango del Infrarrojo) para obtener información de procesos o efectos no perceptibles para el humano.

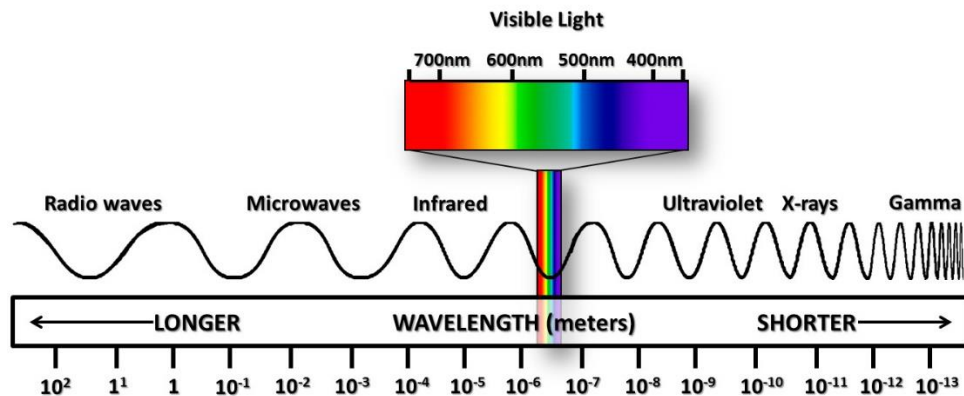


Figura 2.1: Espectro Visible [1]

2.2. Interacción entre la luz y la materia

La interacción entre la luz y la materia abarca diversos fenómenos fundamentales, como la absorción, reflexión, transmisión y refracción de la luz.

Estos fenómenos son ampliamente estudiados en el campo de la óptica y son fundamentales para comprender cómo la luz se comporta al interactuar con diferentes tipos de materiales.[1]

2.2.1 Absorción

Fenómeno fundamental en el cual la energía de los fotones de luz se transfiere a los átomos o moléculas del material, resultando en un aumento de la energía interna del material. Representado en la Figura 2.2.

La cantidad de luz absorbida por un material depende de diversos factores, incluyendo la naturaleza del material y la longitud de onda de la luz incidente. [1]

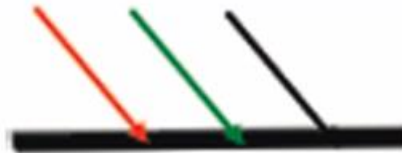


Figura 2.2: Fenómeno Absorción [1]

-Reflexión: Fenómeno en el cual la luz incidente cambia de dirección al llegar a la superficie de un material y vuelve al medio del que proviene. Representado en la Figura 2.3.

Puede ocurrir de dos maneras principales: reflexión especular, en la cual la luz se refleja de manera ordenada en una sola dirección, y reflexión difusa, en la cual la luz se dispersa en múltiples direcciones debido a irregularidades en la superficie del material. [1]



Figura 2.3: Fenómeno Reflexión [1]

-Transmisión: Paso de la luz a través de un material transparente sin ser absorbida significativamente ni reflejada.

Este proceso implica la propagación de ondas electromagnéticas a través del material, con una pérdida mínima de energía.

La cantidad de luz transmitida depende de la naturaleza del material, su espesor y la longitud de onda de la luz. Se describe en la Figura 2.4. [1]



Figura 2.4: Fenómeno Transmisión [1]

-Refracción: es el cambio en la dirección de propagación de la luz cuando pasa de un medio a otro con una densidad óptica diferente. Representado por la Figura 2.5.

Este fenómeno se debe a la variación en la velocidad de la luz en diferentes medios, de acuerdo con las leyes de la óptica. [1]



Figura 2.5: Fenómeno Refracción [1]

2.3. Short-Wave Infrared (SWIR)

Corresponde a intensidad radiante contenida en el rango espectral de 900[nm] a 1700[nm], pero también puede ser clasificado desde los 700[nm] a 2500[nm], como se puede ver en la Figura 2.6. Para trabajar en dicho rango espectral es necesario trabajar con óptica especial y con componentes electrónicos capaces de funcionar en el SWIR (Dado que los sensores de silicio tienen un límite superior de 1000[nm]). En esto último destacan los detectores de InGaAs que pueden comprender un rango espectral desde los 550[nm] hasta los 2500[nm].

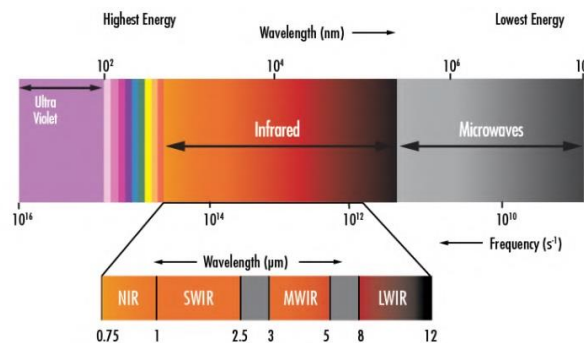


Figura 2.6: Espectro Short-Wave Infrared (SWIR) [3]

Trabajar en la captura de imágenes en este espectro tiene propiedades como:

- Penetración en neblina y humo: El SWIR tiene la capacidad de penetrar la neblina y el humo mejor que otras longitudes de onda más cortas, lo que lo hace útil para la visión en condiciones de visibilidad reducida. [4]
- Visión nocturna: Aunque no es tan efectivo como el infrarrojo térmico para la visión nocturna, el SWIR aún puede captar cierta cantidad de luz en entornos de poca iluminación, lo que lo hace valioso para aplicaciones de visión nocturna. [4]
- Penetración en ciertos materiales: El SWIR puede penetrar ciertos materiales opacos que bloquean la luz visible e incluso el infrarrojo cercano (NIR), lo que permite ver a través de ellos. Esto es especialmente útil en aplicaciones de seguridad, inspección y detección. [4]
- Identificación de contenido de recipientes: Dado que ciertos materiales son transparentes en el SWIR, como algunos plásticos y líquidos, esta longitud de onda es útil para identificar el contenido de recipientes opacos, como botellas o contenedores sellados. [4]
- Detección de humedad y contenido de agua: El SWIR es sensible a la absorción de agua y humedad, lo que permite detectar cambios en el contenido de agua en suelos, vegetación y otros materiales, lo que puede ser crucial en aplicaciones agrícolas y de monitorización ambiental. [4]
- Estado de vegetación: La reflectancia en el espectro SWIR puede proporcionar información sobre la salud y el estado de la vegetación, ya que ciertos índices espectrales en esta longitud de onda están relacionados con la estructura y el contenido de humedad de las plantas. [4]

2.4. Radiometría

Es el estudio y medición de la energía electromagnética en todas las longitudes de onda. Se enfoca en la cantidad de energía radiante emitida, reflejada o transmitida por un objeto, independiente de cómo esta energía pueda ser percibida por el ojo humano. Se mide con instrumentos electrónicos. [5]

2.4.1 Ángulo sólido

El ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que se corresponde con la zona del espacio limitado por una superficie cónica, representado en la Figura 2.7. Este se mide en esterorradianes y está definido por la ecuación (1).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (1)$$

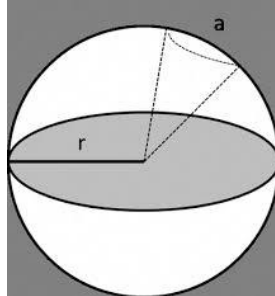


Figura 2.7: Ángulo sólido [5]

2.4.2 Flujo Radiante (Φ_e)

Es la cantidad total de energía radiante emitida, reflejada o transmitida por una fuente en todas las direcciones. También se puede definir como el cociente entre la energía en forma de radiación por unidad de tiempo. Está definida por la ecuación (2)

$$\phi_e = \int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{dQ}{dt} [W] \quad (2)$$

Donde: - $E(\lambda)$: Distribución espectral de la energía radiante de la fuente luminosa.

- $d\lambda$: Diferencial de longitud de onda.

- dQ : Cantidad de energía radiante.

- dt : Intervalo de tiempo.

2.4.3 Intensidad Radiante (I_e):

Es la cantidad de energía radiante emitida en una dirección específica por unidad de ángulo sólido, ecuación (3)

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

Donde: - $d\phi_e$: Diferencial de flujo radiante.

- $d\Omega$: Diferencial de ángulo sólido en esterorradianes.

2.4.4 Irradiancia (E):

Es la cantidad de energía radiante incidente por unidad de área en una superficie receptora, definida por la ecuación (4). En esta, se deben incluir todas las direcciones comprendidas en el ángulo sólido.

$$E = \frac{d\phi_e}{dS} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

Donde: $-d\phi_e$: Diferencial de flujo radiante.

$-dS$: Diferencial de área en metros cuadrados.

2.4.5 Radiancia (L_e)

Es la cantidad de energía radiante emitida, reflejada o transmitida por unidad de área de una superficie emisora, definido por la ecuación (5). También se puede definir como la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo sólido incidente en un elemento de superficie centrado en un punto en el espacio que se propaga en una dirección específica.

$$L_e = \frac{d^2\phi_e}{d\omega ds_0 \cos \theta} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad (5)$$

Donde: $-d\phi_e$: Diferencial de flujo radiante.

$-d\omega$ es el diferencial de ángulo sólido en estereorradianes (sr).

$-dS_0$: Diferencial de área en metros cuadrados.

2.5. Fotometría

Es el estudio y la medición de la luz visible tal como es percibida por el ojo humano. Se centra en cómo la energía radiante se percibe como luz por el sistema visual humano, teniendo en cuenta las diferencias en la sensibilidad espectral del ojo a diferentes longitudes de onda. [5]

2.5.1 Flujo luminoso (Φ_v)

Es la cantidad total de energía luminosa emitida, reflejada o transmitida por una fuente y se mide en lúmenes (lm), definida por la ecuación (6).

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_0^\infty V(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

Donde: - K_m : Constante de normalización

- $V(\lambda)$: Función de sensibilidad espectral del ojo humano.

- $E(\lambda)$: Distribución espectral de la energía radiante de la fuente luminosa.

2.5.2 Intensidad luminosa (I_v)

Es la cantidad de energía luminosa emitida en una dirección específica por unidad de ángulo sólido y se mide en candelas (cd), representada por la ecuación (7).

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (7)$$

Donde: - Φ_v : Flujo luminoso (lm)

- Ω : Ángulo sólido en estereorradianes (sr) que subtiende la fuente desde el punto de observación.

2.5.3 Iluminancia (E)

Es la cantidad de flujo luminoso por unidad de área y se mide en lux (lx), definida por la ecuación (8).

$$E = \frac{d\Phi_v}{dS} [lx] \quad (8)$$

Donde: - $d\Phi_v$: Diferencial del flujo luminoso [lm]

- dS : Diferencial de área [m^2]

2.5.4 Luminancia (L_v)

Es la cantidad de luz que es emitida, reflejada o transmitida por una superficie en una dirección específica por unidad de área y ángulo sólido, y se mide en candelas por metro cuadrado por estereorradián. Se representa por la ecuación (9).

$$L_v = \frac{d^2\phi_v}{d\omega ds_0 \cos \theta} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad (9)$$

2.6. Ciencia de la Colorimetría

Es una disciplina que estudia la medición, reproducción, análisis y percepción del color a través del ojo humano. Se basa en principios físicos, fisiológicos, psicológicos y matemáticos para proporcionar una base sólida para el manejo y control del color en diversas aplicaciones, desde la fotografía y el diseño hasta la industria textil y la medicina.

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha desempeñado un papel fundamental en la estandarización de la colorimetría al desarrollar sistemas de coordenadas y estándares que permiten la medición y comunicación precisa del color.

La colorimetría aborda varios aspectos relacionados con el color, incluida la percepción del color, la medición de la luz y el color, la reproducción del color, la calidad del color y la correlación entre las medidas de color y la percepción visual.

Uno de los principales objetivos de la colorimetría es desarrollar modelos y sistemas que permitan cuantificar y comunicar el color de manera precisa y consistente. Esto incluye el desarrollo de espacios de color, como el CIE XYZ y el CIELAB, que proporcionan una representación matemática del color perceptualmente uniforme y son ampliamente utilizados en aplicaciones de colorimetría.

La colorimetría también se ocupa de la calibración y caracterización de dispositivos de captura, visualización e impresión de color, como cámaras, monitores e impresoras, para garantizar la reproducción precisa y consistente del color en diferentes medios y dispositivos.

Además, la colorimetría se aplica en áreas como la evaluación de la calidad del color en productos y materiales, el análisis de imágenes médicas y la investigación científica, donde el color desempeña un papel importante en la interpretación de datos y resultados. [7]

2.7. Percepción del color

Es el proceso mediante el cual el sistema visual humano interpreta y discrimina las diferentes longitudes de onda de la luz visible para crear la sensación de color. Este proceso se lleva a cabo principalmente en la retina del ojo humano, donde los fotorreceptores especializados, conocidos como conos y bastones, responden a la luz incidente y transmiten señales al cerebro para su procesamiento.

La percepción del color no es un mecanismo puramente físico sino también fisiológico y psicológico. Muchos fenómenos interesantes relacionados con el color aparecen cuando se estudia la psicofísica del ojo.[8]

2.7.1 Estructura y funcionamiento del ojo humano

El ojo humano está compuesto por varias estructuras que trabajan en conjunto para permitir la visión, incluyendo la córnea, la pupila, el cristalino y la retina, como se puede visualizar en la Figura 2.8. La luz que entra en el ojo a través de la pupila pasa a través del cristalino, donde se enfoca en la retina, una capa sensible a la luz ubicada en la parte posterior del ojo.

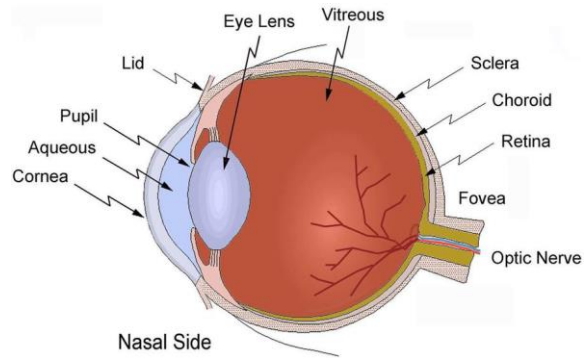


Figura 2.8: Estructura del ojo humano [8]

2.7.2 Conos y bastones

Los conos y los bastones son los dos tipos principales de fotorreceptores en la retina, cada uno con funciones específicas en la percepción del color y la visión en condiciones de luz variable.

En conjunto, los conos y los bastones permiten al sistema visual humano percibir una amplia gama de colores y adaptarse a diferentes condiciones de iluminación para mantener una percepción constante del color.[8]

A. Conos

Son responsables de la visión del color y se dividen en tres tipos:

- Cono L.
- Cono M.
- Cono S.

Cada tipo de cono es más sensible a diferentes longitudes de onda de luz en el espectro visible.

Detectan el número de fotones que llega en el rango visible, este número es diferente por cada longitud de onda. Esta información captada por los 3 conos es interpretada por el cerebro como un color.

B. Bastones

Son más sensibles a la luz en general y juegan un papel importante en la visión en condiciones de poca luz o visión nocturna. A diferencia de los conos, los bastones no son sensibles al color y su distribución en la retina es más uniforme, con una mayor densidad en la periferia de la retina.

Detectan el número de fotones que llegan en ese rango de longitudes de onda, sin importar la longitud de onda en cual llegan.

Aporta información monocromática, a diferencia de los conos.

2.7.3 Sistema LMS

El sistema LMS (Large, Medium y Short) se refiere a los tres tipos de conos sensibles a diferentes longitudes de onda de luz en la retina:

-Cono L: Se les conoce como conos "rojos", son más sensibles a las longitudes de onda largas de luz en el espectro visible, que corresponden al color rojo y naranja, 650[nm].

-Cono M: Se les conoce como conos "verdes", son más sensibles a las longitudes de onda medias de luz en el espectro visible, que corresponden al color verde y amarillo 530 [nm]. Además, los conos "verdes" contribuyen significativamente a la percepción de la luminancia, proporcionando información crucial sobre la intensidad general de la luz.

-Cono S: Se les conoce como conos "azules", son más sensibles a las longitudes de onda cortas de luz en el espectro visible, que corresponden al color azul y violeta, 430[nm].

La sensibilidad espectral de cada cono es representada por la Figura 2.9.

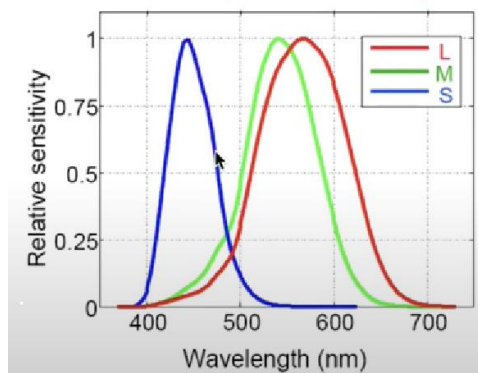


Figura 2.9: Sensibilidad espectral de los Conos [8]

El cerebro combina las respuestas de los receptores para formar una imagen en color.[8]

2.8. Teoría Tricromática

Postula que la mayoría de los seres humanos son tricromáticos, lo que significa que tienen tres tipos de conos sensibles a diferentes longitudes de onda de luz en la retina. Esta teoría establece que cualquier color visible puede ser producido por la combinación adecuada de estímulos de color primarios, correspondientes a los conos sensibles al rojo, verde y azul.

La teoría tricromática explica cómo los seres humanos perciben una amplia gama de colores mediante la combinación de señales de los tres tipos de conos en diferentes proporciones. Esto se debe a que cada tipo de cono responde preferentemente a un rango específico de longitudes de onda en el espectro visible.

Según esta teoría, los estímulos de color primarios son los colores que, al combinarse en diferentes proporciones, pueden generar cualquier otro color visible. En el contexto de la teoría tricromática, los estímulos primarios son los tres tipos de conos sensibles al rojo, verde y azul, que corresponden a las longitudes de onda de luz en el espectro visible asociadas con estos colores.

Cualquier color visible puede ser producido por una combinación de estímulos de color primarios. (Cono L, M y S). [8]

Una sensación de color se describe por tres respuestas espectrales, como describe la ecuación (10).

$$c_i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} s_i(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad , i = 1,2,3 \quad (10)$$

Donde $s_i(\lambda)$: Sensibilidad del cono.

$f(\lambda)$: Distribución espectral de la luz incidente. [8]

2.9. Color Matching Functions

Son conocidas también como funciones de coincidencia, son curvas que describen la sensibilidad relativa del ojo humano a diferentes longitudes de onda de luz en el espectro visible. Estas curvas representan cómo los tres tipos de conos en la retina, tipo L, tipo M y tipo S, responden a la luz en función de su longitud de onda.

El propósito principal de las matching functions es estandarizar y cuantificar cómo un ojo humano promedio percibe y discrimina los diferentes colores en el espectro visible. Estas curvas proporcionan una representación numérica de la sensibilidad relativa de los conos en la retina a diferentes longitudes de onda de luz, lo que permite comprender y modelar la percepción del color

humano de manera objetiva y cuantitativa. La representación gráfica de las CMF está descrita por la Figura 2.10.

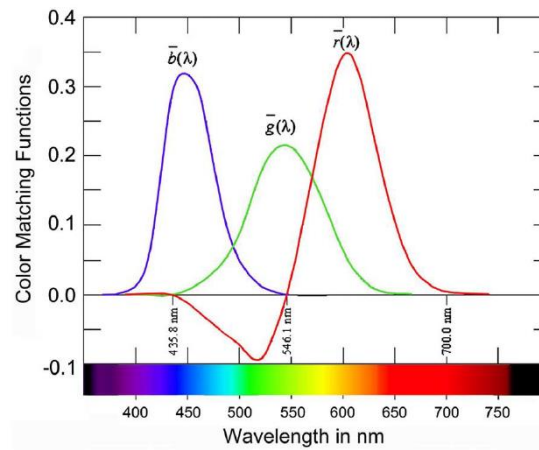


Figura 2.10: Color Matching Functions (CMF) [8]

Para calcular las funciones de emparejamiento de color (CMF) se realizaron experimentos de igualación de colores, el cuál se describe en la Figura 2.11. Se utilizaron luces monocromáticas y se filtraron para obtener una longitud de onda específica, luego se emplean tres luces monocromáticas correspondientes a regiones específicas del espectro visible (rojo, verde y azul) para realizar las igualaciones y ajustes necesarios.[8]

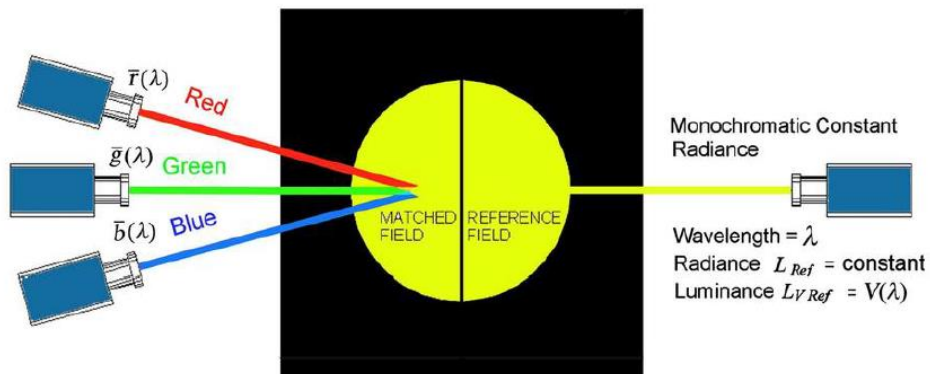


Figura 2.11: Experimento Color Matching Function (CMF) [8]

2.10. Espacio de Color CIE RGB

Es un modelo de color tricromático que se basa en la percepción de los colores primarios rojo, verde y azul por parte del observador humano promedio. Este espacio de color se utiliza comúnmente en aplicaciones de visualización de imágenes y dispositivos electrónicos, como monitores de

ordenador y televisores. El CIE RGB, representado gráficamente en la Figura 2.12, se deriva de las Color Matching Functions y proporciona una representación matemática de cómo se combinan los colores primarios para producir una amplia gama de colores perceptibles por el ojo humano.[8]

Sus valores vienen dados por:

$$R = \int_0^{\infty} P(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \quad (11)$$

$$G = \int_0^{\infty} P(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \quad (12)$$

$$B = \int_0^{\infty} P(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \quad (13)$$

Donde \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} son los valores de las CMF.

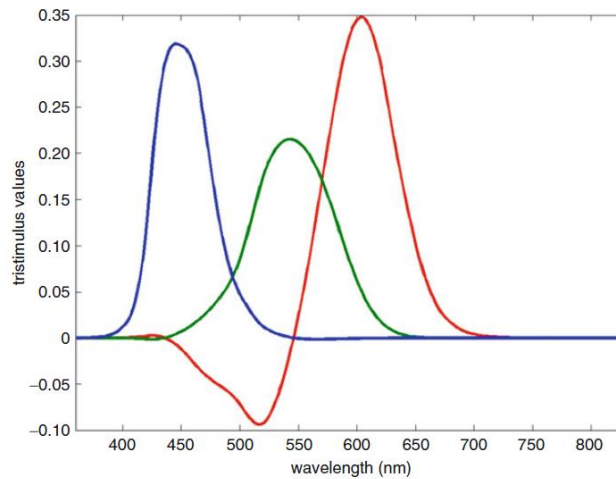


Figura 2.12: Espacio de Color CIE RGB Color Matching Functions [8]

2.11. Espacio de Color CIE XYZ

Es un modelo de color tricromático definido por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) para describir de manera objetiva todos los colores perceptibles por el ojo humano, independientemente de cómo se crean o se perciben. Este espacio de color se basa en el Espacio de color CIE RGB, sólo se le aplica la matriz de transformación de la ecuación (14). El CIE XYZ se utiliza como un estándar de referencia para la medición y especificación del color en diversas industrias, como la impresión, la pintura, la cinematografía y la iluminación, está representado gráficamente por la Figura 2.13. Este espacio de color es esencial para la precisión en la comunicación

y reproducción del color, ya que proporciona una base común para la evaluación y comparación del color en diferentes dispositivos y sistemas de visualización.[8]

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.739 & -1.145 & -0.424 \\ -1.119 & 2.029 & 0.033 \\ 0.138 & -0.333 & 1.105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (14)$$

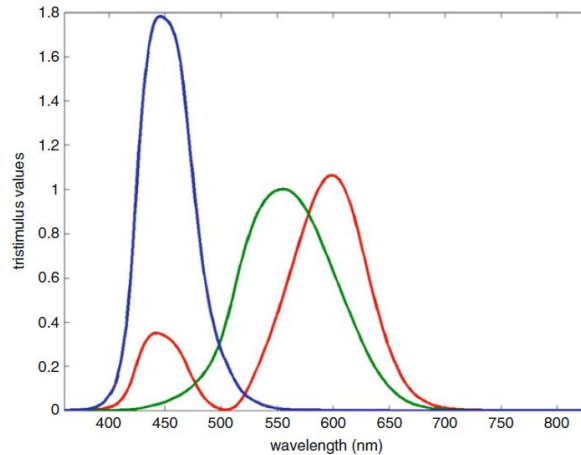


Figura 2.13: Espacio de Color CIE XYZ [8]

2.12. Diagrama de cromaticidad

Es una representación visual de todas las combinaciones posibles de colores que el ojo humano puede percibir. Estas combinaciones se expresan típicamente en términos de coordenadas de cromaticidad, que son valores numéricos normalizados que describen la posición de un color en el diagrama de cromaticidad.

Las coordenadas de cromaticidad se derivan de mediciones espectrales de la luz y se representan en un espacio de color tridimensional, como el espacio de color CIE XYZ. Sin embargo, para una mejor visualización y comprensión, estas coordenadas de cromaticidad se proyectan en un plano bidimensional en el diagrama de cromaticidad CIE xy.

Las coordenadas de cromaticidad en el diagrama de cromaticidad, representado por la Figura 2.14, proporcionan información sobre el tono y la saturación del color, pero no sobre la luminosidad.

Los valores de las coordenadas de cromaticidad están dados por las ecuaciones (15) y (16).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (15)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (16)$$

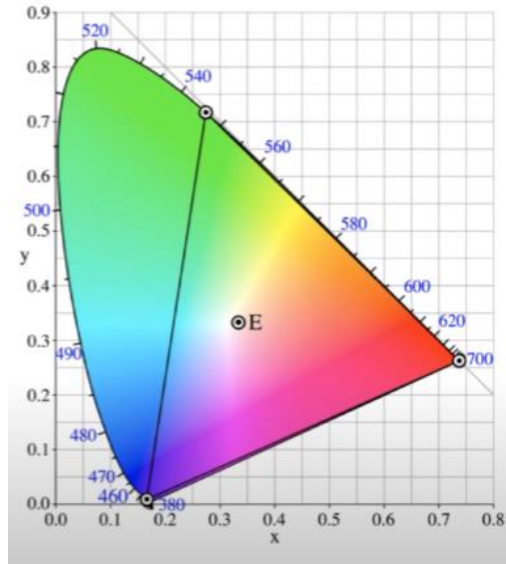


Figura 2.14: Diagrama de Cromaticidad [8]

2.13. Características del color

- **HUE (Matiz):** Es la propiedad del color que nos permite distinguir entre colores diferentes, como rojo, verde o azul. Está relacionado con la longitud de onda dominante de la luz que estimula los diferentes tipos de conos en la retina.
- **Saturación:** Es la pureza o intensidad del color, está determinada por la fuerza relativa de las señales de los tres tipos de conos. Una mayor activación de un tipo de cono en comparación con los otros contribuye a una mayor saturación del color percibido.
- **Luminancia:** Percepción de la brillantez o la oscuridad de un color, está influenciada por la combinación de señales de los conos rojos, verdes y azules. Una mayor activación de los conos en general se asocia con una mayor luminancia del color percibido.

3. Desarrollo experimental

3.1. Medición Irradiancia

3.1.1 Descripción de la experiencia

Esta experiencia tiene como objetivo obtener datos de irradiancia de distintos elementos en el espectro SWIR, tales como agua, suelos desnudos, cielos, pasto, entre otros.

Con esta información obtenida, se estudiará cómo interactúa la irradiación en este rango espectral para así identificar las longitudes de onda más relevantes y con ello poder seleccionar los filtros con las características espectrales más apropiadas para nuestro experimento principal.

Para obtener esto, se procedió a armar un set-up portátil, el cual se llevó al exterior.

3.1.2 Set-up

El set-up de la Figura 3.1 tiene como requisito ser portátil, ya que se debe llevar al exterior, para esto se escogieron los siguientes componentes:

- UPS APC Schneider: Para alimentar el radiómetro NIR-512 en el exterior, ya que se alimenta de 220V.
- Notebook: Para adquirir los datos mediante el software OceanView.
- Radiómetro NIR-512: Mide la irradiancia de los objetos.
- Fibra óptica VIS-NIR: Transmitir la luz.
- Lente colimador: Convertir haz de luz divergente en un haz de luz paralelo.



Figura 3.1: Set-up de Medición de Irradiancia. Fuente elaboración propia.

Se llevó el set-up de la Figura 3.1 en una maleta al exterior y se procedió a medir en distintas partes de la universidad, apuntando la fibra óptica con el lente colimador a los distintos elementos, experimentos descritos en la Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4.

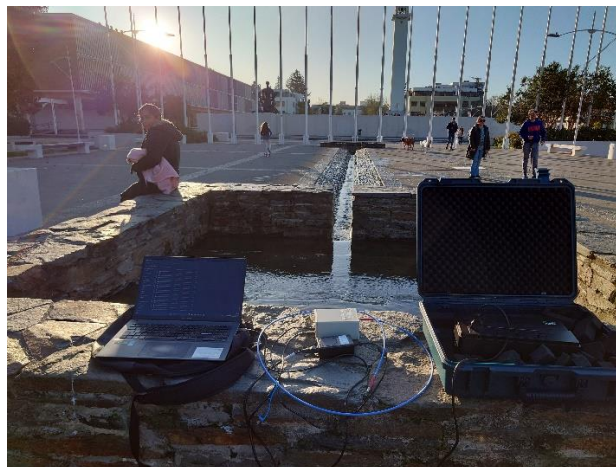


Figura 3.2: Set-up Medición de Irradiancia montado en Exterior. Fuente elaboración propia.

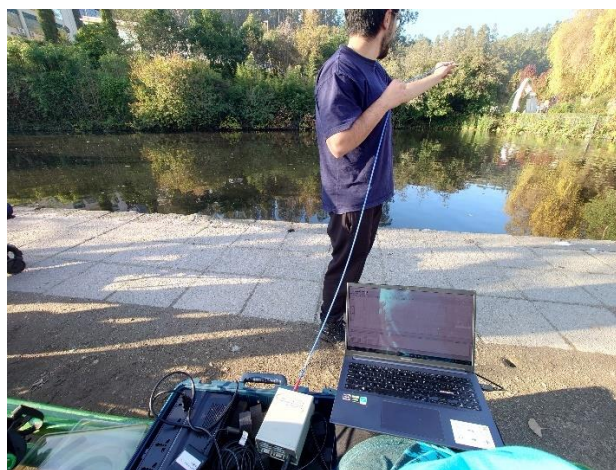


Figura 3.3: Medición de Irradiancia de Agua. Fuente elaboración propia.



Figura 3.4: Medición de Irradiancia de Suelos desnudos. Fuente elaboración propia.

3.1.3 Resultados

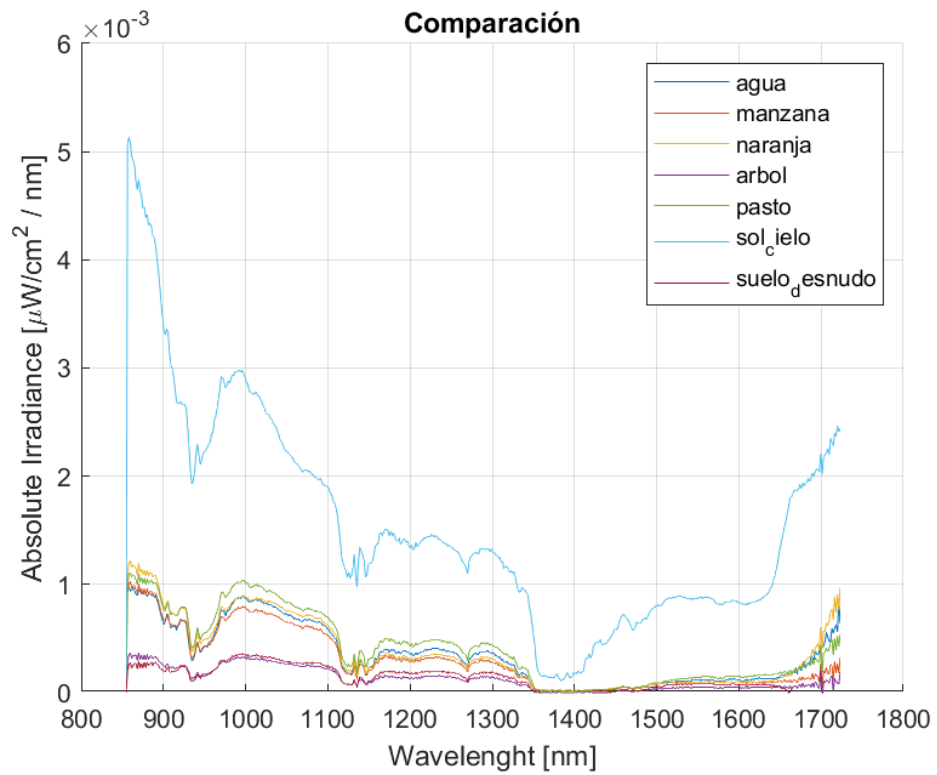


Figura 3.5: Comparación Irradiancias medidas. Fuente elaboración propia.

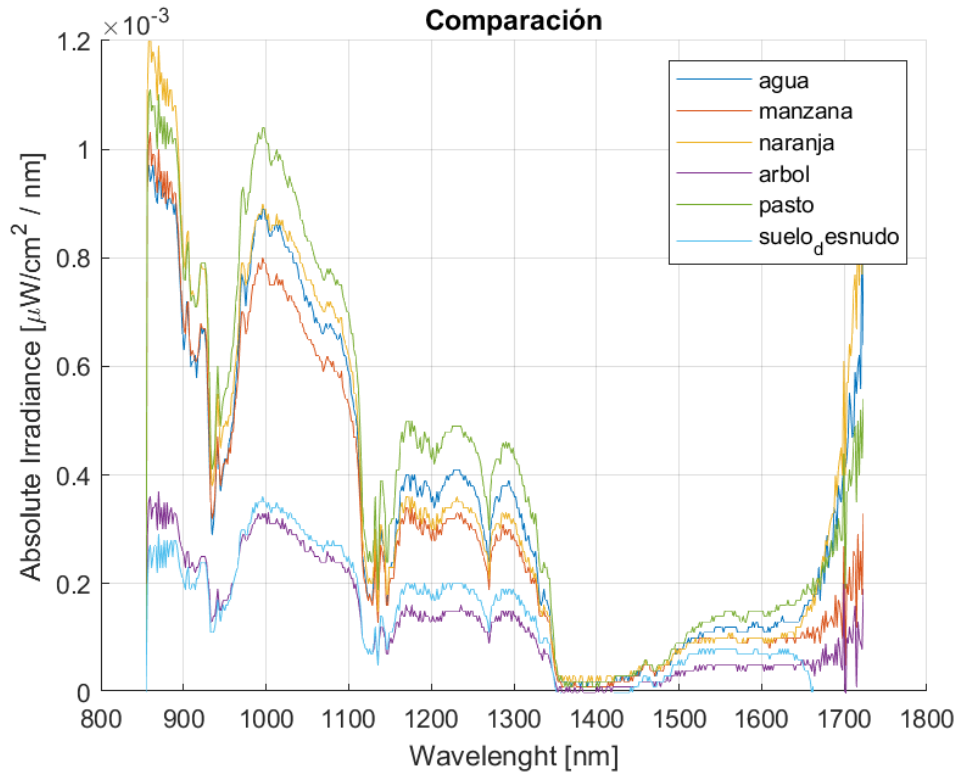


Figura 3.6: Comparación Irradiancias medidas sin sol cielo. Fuente elaboración propia.

En la Figura 3.5 se puede visualizar que se repite un patrón de irradiancia entre todos los elementos.

Por motivos prácticos se graficó en la Figura 3.6 una comparación entre todos los elementos sin el sol, para visualizar mejor este patrón de los valores irradiancia entre los elementos.

Esto nos entrega la información que necesitamos para la elección de nuestros filtros para el experimento principal, donde tendremos como objetivo extraer información de irradiancia de cada rango espectral en 3 canales diferentes, siguiendo la lógica que se realiza en el espectro visible para estudiar colorimetría, como se estudió en el marco teórico.

3.2. Captura y reconstrucción de imágenes en el SWIR.

3.2.1 Descripción de la experiencia

Para obtener una imagen a color, se utilizó la misma lógica con la que se trabaja para tener imágenes a color en el visible, es decir, se obtienen 3 capturas en diferentes rangos espectrales para asignarlo a canales R, G y B, donde cualquier color se puede obtener como una mezcla de ciertas cantidades de cada uno de estos tres canales, lo que se conoce como Síntesis Aditiva de Color. [11]

Con el experimento anterior, elegiremos los filtros para abarcar la mayor información posible en 3 canales distintos.

Luego se procesarán las capturas en MatLab, para mezclarlas y obtener finalmente la imagen a color con las propiedades que nos proporciona el espectro SWIR.

3.2.2 Problemas y observaciones

Se analizaron los filtros disponibles en el Laboratorio que mejor se adaptaran a lo necesitado, pero no estaba disponible ninguno que cubriera las longitudes más cortas del SWIR, por lo que de acuerdo a la disponibilidad, se decidió utilizar uno que cubre gran parte del rango SWIR, incluyendo las longitudes de onda más cortas.

Otro problema que se presentó, por la reducida cantidad de fotones se tuvo que ajustar el tiempo de integración de tal forma que se pudiera obtener un buen histograma, pero manteniendo este tiempo de integración para la captura con los 3 filtros, en algunos casos la imagen igual se ve oscura y con un ruido considerable.

3.2.3 Set-up

El set-up que se utilizó está representado en la Figura 3.7 y se compone de:

- Focos halógenos: Se utilizan este tipo de focos y no LED, debido a que los halógenos producen un espectro continuo de la luz, además pueden emitir en un espectro más amplio de longitudes de onda.
- Rueda de filtros FW102C: Tiene como función almacenar los distintos filtros, tiene una capacidad de 6, además se puede seleccionar el filtro que se quiera utilizar, a través de un botón físico o mediante su software, para este caso se utilizará sólo el botón.
- Filtros: Se utilizaron los filtros FELH1000, FB1300, FB1750.
- Cámara Acuros CQD 1920: Permite obtener imágenes en el rango VIS-SWIR.

- PC con software SVSImagIR: Este software es el que se necesita para poder capturar los datos medidos por la cámara SWIR, además se pueden ajustar varios parámetros, principalmente el tiempo de integración y ADU, como también puede exportar lo obtenido en forma de imágenes PNG y archivos CSV.

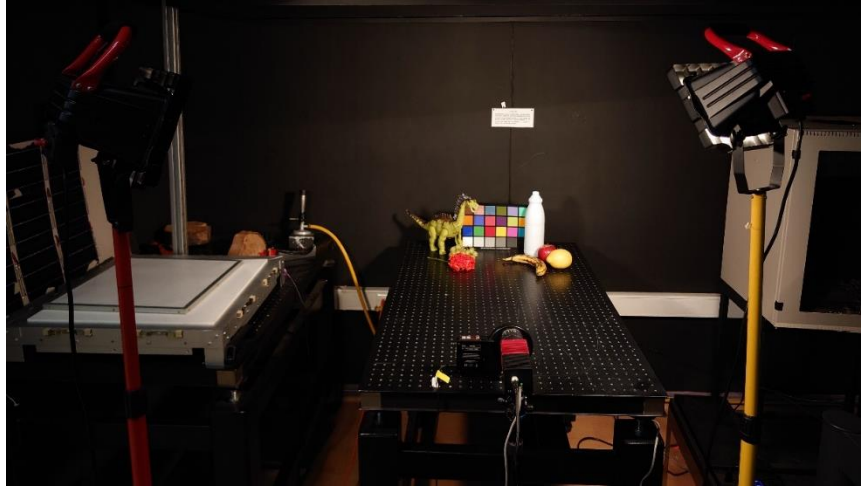


Figura 3.7: Set-up óptico de Captura de imágenes SWIR. Fuente elaboración propia.

3.2.4 Resultados

- Paleta de Colores, Botella de cloro y Jugete.

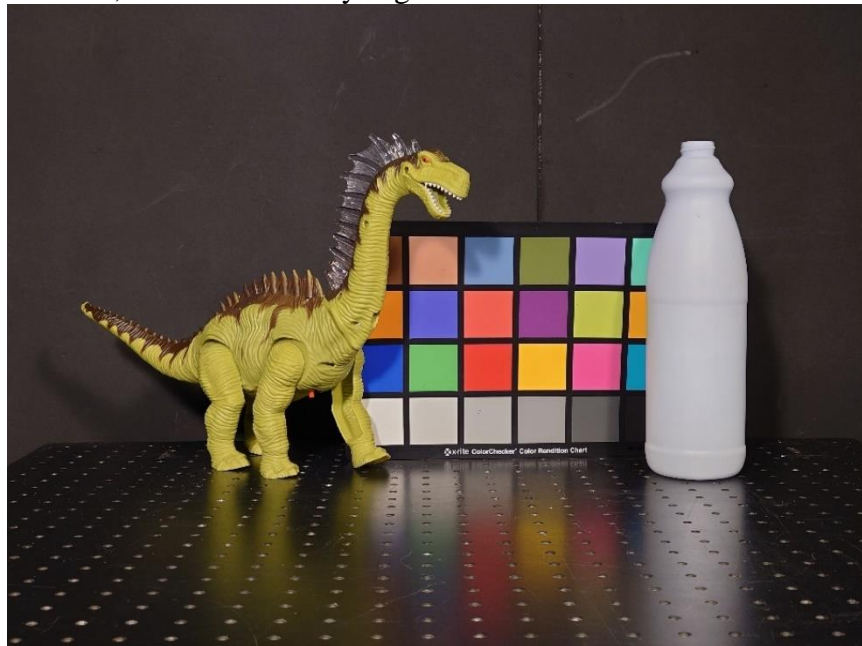


Figura 3.8: Paleta de colores, Botella de cloro y Jugete en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.



Figura 3.9: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.

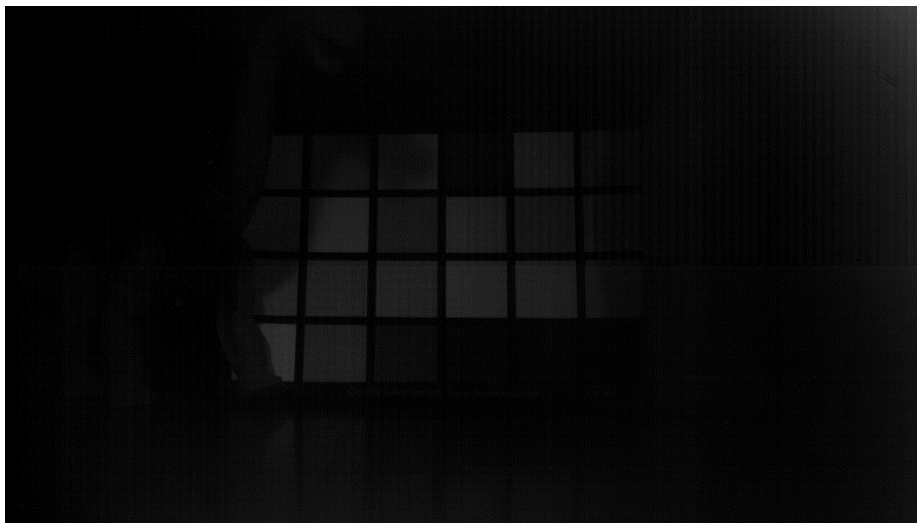


Figura 3.10: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FB1300. Fuente elaboración propia.



Figura 3.11: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete con filtro FB1750. Fuente elaboración propia.

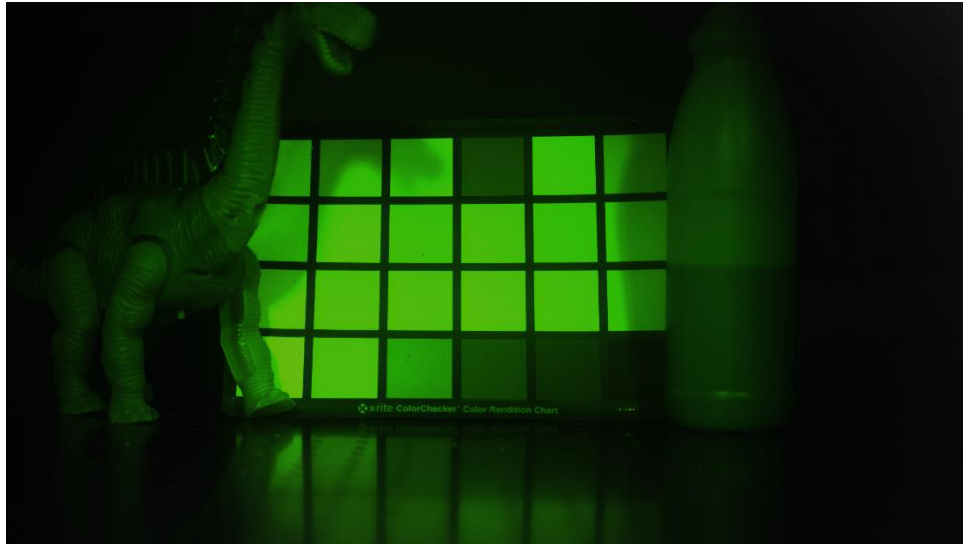


Figura 3.12: Paleta de colores, Botella de cloro y Juguete. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.

- Frutas.

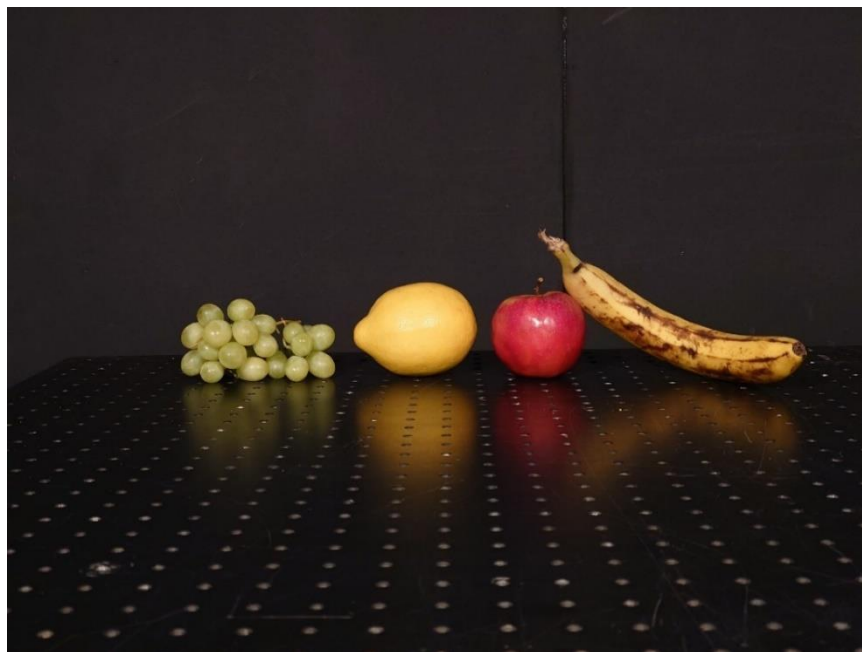


Figura 3.13: Frutas en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.

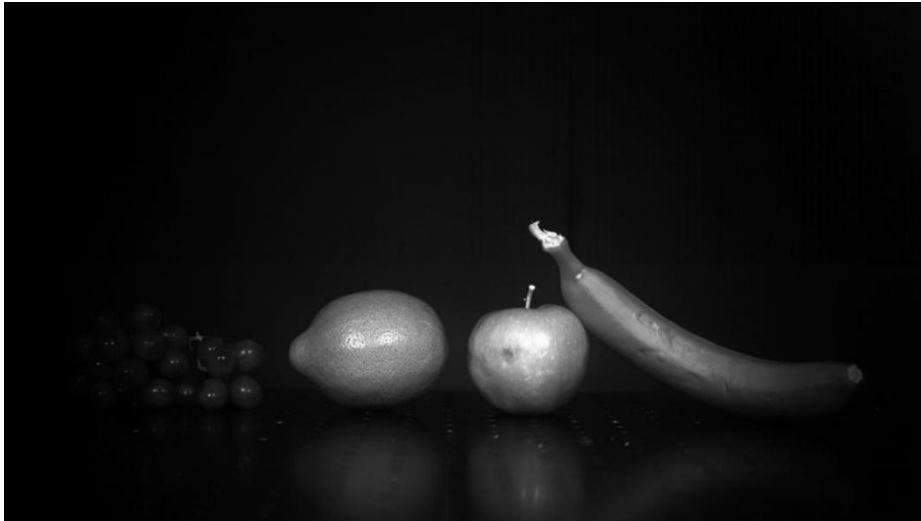


Figura 3.14: Frutas con Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.

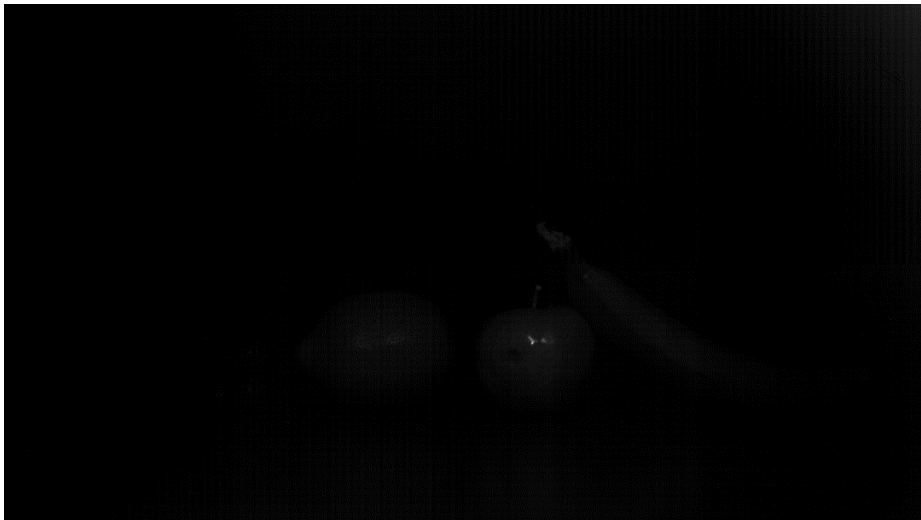


Figura 3.15: Frutas con Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.



Figura 3.16: Frutas con Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.



Figura 3.17: Frutas. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.

- Madera y flores.

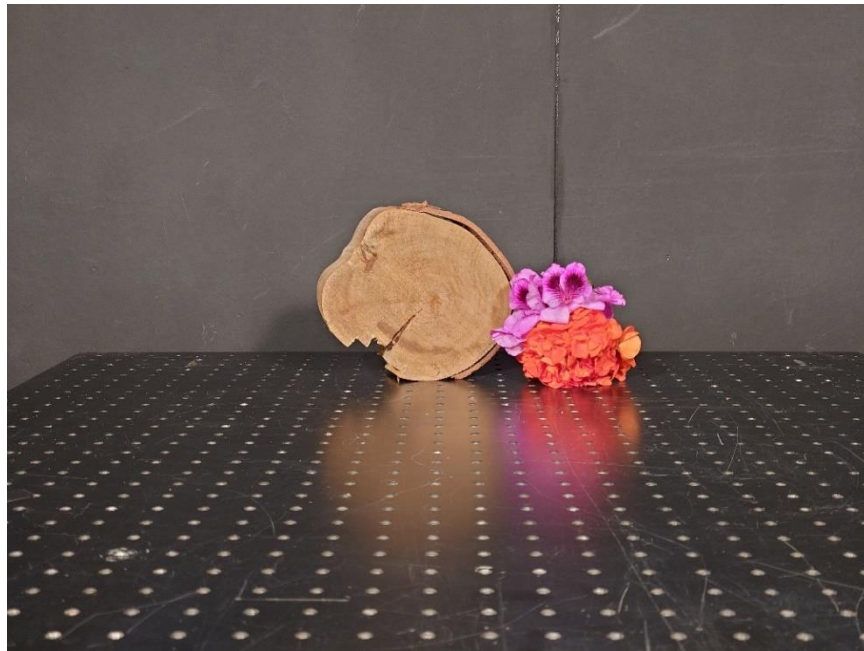


Figura 3.18: Madera y flores en Espectro Visible. Fuente elaboración propia.



Figura 3.19: Madera y flores con Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.

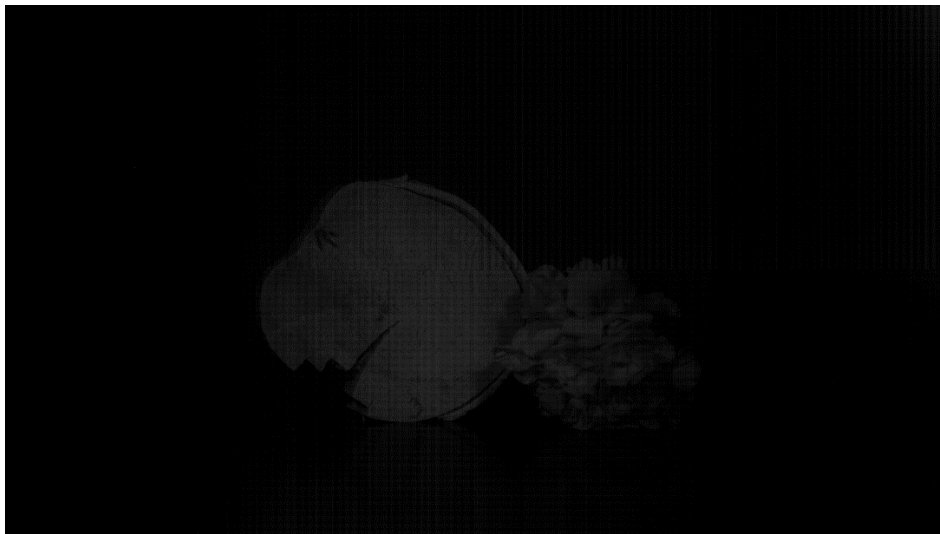


Figura 3.20: Madera y flores con Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.

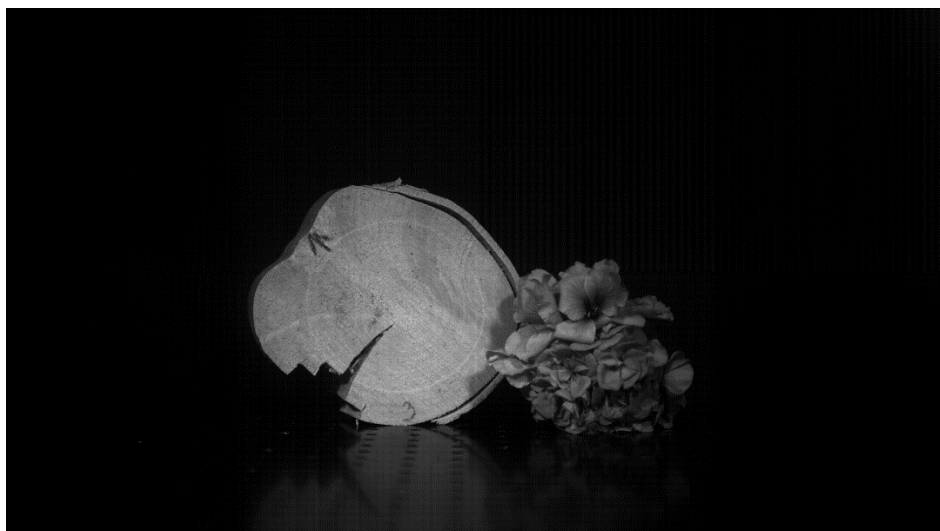


Figura 3.21: Madera y flores con Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.

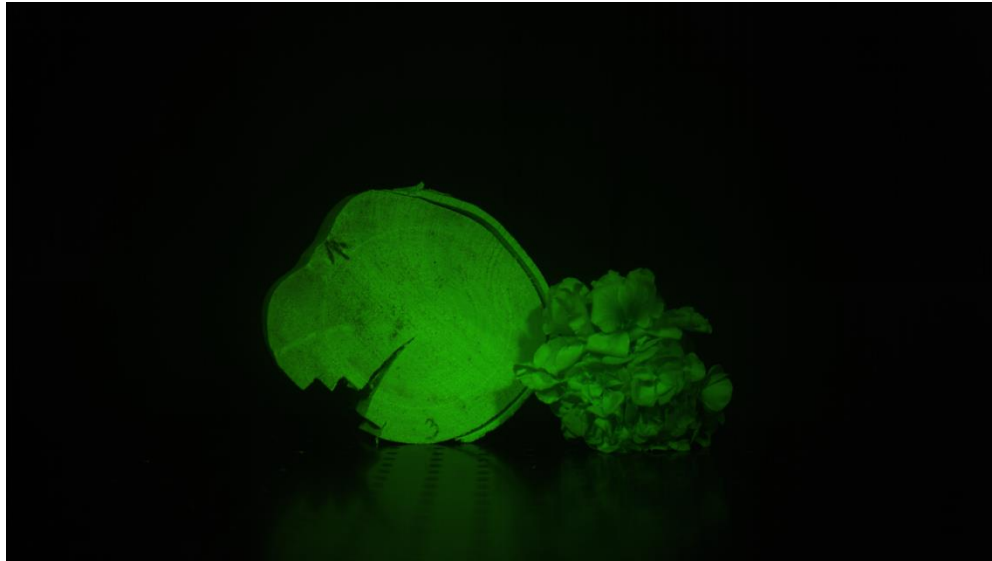


Figura 3.22: Madera y flores. Reconstrucción Color SWIR. Fuente elaboración propia.

Se puede observar en las Figuras 3.8 a 3.22 cómo destacan características propias del SWIR, como la capacidad de poder ver el líquido que contiene la botella de cloro, también daños y rasgaduras en las frutas, madera y flores que no se pueden apreciar en el visible. Principalmente en la imagen capturada con el filtro FB1300, que son las Figura 3.10, Figura 3.15 y Figura 3.20, ya que está cerca de 1400[nm], que es donde se absorbe mayor cantidad de agua, lo que hace ver más oscura la imagen donde existe mayor presencia de líquido.

Cabe notar que en las imágenes finales, Figuras 3.12, Figura 3.17 y Figura 3.22, tienen un dominante verde, esto se debe a la elección de filtros, debido a la disponibilidad en el laboratorio y la necesidad de cubrir gran parte del rango SWIR, para abarcar la parte de las ondas más cortas se tuvo que escoger un filtro que tiene transmitancia en gran parte de todo el espectro SWIR, cuyo canal asignado es verde. Sin duda, es un aspecto por mejorar en el avance de la colorimetría en este espectro, pero de todas formas sigue siendo un gran avance a lo que se ha trabajado hasta ahora en este tema.

3.3. Modelo de Colorimetría en el SWIR.

3.3.1 Descripción de la experiencia

Con el objetivo de establecer un modelo de colorimetría en el SWIR, primero, se buscará obtener la respuesta espectral de cada canal trabajado.

Para ello, se necesitará obtener el espectro de emisión de la fuente de luz, la curva de sensibilidad del sensor de la cámara, así como la transmitancia del lente y de los filtros.

Posteriormente, se realizará la multiplicación de estos espectros para obtener la respuesta espectral final, la cual correspondería a cada canal.

Finalmente, se establecerá una analogía con el sistema CIE RGB que se trabaja en el visible, formando colores en base a 3 canales. Para representar los colores que se pueden representar, se busca realizar un diagrama de cromaticidad, donde primero se deben buscar las coordenadas de cromaticidad. Con esto obtendríamos nuestro sistema de colorimetría.

3.3.2 Set-up

Para medir la transmitancia de los filtros se utilizaron los siguientes componentes:

- Un computador con el software “Ocean Optics SpectralSuite”.
- Fibra óptica VIS-NIR.
- Lente colimador.
- Espectrofotómetro NIR-512.

Cabe destacar que los demás datos espectrales los proporcionan los fabricantes, por lo que sólo se midió por elaboración propia la transmitancia de los filtros.

3.3.3 Resultados

Se graficarán los datos espectrales de:

- Foco Halógeno.
- Sensor Cámara Acuros CQD 1920.
- Lente 25mm.
- Filtro FELH1000.
- Filtro FB1300.
- Filtro FB1750.

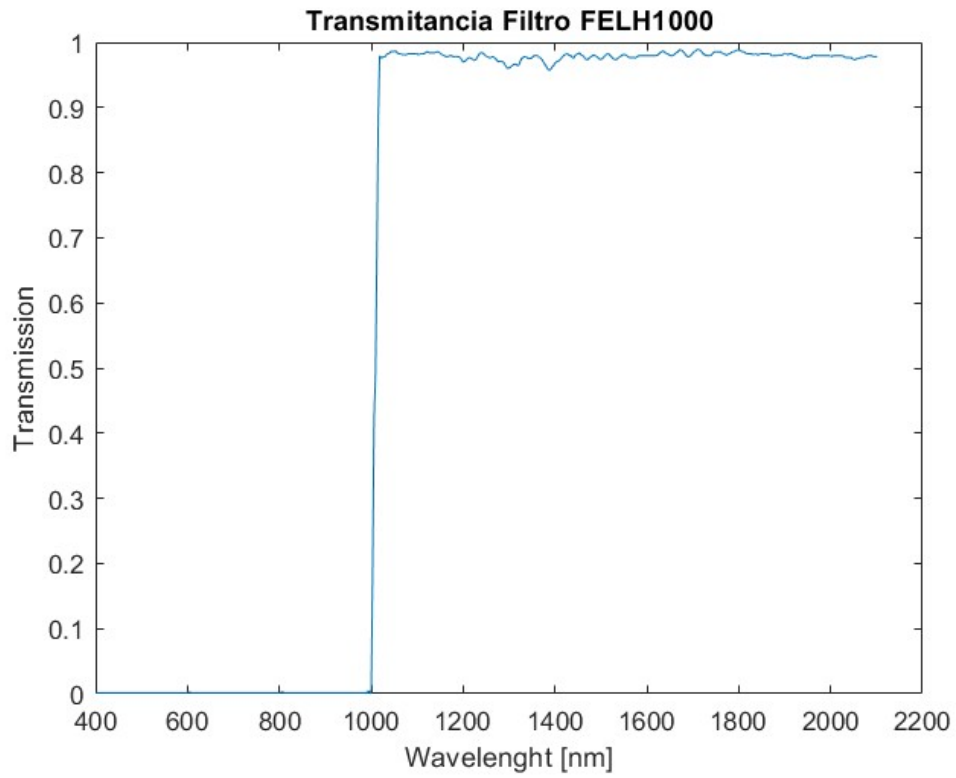


Figura 3.23: Transmitancia Filtro FELH1000. Fuente elaboración propia.

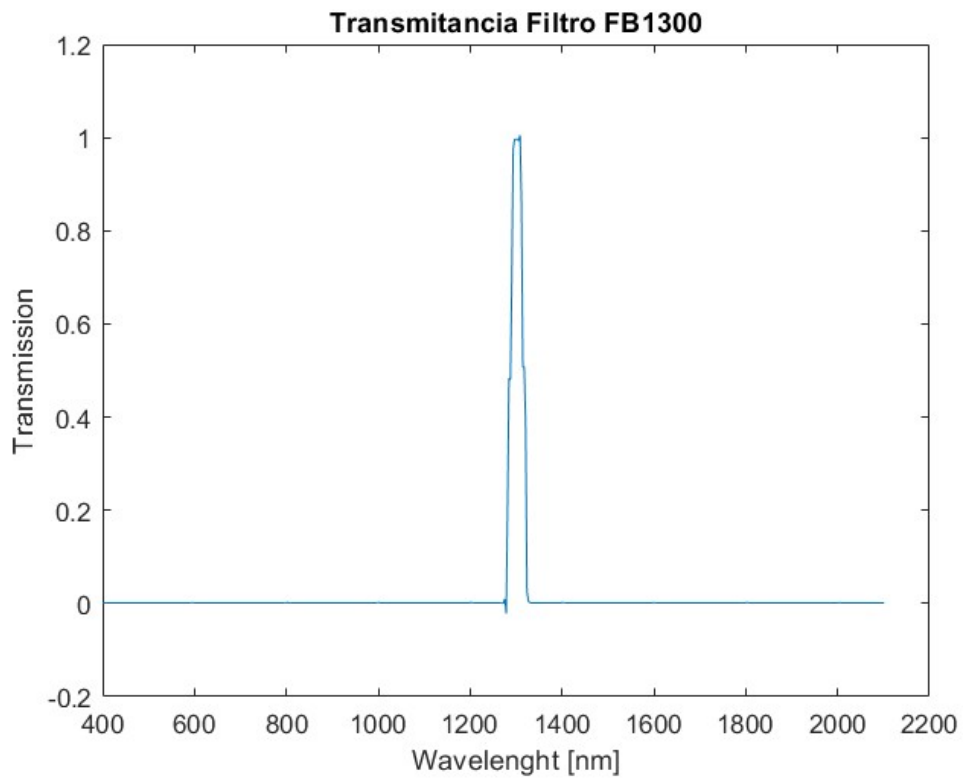


Figura 3.24: Transmitancia Filtro FB1300. Fuente elaboración propia.

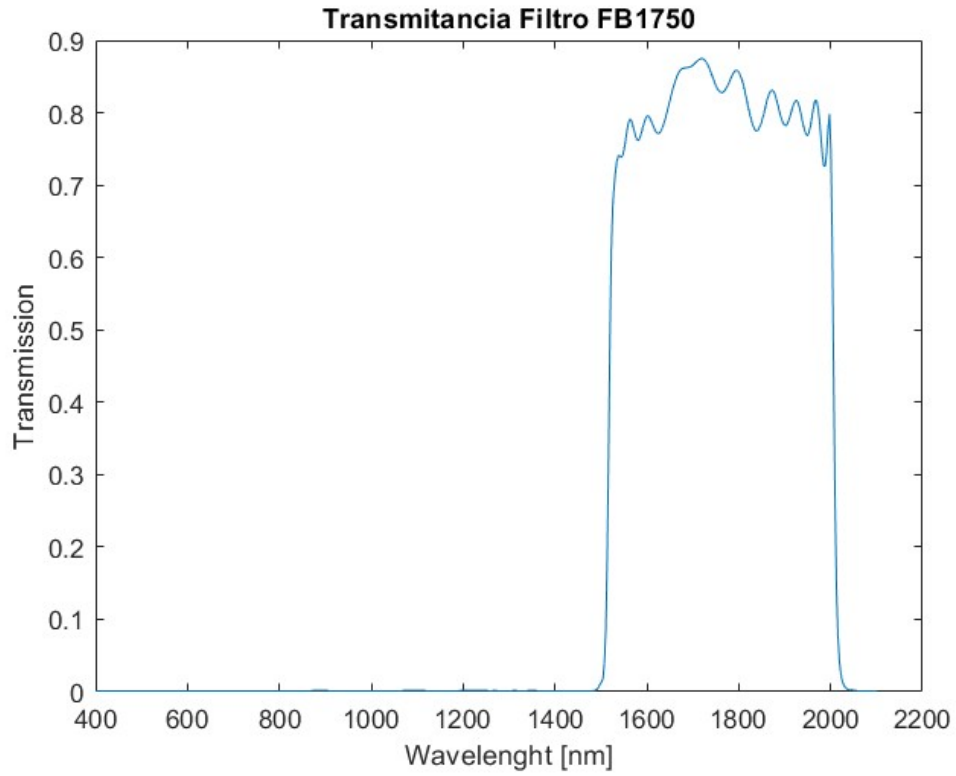


Figura 3.25: Transmitancia Filtro FB1750. Fuente elaboración propia.

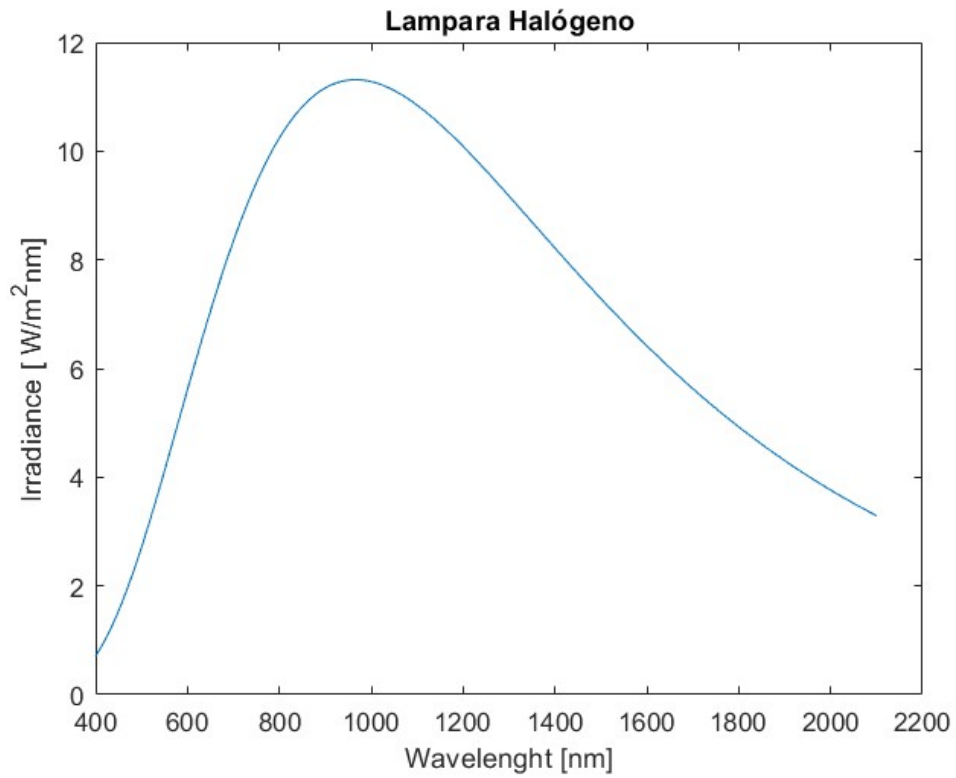


Figura 3.26: Irradiancia Lampara Halógeno. Fuente elaboración propia.

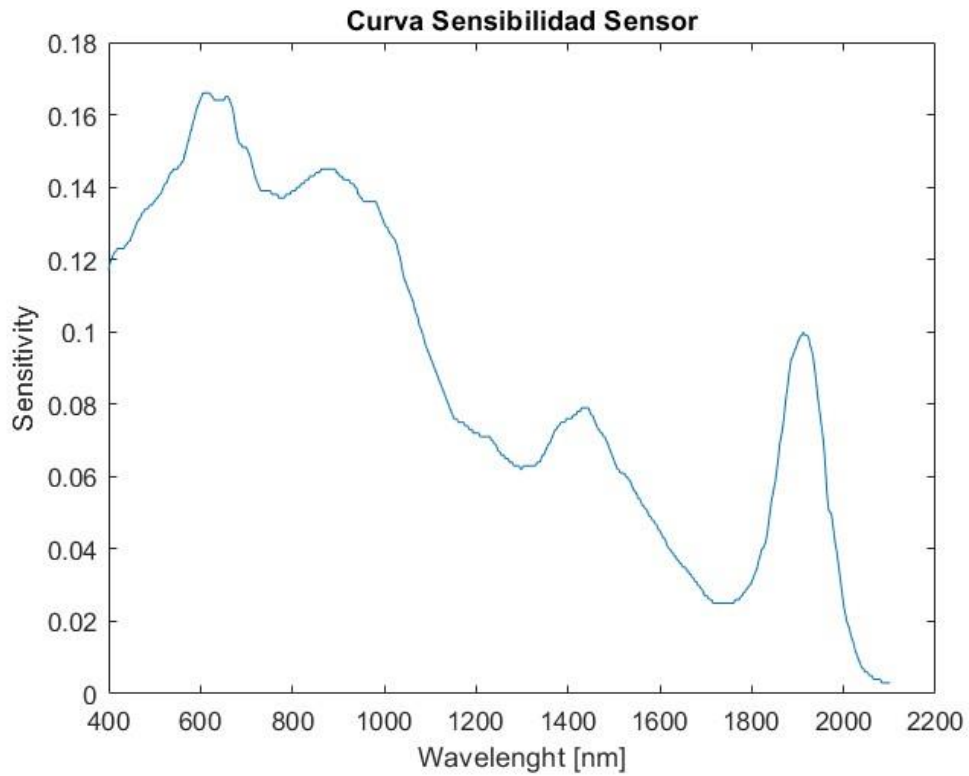


Figura 3.27: Curva Sensibilidad Sensor Cámara Acuros 1920 GigE. Fuente elaboración propia.

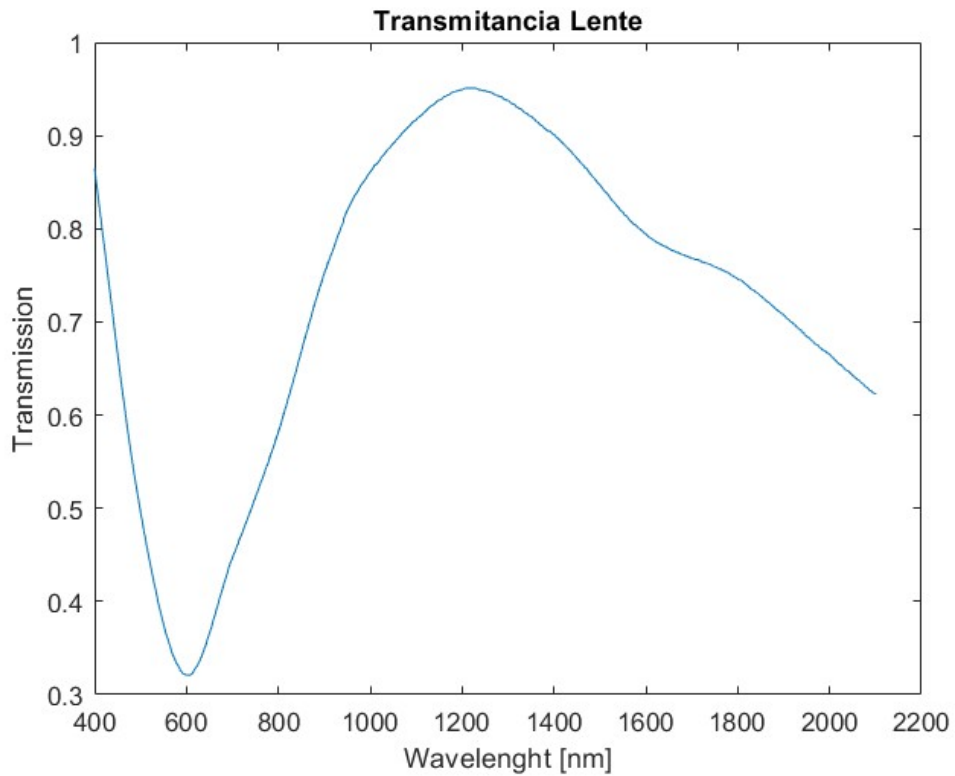


Figura 3.28: Transmitancia Lente 25mm. Fuente elaboración propia.

Luego, se multiplican estas respuestas espectrales para encontrar la respuesta espectral total de cada canal.

Debido a nuestro rango espectral de interés y los elementos disponibles, nuestro sistema se acotará en el rango 1000[nm] a 2000[nm].

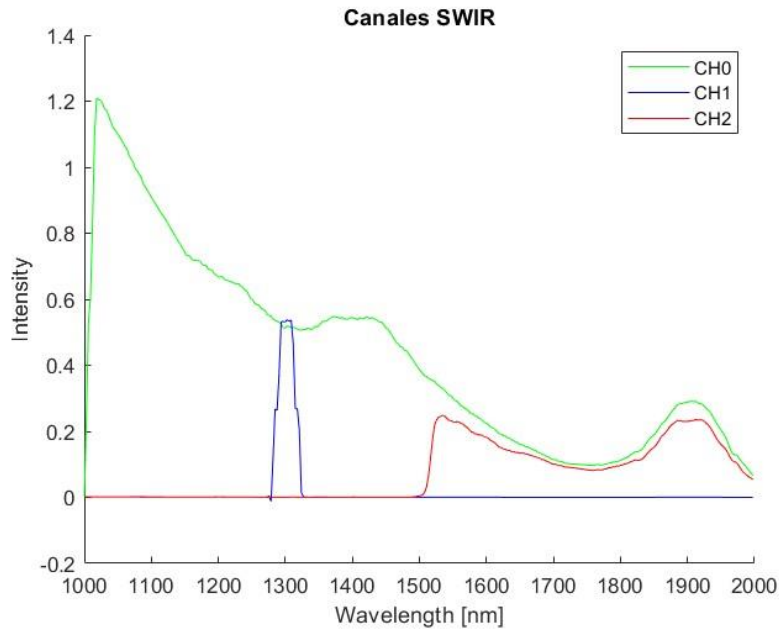


Figura 3.29: Canales en espectro SWIR. Fuente elaboración propia.

Con estos canales se puede realizar análogamente al Espacio CIE XYZ como se hace en el espectro visible, un Diagrama de Cromaticidad donde se puede representar los colores que se pueden obtener en este espectro.

Primero, se debe calcular las coordenadas de cromaticidad, las cuales están dadas por:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (17)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (18)$$

Análogamente, para el SWIR sería:

$$ch0 = \frac{CH0}{CH0 + CH1 + CH2} \quad (39)$$

$$ch1 = \frac{CH1}{CH0 + CH1 + CH2} \quad (20)$$

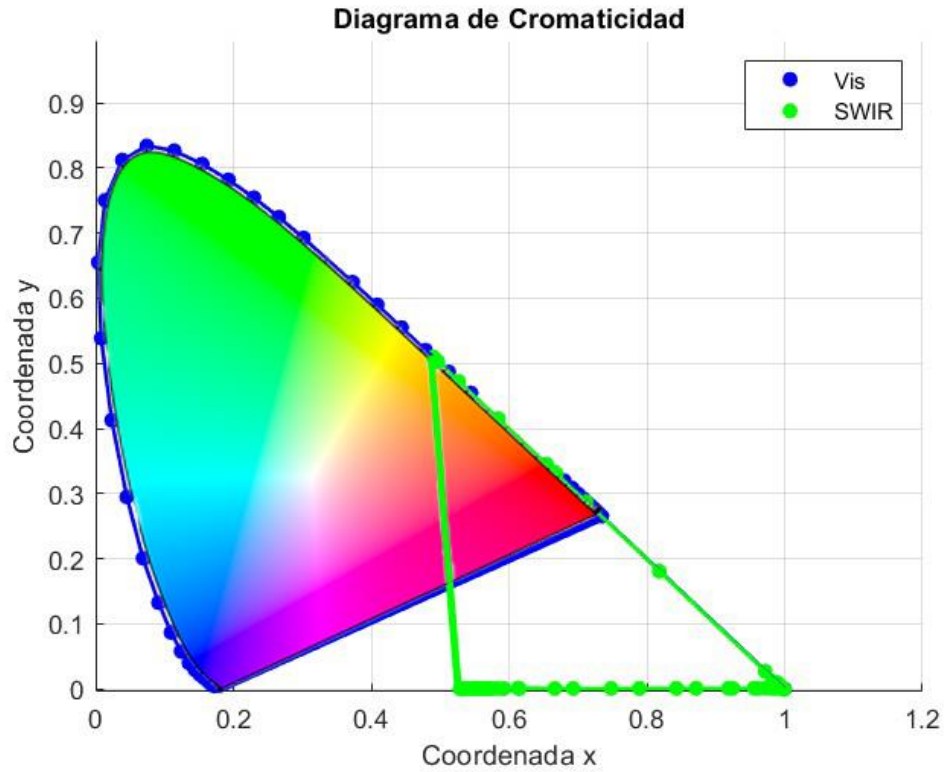


Figura 3.30: Comparación Diagrama de Cromaticidad en Espectro Visible y Espectro SWIR. Fuente elaboración propia.

En la Figura 3.30, se puede apreciar una comparación del Diagrama de Cromaticidad obtenido en el SWIR comparado con el del Visible, donde la línea verde indica el que corresponde al SWIR, vemos que es un espacio de mucho menor tamaño y diferente al que tenemos en el visible.

4. Conclusiones

4.1. Conclusión

En esta investigación se ha abordado el desafío de desarrollar un modelo de colorimetría para imágenes en el rango del infrarrojo de onda corta (SWIR), un área poco explorada, pero con un gran potencial en diversas aplicaciones científicas y tecnológicas. Se partió del estudio de los fundamentos teóricos de la colorimetría y del espectro SWIR, así como del análisis de los componentes ópticos necesarios para la captura y procesamiento de imágenes en este espectro.

Las imágenes obtenidas en el SWIR son monocromáticas, lo que representa una limitación en su interpretación y análisis. Sin embargo, mediante el estudio de la ciencia de la colorimetría se propuso un enfoque innovador para la reconstrucción de imágenes a color a partir de capturas SWIR. Este enfoque se basa en el uso de filtros selectivos de diferentes longitudes de onda para capturar información espectral específica y asignarla a cada canal de forma análoga a lo que se hace en el espectro visible para construir imágenes a color, lo que permite obtener imágenes en el SWIR, con las características y beneficios que nos entrega este espectro, pero con información de color.

En los resultados tenemos que una de las características más notorias, es la absorción de agua, por ejemplo, en la botella de cloro si se compara con cómo se ve en el visible, se puede ver claramente el líquido que existe dentro de ella, en cambio en el espectro visible no se ve nada del líquido que contiene.

En las frutas, madera y flores también destaca la absorción de agua, podemos ver que se destaca más cuando se utiliza el filtro de 1300[nm], debido a que en espectros cercanos a 1400[nm] se encuentran fuerzas de absorción de agua muy fuertes, además en estos también se puede observar la presencia de manchas o pequeños daños que en el visible no se pueden ver, esto es ampliamente utilizado en agricultura, pero hasta el momento sólo con imágenes monocromáticas.

El desarrollo de este modelo de colorimetría en el SWIR representa un avance significativo en el campo de la captura de imágenes en este espectro, y abre nuevas posibilidades en áreas como la identificación de materiales, la vigilancia y la seguridad. Sin embargo, se reconoce que existen aspectos que requieren mayor investigación y desarrollo, como la optimización de los filtros utilizados y la exploración de técnicas de procesamiento de imágenes más avanzadas para mejorar la precisión y la fidelidad de los colores obtenidos.

4.2. Trabajo a futuro

- Se debe mejorar la selección y calibración de los filtros utilizados para la captura de imágenes, lo que garantizará datos espectrales precisos.
- Investigar más a fondo la relación entre las longitudes de onda capturadas y los colores resultantes, así como explorar técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes para mejorar la calidad y la precisión de las imágenes a color generadas.
- Desarrollar un diagrama de cromaticidad más completo y detallado para reflejar con mayor precisión las características espectrales de las imágenes en el SWIR, lo que facilitará su interpretación y aplicación en diversas áreas.

Referencias

- [1] E. Hecht, Optics. Addison-Wesley, 2002.
- [2] P. A. Tipler y G. Mosca, Physics for Scientists and Engineers: With Modern Physics (Vol. 3). W. H. Freeman, 2017.
- [3] S. V. Lights, "A Short Introduction to Shortwave Infrared (SWIR) imaging," Technology White Paper. 2019.
- [4] T. Tobita, "Short-Wavelength Infrared Imaging: Theory, Techniques, and Applications," Springer, 2006.
- [5] B. E. A. Saleh, "Fundamentals of photonics," Wiley, 1991.
- [6] M. P. Hansen, "Overview of SWIR detectors, cameras, and applications," in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, vol. 6940, p. 694002-1-694002-12, 2008.
- [7] S. Shevell, "The Science of Color," Oxford University Press, 2003.
- [8] D. Malacara, Color Vision and Colorimetry: Theory and Application. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [9] Z. Guo, Q. Guo, H. Gao et al., "Coloring the Short-Wave Infrared: A Study on False Color Mapping for SWIR Images," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 28, no. 9, pp. 4500-4512, 2019.
- [10] Liu, Y. Fu, P. Zhou, Y. Zhuan, K. Zhong and B. Guan, "A real-time 3D shape measurement with color texture using a monochromatic camera," in Optics Communications, vol. 474, p. 126088, 2020.
- [11] M. Gerken, H. Schlemmer, C. Siemens, "Colorimetry and multispectral imaging in the shortwave infrared," Proc. SPIE 10624, Infrared Technology and Applications XLIV, May 2018.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA
RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO**

Departamento : Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera : Ingeniería Civil Electrónica
Nombre del memorista : Matías Ignacio Puentes Espinoza
Título de la memoria : Desarrollo de modelo de colorimetría en el SWIR.
Fecha de la presentación oral : 12/04/2024

Profesor(es) guía : Luis Emiliano Arias Parada
Profesor(es) revisor(es) : Daniel Sbárbaro Hofer, Sergio Torres Inostroza.
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

En el contexto del avance del desarrollo de imágenes en el espectro infrarrojo y la ciencia de la colorimetría, se identificó la oportunidad de aprovechar las propiedades del SWIR, a través de la colorimetría.

En el presente informe para Memoria de Título “Desarrollo de modelo de colorimetría en el SWIR” se estudiaría a fondo la colorimetría, donde se buscará obtener un modelo para conseguir color en el SWIR, aprovechando de esta manera las características de este espectro, tales como visión en condiciones de neblina, visión del contenido de recipientes de algunos materiales, análisis del estado de agricultura, entre otros.

Para abordar esta investigación, primero se estudiará de forma exhaustiva cada concepto de colorimetría, donde luego se montará un set-up óptico para obtener imágenes en el espectro estudiado. Con esto se realizarán diferentes experimentos, analizando y procesando estas imágenes.

Como resultado, se logró desarrollar un modelo de colorimetría en el SWIR, lo que permitió reconstruir, a partir de imágenes monocromáticas en el SWIR, imágenes a color mediante Síntesis Aditiva de Color, obteniendo así propiedades destacadas de Colorimetría e Infrarrojo. Las imágenes obtenidas correspondieron a elementos cuya reflectancia en el SWIR difiere del rango VIS, cuyo color se obtuvo del diagrama de cromaticidad calculado para el sistema óptico diseñado. Lo expuesto en este trabajo y sus resultados muestran un avance metodológico en la evolución de la obtención de imágenes a color, a partir de imágenes en el infrarrojo.