

UNIVERSIDAD EAFIT

TÉSIS DE MAESTRÍA

**Design and Development of a
Multispectral Imagery System for
Land Cover and Land Use
Monitoring in Colombia**

Author:

Sebastian CARMONA
ESTRADA

Supervisor:

PhD. Olga Lucia
QUINTERO MONTOYA

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Maestría en Ciencias*

in the

HuMath
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

April 28, 2025

Declaration of Authorship

I, Sebastian CARMONA ESTRADA, declare that this thesis titled, "Design and Development of a Multispectral Imagery System for Land Cover and Land Use Monitoring in Colombia" and the work presented in it are my own. I confirm that:

- This work was done wholly or mainly while in candidature for a research degree at this University.
- Where any part of this thesis has previously been submitted for a degree or any other qualification at this University or any other institution, this has been clearly stated.
- Where I have consulted the published work of others, this is always clearly attributed.
- Where I have quoted from the work of others, the source is always given. With the exception of such quotations, this thesis is entirely my own work.
- I have acknowledged all main sources of help.
- Where the thesis is based on work done by myself jointly with others, I have made clear exactly what was done by others and what I have contributed myself.

Signed:

Date:

"Thanks to my solid academic training, today I can write hundreds of words on virtually any topic without possessing a shred of information, which is how I got a good job in journalism."

Dave Barry

UNIVERSIDAD EAFIT

Abstract

Maestría en Física Aplicada
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Maestría en Ciencias

**Design and Development of a Multispectral Imagery System for Land
Cover and Land Use Monitoring in Colombia**

by Sebastian CARMONA ESTRADA

The Thesis Abstract is written here (and usually kept to just this page). The page is kept centered vertically so can expand into the blank space above the title too...

Acknowledgements

The acknowledgments and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor...

Contents

Declaration of Authorship	iii
Abstract	vii
Acknowledgements	ix
1 Diseño de los sistemas ópticos	1
1.1 Diseño del sistema multiespectral <i>KBee</i>	1
1.1.1 Requerimientos y criterios ópticos	1
1.1.2 Proceso iterativo de diseño	2
1.1.3 Pre-selección de sensores de imagen	4
1.1.4 Estimación teórica de resolución y campo de visión	6
1.1.5 Conclusiones del proceso de diseño	9
1.1.6 Sistemas ópticos candidatos	9
2 Procura y construccion de los sisteams k bee y q bee de humaths space systems	13
2.1 Sistema optico seleccionado para cosntruccion	13
2.2 Sistema de adquisicion y control de datos	14
2.2.1 Estructura general del script	14
2.2.2 Inicialización y adquisición	16
2.2.3 Procesamiento, visualización y almacenamiento	16
2.2.4 Ejecución automática como servicio de sistema	16
2.2.5 Robustez y tolerancia a fallos	17
2.2.6 Dependencias y entorno de ejecución	17
2.2.7 Control remoto del dispositivo QBee	17
2.3 Construcción e integración del prototipo	19
2.3.1 Modelo CAD y ensamblaje mecánico	19
2.4 Pruebas de operación	19
2.4.1 Escenarios de prueba	19
Pruebas terrestres	20
Pruebas en superficie en condiciones extremas	21
Pruebas en vuelo	23
2.5 Conclusiones y lecciones aprendidas	24
3 Characterization and main contributions	25
3.1 Geometric Characterization	25
Determination of Field of View (FOV) and Angular Field of View (AFOV)	25
3.1.1 Modulation Transfer Function (MTF) Characterization	28

	Ground–Resolved Distance (GRD) Derived from the MTF	32
3.1.2	Acquisition Settings for VIS and NIR Systems	34
3.2	Spectral Characterization of Multispectral Cameras	35
3.2.1	Experimental Procedure in the Laboratory	35
	Selection and Validation of the Illumination Source	35
	Setup and Collimation of the Illumination Beam	36
	Dark Current Correction in the Minispectrometer	37
	Set of Filters and Acrylic Sheets	38
	Measurement of Transmission Spectra	38
	Generación y selección de combinaciones de filtros	40
	Generation and Selection of Filter Combinations	40
	Determination of Central Wavelength, Bandwidth, and Optical Power of Selected Combinations	44
	Image Capture with the Optical System Under Test	45
3.3	Main contributions	46
3.3.1	Resultados de la caracterización del campo de visión (FOV)	46
3.3.2	Caracterización angular: AFOV vs. WD	49
3.3.3	Magnificación primaria (PMAG) de los sistemas 6 (NIR) y 7 (VIS)	51
3.3.4	Modulation Transfer Function (MTF) Measurements	51
	MTF Curves for VIS and NIR Systems	52
	Cut-off Frequency and Ground Resolution Calculation	54
	Comparison with Theoretical Resolution	54
	Error Sources and Discrepancy Analysis	55
	Summary of MTF Findings	55
3.3.5	Respuesta espectral	55
	Curvas de sensibilidad	55
	Linealidad y repetibilidad	55
3.4	Síntesis y comparación con los requisitos	55
3.5	Lecciones aprendidas y trabajo futuro	55
.1	Parámetros geométricos, espectrales y radiativos de sistemas formadores de imagen	56
.1.1	Spectral Response of RGB Color Cameras	56
	Linear Response Model	56
	Response Model with Static Nonlinearity	56
	Spectral Sensitivity Characterization	57
.1.2	Luminance in Optical Systems	58
.1.3	Contrast in an Optical System	58
	Mathematical Definition of Contrast	58
	Relation with the Modulation Transfer Function (MTF)	58
.1.4	Image Formation in Optical Systems	60
.1.5	Spatial Frequency Response of Optical Systems	61
	Impulse Response and the Point Spread Function (PSF)	61
	Line Spread Function (LSF)	61
	Edge Spread Function (ESF)	62
	Modulation Transfer Function (MTF)	62

	Additional Considerations on the OTF and System Linearity	62
	Phase Transfer Function (PTF)	64
	Relationship Between the Response Functions	64
.1.6	Relationship Between MTF and the Resolution of Optical Systems	65
.1.7	Image Quality Factors	66
	Bibliography	69

List of Figures

2.1	Componentes destacados de los sistemas ópticos seleccionados para el prototipo: NIR (izquierda) y VIS (derecha).	14
2.2	Flujo lógico del script de adquisición y visualización de la QBee. Se integran múltiples cámaras, adquisición en paralelo y procesamiento en tiempo real.	15
2.3	Vista explosionada del ensamblaje completo del QBee, mostrando la carcasa impresa en PET-G y la disposición de los sistemas 6 (NIR, 8 mm f/2.5) y 7 (VIS, 8.5 mm f/1.8). Este diseño y construcción fue concebido con el apoyo del equipo de manufactura del proyecto C3.	20
2.4	Captura de imagen realizada durante prueba terrestre mediante control remoto desde un teléfono inteligente. La imagen muestra la composición de ambos canales VIS y NIR, confirmando la funcionalidad del sistema <i>QBee</i> en condiciones operativas reales.	21
2.5	Visualización del sistema de coordenadas geográficas (GPS) en tiempo real sobre la imagen capturada. Se muestran latitud, longitud, altitud, velocidad y rumbo, extraídos automáticamente del módulo GPS durante las pruebas.	22
2.6	Captura de video realizada exitosamente durante la expedición científica en la Antártida. La imagen confirma que, a pesar de las condiciones extremas, el sistema <i>QBee</i> En la imagen se aprecia que la cámara visible no se encuentra correctamente enfocada, lo que puede deberse a un mal ajuste de la distancia entre el objetivo y el sensor. Sin embargo, este tipo de desajuste es corregible mediante ajuste mecánico y no afecta el funcionamiento general del sistema <i>QBee</i> . fue capaz de operar y registrar datos multiespectrales de forma puntual.	23
2.7	Captura tomada durante el vuelo de prueba en la aeronave Cessna 208 Caravan. Se observó un comportamiento estable del sistema y transmisión remota exitosa mediante protocolo VNC.	24
2.8	Captura de video realizada durante prueba a bordo del avión de combate T-27 Tucano. A pesar de las maniobras con aceleraciones de hasta 4g, el sistema <i>QBee</i> logró registrar imágenes de forma autónoma y estable. Las condiciones de iluminación ambiental no eran las más adecuadas debido a la hora del día (proximadamente las 6 pm).	24

3.1	Optical setup developed. In this case, the use of barriers to prevent capture of unwanted light directly from the illumination source was not necessary, as the source is located behind the optical system under test. The illumination source is a tungsten halogen lamp coupled with a fiber optic cable and a diffuser.	26
3.2	Set of images with their corresponding profile and derivative.	27
3.3	Standard chart used to measure the spatial frequency response of the optical system, as established in the ISO 12233 standard.	28
3.4	Optical setup recommended by ISO 12233:2024 for accurate MTF measurement. (1) matte black background, (2) test chart, (3) white illumination, (4) optical system under test, (5) barriers to prevent direct illumination of the optical system, (6) adjustable working distance.	29
3.5	Signal distribution delivered by the optical system under the configured experimental illumination. Two main peaks are observed: one in the dark zone and another in the bright zone, with attenuated secondary peaks.	30
3.6	Standard chart used to measure the spatial frequency response of the optical system. The arrows used for framing and camera alignment are highlighted.	31
3.7	Configuration screen of the SE_MTF plugin in ImageJ. Setup for a Region of Interest of 104×104 pixels and a pixel size of $2.2 \mu\text{m}$	32
3.8	Example of the measured spectrum of the tungsten lamp (OSL-2) using the minispectrometer. The vertical axis is expressed in counts, which depend on the intrinsic response of the spectrometer.	36
3.9	Setup for collimating the beam of the tungsten lamp with fiber optics. The adjustment of the distance between the fiber and the plano-convex lens aims to maximize the optical power measured by the detector.	37
3.10	Acrylic sheets and filters used in the experiment.	39
3.11	Setup for measuring the transmission spectrum of filters and acrylic sheets.	39
3.12	Measured spectra (in counts) of tungsten light transmitted through various filters (A) and acrylic plates (B). The vertical axis shows the relative intensity recorded by the minispectrometer in counts.	40
3.13	Normalized dimensionless spectral response (transmittance) obtained by dividing each filtered spectrum by the tungsten lamp spectrum.	40
3.14	Ideal transmission curves for selecting filter combinations. This example shows 10 Gaussians centered at 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 825, 850, and 875 nm, respectively.	41
3.15	Filter combinations (solid lines) with the highest correlation to their corresponding ideal curves (dashed lines). The shape and peak position of the selected combinations match the target profiles.	43

3.16	Final filter selection used for spectral characterization of the optical systems. Includes both experimentally selected configurations and individual filters (532 and 633 nm) showing good correlation and transmittance.	43
3.17	Example of a normalized spectrum of a selected filter. The central wavelength and bandwidth (FWHM) are indicated, defined as the spectral range where the signal reaches 50% of its maximum value.	45
3.18	Imágenes originales para la medición del FOV horizontal (H) y vertical (V) en tres distancias de trabajo.	47
3.19	Ajuste lineal ponderado de FOV vs. WD para los cuatro casos: VIS-H, VIS-V, NIR-H y NIR-V.	48
3.20	AFOV experimental vs. WD (flecha punteada: valor teórico). .	50
3.21	Histograma de la carta de prueba ISO 12233 impresa en papel mate. Se aprecian tres picos en la región oscura y dos picos muy anchos en la región clara, reflejo de una alta desviación estándar y de un contraste inferior al requerido por la norma.	52
3.22	Distribución de valores de intensidad en imágenes corregidas (corriente oscura y ruido aleatorio) para los sistemas VIS y NIR, empleadas en la extracción de la MTF.	53
3.23	Curvas MTF obtenidas con <i>ImageJ</i> . La configuración del <i>plugin</i> se muestra en la Fig. 3.7. Esta medida fue tomada con una distancia de trabajo de 925 mm.	53

List of Tables

1.1	Especificaciones de misión y criterios de diseño del <i>KBee</i>	2
1.2	Comparativa de los objetivos candidatos frente a los criterios de diseño. Entre paréntesis se indica el fabricante (EO = Edmund Optics). El AFOV se expresa en grados y corresponde al semidiámetro angular calculado sobre el sensor empleado.	3
1.3	Sensores propuestos, su asignación a los sistemas ópticos y parámetros clave.	5
1.4	Field-of-view (FOV), magnification and ground resolution (Δ_{pix} , Δ_{MTF}) for each system at three altitudes. Los cálculos de campo de visión FOV fueron obtenidos a partir de las dimensiones verticales del sensor.	7
3.1	Ground-resolved distance (GRD) derived from the 30 %-contrast MTF cut-off. Placeholder numbers are shown; replace them with the values measured for each optical system.	33
3.2	Acquisition Configuration for MTF and FOV Experiments (VIS and NIR)	34
3.3	WD y FOV medidas para cada sistema óptico y orientación	47
3.4	Comparativa empírico vs. teórico para FOV horizontal (H) y vertical (V).	48
3.5	AFOV experimental para WD de 0.07–0.09 m, 0.30–0.38 m y 0.65–0.70 m.	51
3.6	Magnificación primaria (PMAG) de los sistemas VIS (Sis. 7) y NIR (Sis. 6) a distintas alturas.	51
3.7	Frecuencia de corte a 30 % de contraste: mediciones frente a especificación.	54
3.8	Resolución en tierra Δ_{ground} – Sistema VIS (Sis. 7)	54
3.9	Resolución en tierra Δ_{ground} – Sistema NIR (Sis. 6)	54
10	Image Quality Factors and graphs used for their measurement, based on <i>Imatest</i> image quality evaluation standards and ISO 12233. Adapted from Imatest Team 2025.	67

List of Abbreviations

LAH List Abbreviations Here
WSF What (it) Stands For

Physical Constants

Speed of Light $c_0 = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ (exact)

List of Symbols

a	distance	m
P	power	$\text{W} (\text{J s}^{-1})$
ω	angular frequency	rad

For/Dedicated to/To my...

Chapter 1

Diseño de los sistemas ópticos

En este capítulo se describe el proceso que se lleva a cabo para la determinación de los componentes ópticos necesarios para cumplir los requerimientos ópticos de la misión C3. En un primer momento se describen los criterios a tener en cuenta para el diseño de la QBee, en los cuales se describen los parámetros mecánicos, ópticos y energéticos que debe cumplir el dispositivo QBee para operar en las condiciones estimadas. Luego, se describe el proceso iterativo de diseño óptico, en el cual se describen los candidatos de objetivos y sensores ópticos tenidos en cuenta. De estos elementos, se obtienen características de resolución y campo de visión teóricos a partir con el fin de tener un criterio de selección y escoger una configuración óptima entre los candidatos.

1.1 Diseño del sistema multiespectral *KBee*

La ruta de desarrollo del *QBee* y *KBee* partió de una matriz de ocho “sistemas candidatos”; de ellos se seleccionaron las dos configuraciones VIS + NIR que mejor satisfacen las restricciones de misión impuestas por el consorcio EAFIT-KTH: altura de operación 50–5 000 m, peso ≤ 2 kg, envolvente geométrica $100 \times 100 \times 150$ mm³ y conectividad USB 3.1. A continuación se describe el hilo de razonamiento que condujo al diseño final.

1.1.1 Requerimientos y criterios ópticos

Los criterios que guiaron la selección de cada sub-módulo fueron:

- **Resolución espacial** - El objetivo debe ofrecer una MTF (30 % de contraste) ≥ 40 lp/mm, lo que garantiza la capacidad de resolver los objetos de las dimensiones indicadas en la Tabla 1.1.
- **Campo de visión** - El ángulo AFOV debe cubrir una extensión de suelo suficiente para realizar análisis extensivos de parcelas, bosques, cultivos, ríos, carreteras, zonas urbanas, entre otras estructuras terrestres de interés. Por lo anterior, es ideal que el sistema tenga un campo de visión que vaya desde algunas decenas de metros hasta los kilómetros, dependiendo de la altura de trabajo.

- **Masa y volumen** - El conjunto óptico-electrónico debe cumplir las restricciones de carga útil de la aeronave del Proyecto C3, de modo que se mantenga un tiempo de vuelo de 3 h. En la práctica esto implica una masa total ≤ 2 kg y un volumen aproximado de $100 \times 100 \times 150$ mm³.
- **Coste** – Aunque el presupuesto final depende de los fondos del proyecto, para este trabajo se fija un *límite máximo* de \$1500 USD. Con un presupuesto mayor podrían integrarse componentes de mayor rendimiento.

TABLE 1.1: Especificaciones de misión y criterios de diseño del *KBee*.

Parámetro	Requisito
Masa total del caga- mento	≤ 2 kg
Dimensiones	$100 \times 100 \times 150$ mm ³
Tiempo máximo de misión	≤ 3 h
MTF (30 % de con- traste)	≥ 40 lp/mm
Resolución en tierra @50 m	≤ 7.35 cm
Resolución en tierra @1000 m	≤ 1.47 m
Resolución en tierra @5000 m	≤ 7.35 m

1.1.2 Proceso iterativo de diseño

La Tabla 1.2 resume los ocho objetivos evaluados de forma preliminar. Cada sistema se identifica por un número consecutivo y se caracteriza mediante distancia focal, relación de apertura, MTF al 30, % de contraste y masa total del objetivo.

Los datos de la MTF de los objetivos fue recuperada de la hoja de datos de cada objetivo. La resolución exigida ($MTF \geq 40$ lp mm⁻¹) se cumple de forma holgada en los sistemas 1, 2, 4, 6, 7 y 8. El sistema 2, con 50 mm f/2.8, ofrece la mayor frecuencia de corte (180 lp mm⁻¹), lo que se traduce en la más alta resolución sobre el terreno; sin embargo, su AFOV es el más estrecho del conjunto, limitando el área cubierta por captura. En el extremo opuesto, el objetivo de 4 mm (sistema 5) maximiza el AFOV —casi 110°— pero carece de datos MTF publicados y podría no satisfacer la resolución mínima. Las configuraciones de 8 mm f/2.5 (sistema 6) y 8.5 mm f/1.8 (sistema 7) constituyen un compromiso atractivo: mantienen AFOV moderado ($\approx 30^\circ$), cumplen la MTF requerida con una masa inferior a 60 g, adecuada para misiones de baja y media altitud.

TABLE 1.2: Comparativa de los objetivos candidatos frente a los criterios de diseño. Entre paréntesis se indica el fabricante (EO = Edmund Optics). El AFOV se expresa en grados y corresponde al semidiámetro angular calculado sobre el sensor empleado.

System	Objetive	Focal [mm]	AFOV [°]	Aperture	MTF (30 %) [lp/mm]	Weight [g]
1	16 mm f/16 — HPr Series (EO)	16	42.2	f/16	62	138
2	50 mm f/2.8 — HPr Series (EO)	50	10.1	f/2.8	180	—
3	25 mm f/1.8 — HPr Series (EO)	25	27.8	f/1.8	40	78
4	16 mm f/1.8 — HPr Series (EO)	16	42.2	f/1.8	128	138
5	4 mm f/1.8 — Basler C125-0418-5M-P (Basler)	4	109	f/1.8	—	—
6	8 mm f/2.5 — HEO Series (NIR, M12) (EO)	8	29.9	f/2.5	120	4
7	8.5 mm f/1.3 — Cr Series (EO)	8.5	28.2	f/1.8	85	60
8	12.5 mm f/2.5 — Rugged Blue (M12) (EO)	12.5	19.4	f/2.5	150	5

En sistemas aéreos que operan a distancias de decenas o miles de metros, el plano de enfoque se aproxima al infinito; el sistema trabaja, por tanto, en

régimen de hiperfoco y la profundidad de campo deja de ser un factor limitante. No obstante, la apertura ($f/ \#$) sigue siendo relevante porque regula la cantidad de luz incidente y la eficiencia con la que se reproducen las altas frecuencias espaciales. Por lo anterior, es preferible tener objetivos con gran apertura. Sin embargo, mayor apertura implica un diámetro de lente mayor, por lo que el peso y costo de los objetivos aumenta.

El límite de carga útil de la plataforma C3 es 2 kg para lograr un tiempo de vuelo de 3 h. Aunque todos los objetivos de la Tabla 1.2 se encuentran muy por debajo de ese umbral, los sistemas 6, 7 y 8 destacan por su masa extraordinariamente baja (entre 4 g y 60 g), lo que los convierte en las opciones más atractivas cuando el peso es el factor decisivo. En la etapa de prototipado se dará prioridad a estas configuraciones ligeras, siempre que satisfagan además el requisito mínimo de resolución.

Los sistemas 6 (NIR 8 mm f/2.5) y 7 (VIS 8.5 mm f/1.8) aparecen como las mejores combinaciones de AFOV, MTF y peso para vuelos de 50-1000 m, mientras que el sistema 2 (50 mm f/2.8) se reserva para misiones de gran altitud donde se privilegia la resolución sobre la cobertura espacial.

Sin embargo, para poder escoger una configuración adecuada, en una sección más adelante, se muestran los cálculos de resolución en tierra teóricos para cada sistema, con el fin de esoger rigurosamente que configuración utilizar.

1.1.3 Pre-selección de sensores de imagen

Para cada objetivo óptico se evaluaron posibles candidatos de sensores ópticos a los cuales acoplar dichos objetivos. En la Tabla 1.3 se recogen únicamente los parámetros que afectan de forma directa al diseño de la carga y al cálculo de resolución: peso, profundidad de bits, tipo de obturación (*rolling/global*), tamaño del sensor, tamaño de píxel y consumo energético típico.

Todos los sensores considerados pesan menos de 100 g y consumen por debajo de 4 W. En particular, los basados en los CCD ON Semi AR0521 / AR0522 presentan el consumo más bajo (≈ 2.2 W), lo que resulta clave para maximizar la autonomía de vuelo de la plataforma C3. Este bajo consumo es consecuencia de la tecnología de captura de imágenes del sensor; para los sensores de los sistemas 6, 7 y 8, su tecnología de captura es del tipo ROLLING, lo cual requiere menos consumo energía, a diferencia de la tecnología de obturación Global, el cual consume más energía, pero disminuye distorsiones en las imágenes capturadas, ya que esta se genera de forma global para todos los pixeles, mientras que la tecnología ROLLING realiza un barrido secuencial para capturar una imagen.

TABLE 1.3: Sensores propuestos, su asignación a los sistemas ópticos y parámetros clave.

System	Sensor	H × V [px]	Pixel [μm]	Shutter	ADC / Bits	Weight [g]	Power [W]
1, 3, 4	Alvium 1800 U-2040 (Sony IMX541)	4512 × 4512	2.74	Global	12 bit	65	3.9
2	Alvium 1800 U-2050 (Sony IMX183)	5496 × 3672	2.40	Rolling	10 bit	65	3.2
5	Basler acA1920-40gc (Sony IMX249)	1920 × 1200	5.86	Global	12 bit	90	3.9
6	Alvium 1800 U-501m NIR (ON Semi AR0522)	2592 × 1944	2.20	Rolling	10 bit	65	2.2
7, 8	Alvium 1800 U-500c (ON Semi AR0521)	2592 × 1944	2.20	Rolling	10 bit	60	2.2

Desde un punto de vista de la sensibilidad de los sensores, existen varias diferencias entre sí. Los sensores Sony IMX541 e IMX249 ofrecen hasta 12 bits y disponen de obturación global. Por otro lado, los módulos AR0521 / AR0522 con obturación *rolling* son considerablemente más económicos, ayudando a mantener los costos reducidos; sin embargo, en maniobras o al capturar objetos en movimiento pueden aparecer artefactos por el desplazamiento relativo durante la lectura línea a línea.

El tamaño de píxel condiciona directamente la resolución espacial y la relación entre señal y ruido (SNR) Chen et al. 2000. Los sensores con celdas de 2.2–2.74 μm (IMX541, IMX183, AR05xx) se adaptan a los objetivos de alta resolución (sistemas 1–4, 6–8); el IMX249, con 5.86 μm , es idóneo para configuraciones

de campo muy amplio (sistema 5), donde prima la sensibilidad sobre la densidad de píxel, permitiendo obtener imágenes menos ruidosas o con un SNR mayor.

1.1.4 Estimación teórica de resolución y campo de visión

El campo de visión angular (AFOV) representa el ángulo máximo observable del sistema óptico y se determina mediante la expresión que relaciona directamente el tamaño horizontal del sensor (eje principal, pero puede ser tambien vertical) y la distancia focal f de la lente utilizada:

$$\text{AFOV} = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{2f} \right) \quad (1.1)$$

A partir del AFOV obtenido, es posible determinar el campo de visión lineal (FOV) a una distancia específica de trabajo (WD). Este valor describe la anchura del área observada sobre el terreno a partir del ángulo de visión calculado previamente y la altura o distancia del sistema respecto al objeto:

$$\text{FOV} = 2 \times \text{WD} \times \tan \left(\frac{\text{AFOV}}{2} \right) \quad (1.2)$$

Una vez determinado el campo de visión, la resolución en tierra Δ_{ground} se obtiene a partir del modelo matemático que relaciona la frecuencia espacial de corte de la MTF al 30 % con la magnificación del sistema óptico y la geometría del sensor:

$$\text{MTF}(f_{\text{im}}) = 0.30 \quad (1.3)$$

Donde f_{im} corresponde a la frecuencia de corte en el plano imagen.

La frecuencia espacial en el plano objeto f_{obj} se obtiene al multiplicar la frecuencia espacial en el plano imagen f_{im} por la magnificación primaria (PMAG):

$$\text{PMAG} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{FOV}} \quad (1.4)$$

$$f_{\text{obj}} = f_{\text{im}} \times \text{PMAG} \quad \left[\frac{\text{lp}}{\text{mm}} \right] \quad (1.5)$$

Además, la resolución limitada por el sensor (f_{sensor}) en función del tamaño de píxel s es:

$$f_{\text{sensor}} \quad \left[\frac{\text{lp}}{\text{mm}} \right] = \frac{1 \text{ lp}}{2 \times s} \quad (1.6)$$

Esta corresponde a la frecuencia de NYQUIST, la cual corresponde a la frecuencia espacial máxima que puede resolver el sensor.

Finalmente, la distancia lineal mínima resuelta en el terreno Δ_{ground} se calcula como:

$$\Delta_{\text{ground}}[\text{m}] = \frac{1}{2f_{\text{obj}}} \times \frac{1 \text{ m}}{10^3 \text{ mm}} \quad (1.7)$$

Y la distancia mínima lineal resuelta por el sensor:

$$\Delta_{\text{pix}}[\text{m}] = \frac{1}{2f_{\text{sensor}}} \times \frac{1 \text{ m}}{10^3 \text{ mm}} \quad (1.8)$$

Estas ecuaciones permiten evaluar cuantitativamente la capacidad resolutiva del sistema óptico, así como el compromiso entre la resolución obtenible y la cobertura del área capturada por cada configuración óptica analizada.

Para cuantificar el compromiso entre resolución y cobertura se evaluaron ocho configuraciones ópticas (objetivos de la Tabla 1.2) a tres alturas de operación: 50 m (vuelo bajo), 1000 m (vuelo medio) y 5000 m (vuelo alto). En la Tabla 1.4 se presentan, para cada sistema óptico y a tres alturas de vuelo, el campo de visión efectivo sobre el terreno (FOV), la magnificación primaria, la resolución limitada solo por el paso de píxel (Δ_{pix}) y la resolución impuesta por la óptica a MTF 30 % (Δ_{MTF}), obtenida a partir de la MTF de los objetivos reportada por los fabricantes en su respectiva hoja de datos.

TABLE 1.4: Field-of-view (FOV), magnification and ground resolution (Δ_{pix} , Δ_{MTF}) for each system at three altitudes. Los cálculos de campo de visión FOV fueron obtenidos a partir de las dimensiones verticales del sensor.

System	Alt [m]	FOV [m]	Magn.	Δ_{pix} [m]	Δ_{MTF} [m]
1	50	38.63	0.00032	0.00860	0.02500
	1000	772.70	0.000016	0.17100	0.50400
	5000	3863.00	0.0000032	0.85600	2.52000
2	50	8.81	0.00150	0.00160	0.00190
	1000	176.30	0.000075	0.03200	0.03700
	5000	881.30	0.000012	0.16000	0.18600
3	50	24.73	0.0005	0.00548	0.02500
	1000	494.50	0.000025	0.11000	0.50000
	5000	2473.00	0.000005	0.54800	2.50000
4	50	38.63	0.00032	0.00860	0.01200
	1000	772.70	0.000016	0.17100	0.24400
	5000	3863.00	0.0000032	0.85600	1.22100
5	50	140.60	0.00005	0.11700	—
	1000	2812.80	0.0000025	2.34400	—
	5000	14064.00	0.0000005	11.72000	—
6	50	26.73	0.00021	0.01030	0.01900
	1000	534.60	0.00001	0.20600	0.39100
	5000	2673.00	0.0000021	1.03100	1.95300
7	50	25.16	0.00017	0.01290	0.03400
	1000	503.20	0.0000085	0.25900	0.69200
	5000	2516.00	0.0000017	1.29400	3.46000
8	50	17.11	0.00025	0.00880	0.01300
	1000	342.10	0.000012	0.17600	0.26700
	5000	1711.00	0.0000025	0.88000	1.33300

En un primer momento, Δ_{MTF} resulta siempre mayor que Δ_{pix} , lo cual era de esperar: la óptica atenúa las altas frecuencias y limita un poco el detalle que el sensor podría capturar de forma ideal. Este hallazgo confirma que se ha elegido sensores con tamaño de píxel suficiente para no desaprovechar la capacidad de resolución de las lentes, inclusive, se tiene podría tener un sensor con tamaño de pixel mayor, lo cual podría disminuir el costo del sensor y mejorar la relación señal-ruido SNR para mejorar la calidad de las imágenes sin perder detalle de estas. Esto se deja para futuras mejoras del sistema.

En cuanto al equilibrio entre cobertura y nitidez, los sistemas de focal larga concentran cada píxel en un área reducida —mejor nitidez— pero limitan mucho la zona capturada (Por ejemplo, el sistema 2 tiene un FOV de 881 metros a una altura de 5 km y una resolución en tierra de 20 cm). Estos sistemas de gran distancia focal son ideales cuando se requiere alta resolución y no tanta cobertura en su campo de visión, es decir, cuando se requiere visualizar objetos como estructuras urbanas, individuos de fauna y flora, entre otros. En el otro extremo, los de focal muy corta expanden enormemente el FOV a costa de degradar la resolución (por ejemplo, el sistema 5, el cual tiene una distancia focal de 4 mm y un FOV de 14 km a una distancia de trabajo de 5 km). Estos sistemas pueden ser útiles cuando se requiere una gran cobertura de campo de visión y una distancia de trabajo reducida, por ejemplo, para cámaras de monitoreo instaladas sobre un poste de algunas decenas de metros.

Así, los sistemas 3 y 4 presentan ser candidatos llamativos debido a sus características: a 5000 m de altura, el sistema 3 tiene un campo de visión vertical de 2473 m, y el sistema 4 3863 m. A pesar de lo anterior, dadas sus características del sensor y apertura del objetivo, se tiene una resolución en tierra de 2.5 m y 1.2 m para los sistemas 3 y 4, respectivamente, a la misma altura de 5000 m. Sin embargo, estos sistemas presentan altos costos para su sensor; para el sistema 3 tiene un tamaño del sensor de 12.36×12.36 mm y una resolución de 20 mega-pixeles, lo cual hace que tenga una resolución en tierra de 0.54 m a 5000 m de altura. Adicionalmente, este tiene un objetivo con focal de 25 mm y una apertura de f/1.8, lo cual lo hace un objetivo con grandes capacidades para resolver altas frecuencias con una resolución en tierra de 2.5 m; el sistema 4 posee el mismo sensor que el sistema 3, pero se diferencia de este por su objetivo, el cual tiene una distancia focal de 16 mm y una apertura de f/1.8, lo cual corresponde a un FOV y resolución de 3863 m y 1.22 m, respectivamente. El principal inconveniente con estos sistemas es el peso de los objetivos, ya que para el sistema 3 se tiene un peso de 78 g, y para el sistema 4 un peso de 128 g, lo cual los hacen los objetivos más pesados, solo superados por el objetivo del sistema 2. Adicionalmente, estos sistemas tiene un costo elevado; solo el sensor cuenta 2500 \$USD. Los objetivos de los sistemas 3 y 4 tienen un costo de 870 y 1050 \$USD, respectivamente, esto es, un costo de 3379 y 3550 \$USD, respectivamente, para los sistemas 3 y 4, lo cual los hace más costoso del requerimiento de costos establecido.

Por lo anterior, dada los requerimientos del sistema, es pertinente escoger un sistema adecuado: los sistemas 6 (8 mm f/2.5, NIR) y 7 (8.5 mm f/1.8, VIS)

aparecen como un buen compromiso; a 50 m cubren unos 26 m de ancho con $\Delta_{MTF} < 1.5$ cm, y a 1000 m mantienen resoluciones de 20 – 26 cm sobre aproximadamente 500 m de cobertura. A los 5 km de altura, estos sistemas tienen un campo de visión de 2500 m aproximadamente y una resolución en tierra de 2 - 3 metros. Además, al compartir casi la misma geometría óptica, facilitan la fusión multiespectral y minimizan desalineamientos entre canales. Lo anterior va acorde a las recomendaciones generales dadas por fabricantes de sistemas óptico, los cuales recomiendan tener una relación entre la distancia de trabajo y el campo de visión FOV entre 2 y 4. Por estas razones, para el prototipo inicial de la QBee y la KBee, se da prioridad a los sistemas 6 y 7. Adicionalmente, el costo de estos sistemas es más reducido; para el sensor de los sistemas 6 y 7, poseen un costo de 351 y 309 \$USD, respectivamente. Para sus objetivos, poseen un costo de 190 y 468 \$USD, respectivamente. Esto corresponde a un costo de aproximadamente 541 y 777 \$USD, respectivamente, lo cual los deja dentro del rango de costos de 1500 \$USD establecido.

1.1.5 Conclusiones del proceso de diseño

Teniendo en cuenta masa, consumo, profundidad de bits y tamaño de píxel, junto con los resultados de la Tabla 1.3, se propone como configuración óptima la pareja AR0521 (VIS) + AR0522 (NIR) montada en lentes de 8.5 mm f/1.8 y 8 mm f/2.5 (sistemas 7 y 6). Esta combinación ofrece un equilibrio ideal entre resolución, campo de visión y eficiencia energética para las misiones del proyecto C3. Cabe mencionar, que el financiamiento de la compra de los sistemas 6 y 7 fue proporcionado por el proyecto 4DAir de la Universidad EAFIT y liderado por la Dra. Elena Montilla Rosero, a lo cual hacemos mención en los agradecimientos de este trabajo.

1.1.6 Sistemas ópticos candidatos

A continuación, se muestran las tablas utilizadas para recapitular toda la información de los 8 sistemas ópticos candidatos:

		System 1	System 2	
Sensor	Name	Ivium 1800 U-2040 20.4 MP Sony IMX541 CMOS sensor - Allied Vision	Ivium 1800 U-2050	
	Tipo	Sony IMX541	Sony IMX183	
	Weight	65	65	
	Prize	\$2,215.00	\$701.00	
	Sensor size (V) [pixels]	4512	3672	
	Sensor size (H) [pixels]	4512	5496	
	Sensor's resolution [lp/mm]	182,481/7518	208,333/3333	
	Pixel size [μm]	2,74	2,4	
	Physical size Height (mm)	12,36288	8,8128	
	Physical size Width (mm)	12,36288	13,1904	
	Color	BW and Color	BW and Color	
	Operational temperature	-20 >65 °C	-20 >65°C	
	Spectral range	300 to 1100 nm	300 to 1100 nm	
	Sensor type	CMOS	CMOS	
Physical characteristics : Dimensions	Lens mount	C-Mount, CS-Mount	C-Mount	
	Max. fram rate at full resolution	21 fps at 450 MByte/s, Mono8	21 fps at 450 MByte/s, Mono8	
	ADC	12 Bit	12 Bit	
	Image buffer (RAM)	256 KByte	256 KByte	
	Bit depth	12-bit Bit	10-bit Bit	
	Power requirements (DC)	29.4 x 29.4 x 38.2 mm	38 x 29 x 29	
	Power consumption	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V USB power: 3.9 W (typical) Ext. power: 4.1 W (typical)	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V USB power: 3.2 W (typical) Ext. power: 3.4 W (typical)	
Lens	Name	6mm f/16, HP7 Series Fixed Focal Length Lens Edmund Optics	6mm f/2.8, HP7 Series Fixed Focal Length Lens	
	Focal distance [mm]	16	50	
	AFOV	0,737350672	0,175801815	
	Aperture	f/16	f/2.8	
Graphics processor	Weight [g]	138	No specified	
	MTF at 30% contrast [lp / mm]	62	180	
Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	
46	46	46 g	46 g	
Ground resolution and field of view with a x working distance	50	m	Fov [m] 38,634 Magnification 0,00032 Resolution object plane [m] 0,025201613	Fov [m] 8,8128 Magnification 0,001496732 Resolution object plane [m] 0,001603493
	1000	m	Fov [m] 772,68 Magnification 0,000016 Resolution object plane [m] 0,17125	Fov [m] 176,256 Magnification 7,48366E-05 Resolution object plane [m] 0,032069369
	5000	m	Fov [m] 3863,4 Magnification 0,0000032 Resolution object plane [m] 0,85625	Fov [m] 1,49673E-05 Magnification 1,49673E-05 Resolution object plane [m] 0,160349345
			Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m] 2,52016129	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m] 0,18558952

		System 3	System 4	
Sensor	Name	Ivium 1800 U-2040 20.4 MP Sony IMX541 CMOS sensor - Allied Vision	Ivium 1800 U-2040 20.4 MP Sony IMX541 CMOS sensor - Allied Vision	
	Tipo	Sony IMX541	Sony IMX541	
	Weight	65	65	
	Prize	\$2,215.00	\$2,215.00	
	Sensor size (V) [pixels]	4512	4512	
	Sensor size (H) [pixels]	4512	4512	
	Sensor's resolution [lp/mm]	182,481/7518	182,481/7518	
	Pixel size [μm]	2,74	2,74	
	Physical size Height (mm)	12,36288	12,36288	
	Physical size Width (mm)	12,36288	12,36288	
	Color	BW and Color	BW and Color	
	Operational temperature	-20 >65 °C	-20 >65°C	
	Spectral range	300 to 1100 nm	300 to 1100 nm	
	Sensor type	CMOS	CMOS	
Physical characteristics : Dimensions	Lens mount	C-Mount, CS-Mount	C-Mount, CS-Mount	
	Max. fram rate at full resolution	21 fps at 450 MByte/s, Mono8	21 fps at 450 MByte/s, Mono8	
	ADC	12 Bit	12 Bit	
	Image buffer (RAM)	256 KByte	256 KByte	
	Bit depth	12-bit Bit	12-bit Bit	
	Power requirements (DC)	29 x 29 x 38.2 mm	29.4 x 29.4 x 38.2 mm	
	Power consumption	5 VDC over MIPI CSI-2 Typical: 3.7 W	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V USB power: 3.9 W (typical) Ext. power: 4.1 W (typical)	
Lens	Name	5mm f/1.8, HP7 Series Fixed Focal Length Lens	6mm f/1.8, HP7 Series Fixed Focal Length Lens	
	Focal distance [mm]	25	16	
	AFOV	0,484/9184	0,73/50672	
	Aperture	f/1.8	f/1.8	
Graphics processor	Weight [g]	78	138	
	MTF at 30% contrast [lp / mm]	40	128	
Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4	
46	46	46	46	
Ground resolution and field of view with a x working distance	50	m	Fov [m] 24,72576 Magnification 0,0005 Resolution object plane [m] 0,00548	Fov [m] 38,634 Magnification 0,00032 Resolution object plane [m] 0,0085625
	1000	m	Fov [m] 494,512 Magnification 0,000025 Resolution object plane [m] 0,1098	Fov [m] 772,68 Magnification 0,000016 Resolution object plane [m] 0,17125
	5000	m	Fov [m] 2472,576 Magnification 0,000005 Resolution object plane [m] 0,548	Fov [m] 3863,4 Magnification 0,0000032 Resolution object plane [m] 0,85625
			Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m] 2,5	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m] 1,220703125

1.1. Diseño del sistema multiespectral KBee

11

		System 5	System 6 (NIR)
Sensor	Name	basler ace acA1920-40gc - Area Scan Camera (baslerweb.com)	Illed Vision Alvium 1800 U-50Im NIR, 1/2.5" 5MP S-Mount, Right Angle USB 3.1 NIR Camera ON Semi AR0522
	Tipo	IMX249	65
	Weight	90	\$351.00
	Prize	\$670.00	1944
	Sensor size (V) [pixels]	1920	2592
	Sensor size (H) [pixels]	1200	227,272,272,273
	Sensor's resolution [lp/mm]	85,324,232,08	2,2
	Pixel size [μm]	5,86	4,2768
	Physical size Height (mm)	11,242	5,7024
	Physical size Width (mm)	10,432	NIR
	Color	BW and Color	4,5 to 4,65
	Operational temperature	0 >50 °C	300 to 1100 nm
	Spectral range	300 to 1100 nm	CMOS
	Sensor type	CMOS	C-Mount, CS-Mount, S-Mount
Physical characteristics : Dimensions	Lens mount	C-Mount, CS-Mount	68 fps at ≥350 MByte/s, Mono8
	Max. fram rate at full resolution	42 fps	10 Bit
	ADC	12 Bit	256 KByte
	Image buffer (RAM)	256 KByte	Max. 10 Bit
	Bit depth	10/12 bits	33 to 59
	Power requirements (DC)	42 mm x 100 mm x 29 mm	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V
	Power consumption	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V	USB power: 3.9 W (typical) Ext. power: 4.1 W (typical)
	Physical characteristics : Dimensions	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V
	Power requirements (DC)	USB power: 2.2 W (typical) Ext. power: 2.4 W (typical)	USB power: 2.2 W (typical) Ext. power: 2.4 W (typical)
	Power consumption		
Lens	Name	basler Lens C125-0418-5M-P 4mm - Lens (baslerweb.com)	/2.5, NIR, 8.0mm HEO Series M12 Lens
	Focal distance [mm]	4	8
	AFOV	1,905,040,949	0,522,387,17
	Aperture	f/1.8	f/2.5
Graphics processor	Weight [g]	-	4
	MTF at 30% contrast [lp / mm]	-	120
Ground resolution and field of view with a x working distance	Name	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4
	Weight [g]	46	46
	Fov [m]	140,64	26,73
	Magnification	0,00005	0,00021,3333
	Resolution object plane [m]	0,1172	Resolution object plane [m]
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	-	0,010325
	Fov [m]	2812,8	534,6
	Magnification	0,000025	Resolution object plane [m]
	Resolution object plane [m]	2,344	1,06667E-05
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	-	0,20625
	Fov [m]	14064	2673
	Magnification	0,000005	2,13333E-06
	Resolution object plane [m]	11,72	1,03125
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	-	1,953125

		System 7	System 8
Sensor	Name	Illed Vision Alvium 1800 U-500c, 1/2.5" 5.0MP C-Mount, USB 3.1 Color Camera	Illed Vision Alvium 1800 U-500c, 1/2.5" 5.0MP S-Mount, USB 3.1 Color Camera
	Tipo	ON Semi AR0521	ON Semi AR0521
	Weight	65	60
	Fov	\$380,00	\$380,00
	Sensor size (V) [pixels]	1944	1944
	Sensor size (H) [pixels]	2592	2592
	Sensor's resolution [lp/mm]	227,272,273	227,272,273
	Pixel size [μm]	2,2	2,2
	Physical size Height (mm)	4,2768	4,2768
	Physical size Width (mm)	5,7024	5,7024
	Color	BW and Color	BW and Color
	Operational temperature	-10 to +70	-10 to +70
	Spectral range	300 to 1100 nm	300 to 1100 nm
	Sensor type	CMOS	CMOS
Physical characteristics : Dimensions	Lens mount	C-Mount, CS-Mount, S-Mount	C-Mount, CS-Mount, S-Mount
	Max. fram rate at full resolution	67 fps at ≥350 MByte/s, Mono8	67 fps at ≥350 MByte/s, Mono8
	ADC	10 Bit	10 Bit
	Image buffer (RAM)	256 KByte	256 KByte
	Bit depth	Max. 10 Bit	Max. 10 Bit
	Power requirements (DC)	13 × 26 × 26 (bare board, standard), 13 × 30 × 26 (bare board, 90°)	13 × 26 × 26 (bare board, standard), 13 × 30 × 26 (bare board, 90°)
	Power consumption	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V	Power over USB 3.1 Gen 1 External power 5.0 V
	Name	5mm, f/1.3 Cr Series Fixed Focal Length Lens	USB power: 2.2 W (typical) Ext. power: 2.4 W (typical)
	Focal distance [mm]	8,5	12,5
	AFOV	0,499293698	0,338863723
Lens	Aperture	f/1.8	f/2.5
	Weight [g]	60	5
	MTF at 30% contrast [lp / mm]	85	150
Graphics processor	Name	Raspberry Pi 4	Raspberry Pi 4
	Weight [g]	46	46
Ground resolution and field of view with a x working distance	Fov [m]	25,157,647,070	17,1072
	Magnification	0,000017	0,00025
	Resolution object plane [m]	0,012941176	0,0088
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	0,03462070	0,0133333333
	Fov [m]	503,1529412	342,144
	Magnification	0,000085	0,000125
	Resolution object plane [m]	0,258823292	0,176
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	0,692041522	Resolution object plane [m]
	Fov [m]	2515,764706	1710,72
	Magnification	0,0000017	Magnification
	Resolution object plane [m]	1,294117647	0,0000025
	Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]	3,460207612	Resolution object plane [m]
			0,88
			Resolution object plane with lens' MTF at 30 % contrast [m]
			1,3333333333

Chapter 2

Procura y construccion de los sistemas k bee y q bee de humaths space systems

Introducción al 4dair y al c3 y condiciones de diseño mecánico del dispositivo k bee y q bee

2.1 Sistema óptico seleccionado para construcción

Los sistemas 6 y 7 integran un sensor, un objetivo y un filtro específicos montados sobre la carcasa impresa (Figura 2.3). Esta configuración facilita la fabricación y el mantenimiento, y permite intercambiar o actualizar componentes de forma independiente.

El sensor NIR Allied Vision Alvium 1800 U-501m (ON Semi AR0522) comparte tamaño de sensor (2592×1944 px) y paso de píxel ($2.2 \mu\text{m}$) con su homólogo VIS, pero presenta una respuesta cuántica optimizada en 700–1000 nm, ideal para la adquisición de imágenes en este rango espectral. El objetivo HEO Series de 8 mm f/2.5 se monta directamente sobre la montura S-Mount y ofrece un AFOV de 29.9° . Con 4 g de masa, cumple el requisito de carga útil y minimiza la transmisión de vibraciones. La montura impresa en resina aloja un filtro paso banda de 850 nm (CWL) y 50 nm de ancho de banda, 12.5 mm de diámetro, Hard Coated OD 4.0, encajando sobre el barril y fijándose con un anillo roscado que garantiza la alineación sin sobresalir del perfil de la carcasa.

El sensor VIS Alvium 1800 U-500c (ON Semi AR0521) mantiene los $2.2 \mu\text{m}$ de paso de píxel y emplea obturación rolling, reduciendo peso y costo. El objetivo Cr Series de 8.5 mm f/1.3, ruggedized por el fabricante, ofrece gran apertura y resistencia a impactos y vibraciones.. El filtro VIS (UV/IR Cut) M25.5×0.50 bloquea 200–370 nm y 750 – 1100 nm, transmitiendo solo 370–750 nm, e integra directamente una montura compatible para el montaje en el objetivo.

La conectividad micro USB-B facilita la alimentación y transmisión de datos con la Raspberry Pi 4 (Figura 2.1). Además, permiten la integración y control de los sensores a partir de un script en python, lo cual da flexibilidad para diseñar el preprocesamiento y captura de las imágenes de ambos sensores de forma simultanea. Esto permite incluso carga configuracones ya establecidas o actualiza en tiempo real dichas fongiruaciones relacioandas a paramaetros como, por ejemplo, el tiempo de exposiicón o la ganancia.

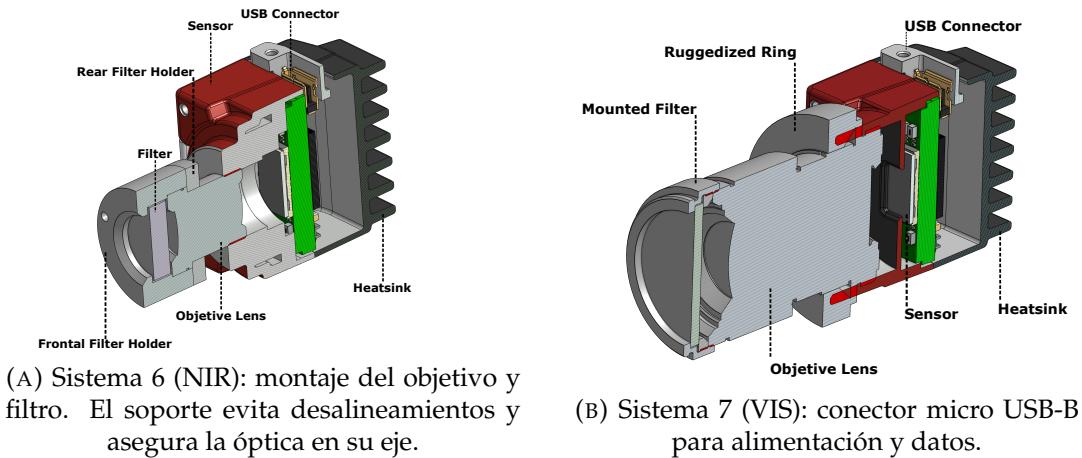


FIGURE 2.1: Componentes destacados de los sistemas ópticos seleccionados para el prototipo: NIR (izquierda) y VIS (derecha).

2.2 Sistema de adquisicion y control de datos

Con el propósito de automatizar el proceso de captura, procesamiento y almacenamiento de imágenes multiespectrales durante los vuelos o pruebas en banco, se desarrolló un script en lenguaje Python que permite la adquisición simultánea de imágenes en el espectro visible (VIS) y cercano al infrarrojo (NIR), integrando además datos de posicionamiento global (GPS) en tiempo real.

Este script constituye una adaptación del código de ejemplo provisto por la biblioteca vmbpy, correspondiente al SDK de *Allied Vision*, y fue modificado sustancialmente para incluir manejo multihilo, escritura condicional de video, superposición de información telemétrica, y control por teclado durante la ejecución.

2.2.1 Estructura general del script

El flujo lógico del código se presenta en la Figura 2.2, donde se destacan tres etapas fundamentales: (i) la inicialización del entorno y detección de cámaras, (ii) la adquisición concurrente de tramas mediante hilos productores, y (iii) el procesamiento y visualización de las imágenes mediante un hilo consumidor.

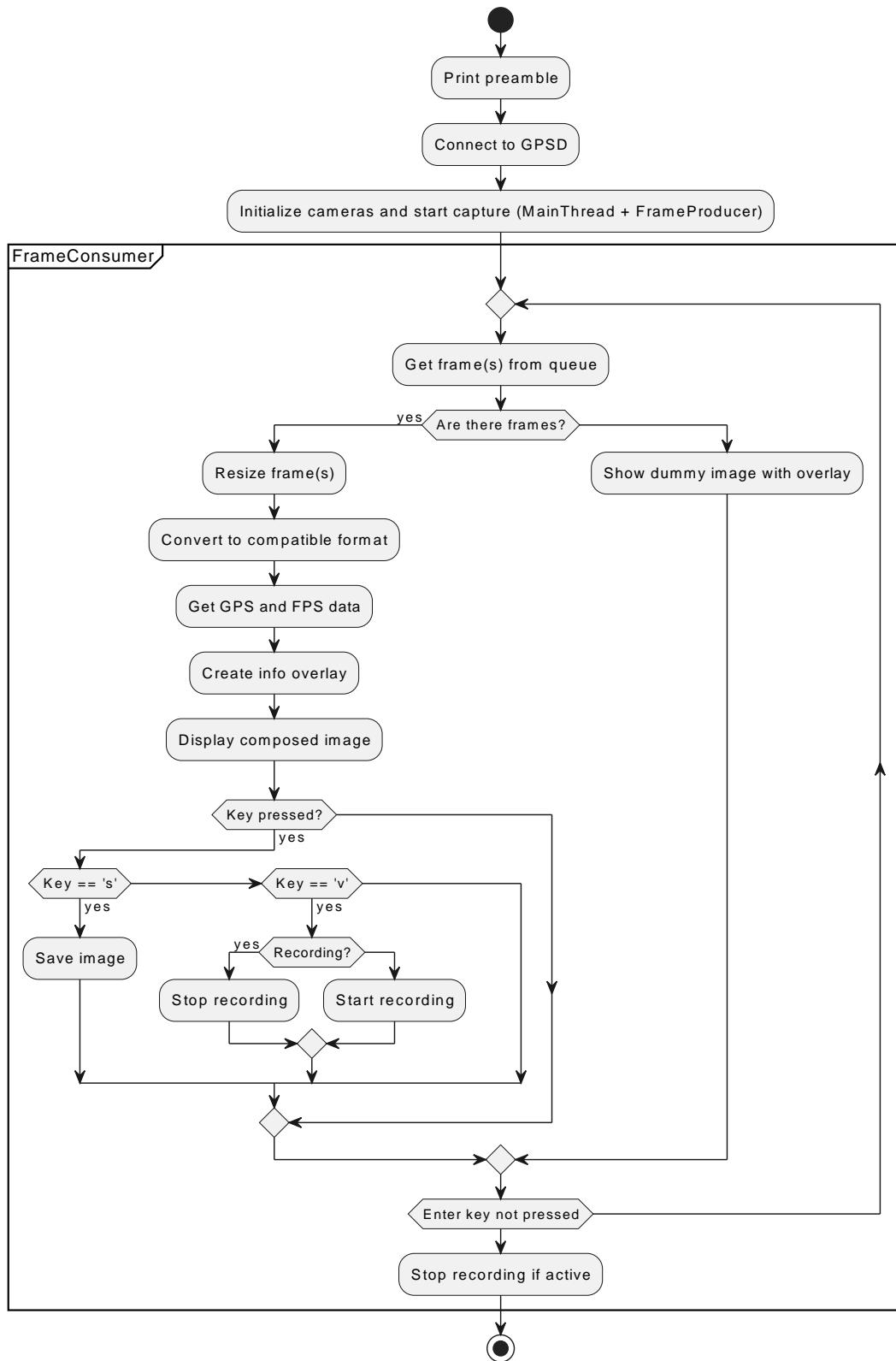


FIGURE 2.2: Flujo lógico del script de adquisición y visualización de la QBee. Se integran múltiples cámaras, adquisición en paralelo y procesamiento en tiempo real.

2.2.2 Inicialización y adquisición

Durante la fase de inicialización, se establece una conexión con el servidor local de GPS (`gpsd`) utilizando la librería homónima. Paralelamente, se instancia la clase `MainThread`, responsable de detectar automáticamente todas las cámaras conectadas a través del sistema `VmbSystem`.

Cada cámara detectada es asignada a un hilo independiente de la clase `FrameProducer`, la cual configura parámetros críticos como la resolución de adquisición, formato de pixel (`Mono8` o `Bgr8`), y el modo automático de exposición. Estos hilos se encargan de capturar tramas en tiempo real, estimar la tasa de cuadros por segundo (FPS) y encolar las imágenes en una estructura tipo FIFO (`queue.Queue`) para su posterior procesamiento.

2.2.3 Procesamiento, visualización y almacenamiento

La etapa central del sistema está contenida en la clase `FrameConsumer`, la cual opera como hilo consumidor. Esta clase realiza múltiples tareas en paralelo: (i) extrae tramas de la cola compartida, (ii) redimensiona las imágenes si la resolución de adquisición no coincide con la esperada (2592×1944 px), (iii) convierte los formatos de imagen a RGB si es necesario, y (iv) concatena las imágenes capturadas por múltiples cámaras en un único mosaico horizontal.

Sobre esta imagen compuesta se genera una barra de información (*overlay*) que incluye los datos georreferenciados en tiempo real (latitud, longitud, altitud, velocidad, ángulo de rumbo y timestamp), además de la tasa de cuadros por segundo estimada para cada cámara. Esta superposición se construye como una matriz adicional que se apila verticalmente a la imagen original.

El sistema también permite una interacción directa con el operador mediante teclas específicas:

- s: captura la imagen actual y la guarda en formato JPEG.
- v: inicia o detiene la grabación de video en formato AVI, con compresión XVID, a una frecuencia de 20 FPS.
- Enter: finaliza la ejecución del script y cierra todas las ventanas.

2.2.4 Ejecución automática como servicio de sistema

Con el fin de garantizar un funcionamiento autónomo y minimizar la intervención del usuario, se diseñó un servicio de sistema en Linux (utilizando `systemd`) que permite la ejecución automática del script tan pronto como el dispositivo inicia. Este servicio fue instalado y habilitado en el sistema operativo de una Raspberry Pi 4 modelo B equipada con 8 GB de memoria RAM.

Gracias a esta configuración, el sistema conocido como QBee se activa automáticamente al conectar la batería externa a la Raspberry Pi, sin requerir

intervención adicional ni acceso al entorno gráfico. Inmediatamente después del arranque, el script inicia la captura de imágenes y comienza a almacenarlas en la memoria interna, lo que resulta particularmente útil para operaciones en campo, donde no es viable iniciar el sistema manualmente.

2.2.5 Robustez y tolerancia a fallos

Durante la ejecución, el sistema cuenta con mecanismos de tolerancia a errores. Por ejemplo, si el buffer de imágenes se encuentra lleno, los hilos productores omiten la encolación de nuevas tramas para evitar bloqueos. Asimismo, si no se detecta ninguna cámara activa, se genera una imagen dummy con un mensaje de advertencia.

Las tramas obtenidas se almacenan temporalmente en memoria, lo que permite minimizar la latencia entre adquisición y visualización. La sincronización entre hilos se realiza mediante eventos y bloqueos controlados, garantizando la integridad de los datos entre productores y consumidores.

2.2.6 Dependencias y entorno de ejecución

El script fue ejecutado sobre el sistema operativo Raspberry Pi OS (basado en Debian) en una Raspberry Pi 4 modelo B. Se utilizó Python 3.8 y las siguientes dependencias: vmbpy, opencv-python, gpsd-py3, numpy, threading, queue y keyboard. La visualización se realizó mediante la salida HDMI de la Raspberry, y se requirió establecer la variable de entorno DISPLAY=":0" para habilitar la salida gráfica de OpenCV.

2.2.7 Control remoto del dispositivo QBee

Además de su capacidad de operación autónoma en campo, el sistema QBee fue diseñado con funcionalidad de control remoto, permitiendo su supervisión y operación desde dispositivos externos como computadores personales, tabletas o teléfonos móviles. Esta característica extiende significativamente la versatilidad del sistema, facilitando tanto pruebas en laboratorio como operaciones a distancia en entornos de difícil acceso.

Existen dos métodos principales para acceder de forma remota a la interfaz gráfica del sistema:

1. Conexión local mediante VNC El primer método consiste en conectarse directamente a la Raspberry Pi 4 que ejecuta el sistema QBee mediante el protocolo VNC (*Virtual Network Computing*). Para ello, es necesario que la Raspberry esté conectada a una red Wi-Fi previamente configurada para su conexión automática. Asimismo, el dispositivo de control (computador o móvil) debe encontrarse dentro de la misma red local.

Una vez cumplida esta condición, el usuario puede acceder a la interfaz gráfica de la Raspberry Pi introduciendo su dirección IP o una dirección local estática configurada mediante el sistema operativo Raspberry Pi OS. Para completar el acceso, se requiere conocer las credenciales de autenticación (nombre de usuario y contraseña) establecidas previamente en el sistema.

2. Acceso global mediante Raspberry Pi Connect El segundo método se basa en el uso de *Raspberry Pi Connect*, un servicio gratuito proporcionado por la fundación Raspberry Pi. Este permite acceder a la interfaz gráfica del sistema desde cualquier lugar con conexión a Internet, sin necesidad de estar dentro de la misma red local.

Para habilitar esta funcionalidad, la Raspberry Pi debe estar vinculada a una cuenta en el servicio *Raspberry Pi Connect* y tener acceso a Internet mediante una red Wi-Fi registrada previamente. Una vez registrado el dispositivo, el usuario puede iniciar sesión en el portal de Raspberry Pi y conectarse directamente a su interfaz gráfica a través del navegador.

En ambos métodos, el usuario obtiene acceso completo al entorno de escritorio de la Raspberry Pi. Como se ha descrito en las secciones anteriores, el script de adquisición de QBee se ejecuta automáticamente al iniciar el sistema, lo que da lugar a la apertura de una ventana de visualización en tiempo real de las imágenes capturadas.

Desde esta interfaz remota, el usuario puede interactuar directamente con el sistema utilizando un teclado virtual o físico para ejecutar acciones de control. Entre las funcionalidades disponibles se encuentran:

- Presionar la tecla s para capturar y guardar una imagen.
- Presionar la tecla v para iniciar o detener la grabación de video.
- Presionar la tecla Enter para finalizar la ejecución del script.

Esta capacidad de control remoto permite verificar el correcto funcionamiento del sistema en tiempo real, supervisar condiciones de operación, y capturar eventos relevantes sin necesidad de intervención física directa sobre el dispositivo.

Adicionalmente, el sistema QBee fue configurado para permitir actualizaciones remotas del código fuente del script mediante el sistema de control de versiones Git. El script está vinculado a un repositorio privado alojado en la plataforma GitHub, lo que permite a los usuarios autenticados realizar *pull* de actualizaciones desde cualquier ubicación con acceso remoto al dispositivo. Esta funcionalidad permite una mejora continua del sistema, facilitando la depuración, implementación de nuevas funcionalidades y adaptaciones específicas sin necesidad de acceso físico al hardware.

2.3 Construcción e integración del prototipo

2.3.1 Modelo CAD y ensamblaje mecánico

El case del QBee está impreso en PET-G (tereftalato de polietileno modificado con glicol), un polímero cuya densidad típica ronda 1,317 g/cm³, que combina buena resistencia al impacto (Charpy ≈ 4,03 kJ/m²) y alargamiento al rompimiento hasta 15% en formulaciones estándar. Su módulo de tracción (4015 MPa) y de flexión (2987 MPa) aseguran rigidez, mientras que su temperatura de transición vítrea (≈ 76 °C) y rango de fusión (220–260 °C) lo hacen estable en el calor generado por electrónica cercana. Además, presenta excelente durabilidad química y mínima tendencia al *warping*, ideal para piezas de geometría compleja. El peso total del dispositivo es de 1.810 gramos, cumpliendo así con el requisito de peso impuesto.

La dimensión externa del case se diseñó para encajar en el bay interno del UAV C3, sin requerir hermeticidad, ya que este estaría protegido de las condiciones exteriores. El cierre se logra con tornillos M3 que unen la tapa inferior y el divisor de compartimentos a la carcasa principal. En el interior, cada sistema óptico (6/NIR y 7/VIS) se ancla directamente al sensor mediante cuatro tornillos M3 en sus laterales, asegurando alineación con el eje de vuelo. El sistema 6 (NIR) monta el Alvium 1800 U-501m (AR0522) + objetivo 8 mm f/2.5 + filtro 850 nm en montura S, todo encapsulado en una montura de resina 3D. El sistema 7 (VIS) agrupa el Alvium 1800 U-500c (AR0521) + objetivo 8.5 mm f/1.3 ruggedized + filtro VIS UV/IR Cut en rosca M25.5, manteniendo rigidez frente a vibraciones.

La unidad de cómputo y almacenamiento es una Raspberry Pi 4, colocada en un bloque intermedio y alimentada por una powerbank de 20.000 mAh. Este sistema tiene acoplado un hat de GPS, que suministra al sistema de metadatos de fecha, hora UTC, latitud, longitud, altitud y ángulo de elevación, esenciales para la georreferenciación y ortorrectificación de imágenes. Finalmente, el módulo *in situ* de sensado de contaminantes comparte alimentación de 5 V de la misma batería y ocupa el compartimento trasero de la carcasa, completando la funcionalidad del QBee.

2.4 Pruebas de operación

2.4.1 Escenarios de prueba

Los escenarios de prueba definidos para validar el correcto funcionamiento del sistema *QBee* se clasifican en dos grupos principales: (i) pruebas terrestres en condiciones controladas, y (ii) pruebas en vuelo.

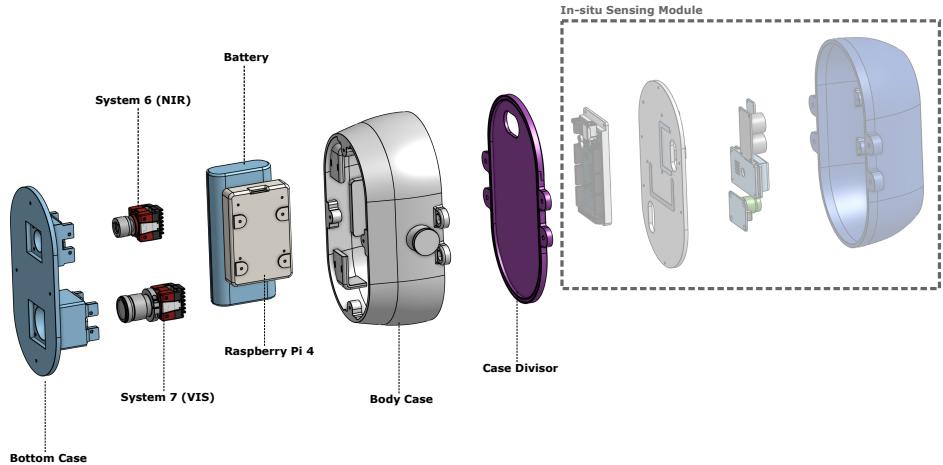


FIGURE 2.3: Vista explosionada del ensamble completo del QBee, mostrando la carcasa impresa en PET-G y la disposición de los sistemas 6 (NIR, 8 mm f/2.5) y 7 (VIS, 8.5 mm f/1.8). Este diseño y construcción fue concebido con el apoyo del equipo de manufactura del proyecto C3.

Pruebas terrestres

Antes de cualquier despliegue aéreo, es indispensable realizar pruebas en tierra que permitan validar el sistema en condiciones controladas, sin desplazamiento y sin exposición a ambientes extremos. En este contexto, se define como ambiente extremo cualquier entorno cuya temperatura supere los valores comunes encontrados en las principales ciudades colombianas ($\leq 40^{\circ}\text{C}$), o que implique lluvia, alta humedad o condiciones de iluminación nocturna.

Dado que el sistema *QBee* no cuenta con una fuente de iluminación activa, las pruebas se realizan exclusivamente durante el día, aprovechando la luz solar como fuente principal para la adquisición de imágenes multiespectrales.

El objetivo de estas pruebas es verificar el comportamiento general del sistema en condiciones operativas normales. En particular, se evalúa:

- La correcta inicialización automática del script de adquisición al encender el dispositivo.
- La funcionalidad de captura de imágenes al presionar la tecla s.
- La grabación de video y su detención mediante la tecla v.
- La estabilidad del dispositivo al operar durante largos periodos de tiempo.

Las pruebas se realizaron utilizando dos formas de alimentación:

- **Fuente directa:** mediante un adaptador USB-C conectado a una toma de corriente convencional.
- **Fuente interna:** a partir de la batería recargable integrada en la carcasa del *QBee*.

Una de las pruebas más relevantes consistió en la captura de una imagen utilizando la tecla **s**, ya fuera desde un teclado conectado directamente a la Raspberry Pi 4 o mediante acceso remoto. En la Figura 2.4 se presenta un ejemplo de imagen capturada en estas condiciones, utilizando un teléfono inteligente para el control remoto del sistema. La prueba confirma el correcto funcionamiento de ambos canales (VIS y NIR), evidenciando que la captura simultánea se realiza de manera sincronizada, y que el sistema responde adecuadamente a la orden de captura en tiempo real.



FIGURE 2.4: Captura de imagen realizada durante prueba terrestre mediante control remoto desde un teléfono inteligente. La imagen muestra la composición de ambos canales VIS y NIR, confirmando la funcionalidad del sistema *QBee* en condiciones operativas reales.

En complemento, en la Figura 2.5 se presenta un ejemplo de visualización del sistema de coordenadas geográficas en tiempo real. En la parte superior de la imagen se observa la superposición del texto con la latitud, longitud, altitud, velocidad y rumbo extraídos del módulo GPS integrado en la *QBee*. Esta funcionalidad es crítica para asegurar la trazabilidad espacial de las imágenes adquiridas y para su posterior georreferenciación.

Pruebas en superficie en condiciones extremas

Durante la VII Campaña Aérea y XI Expedición Científica a la Antártida organizada por la Fuerza Aérea Colombiana, el sistema *QBee* fue sometido a una prueba de funcionamiento en condiciones climáticas extremas. En este escenario, se enfrentó a temperaturas diurnas promedio cercanas a los 0 °C, significativamente inferiores a las condiciones habituales en las cuales opera el sistema.

El objetivo principal de esta prueba fue evaluar la capacidad del dispositivo para operar de manera confiable en ambientes fríos. Se identificó que,



FIGURE 2.5: Visualización del sistema de coordenadas geográficas (GPS) en tiempo real sobre la imagen capturada. Se muestran latitud, longitud, altitud, velocidad y rumbo, extraídos automáticamente del módulo GPS durante las pruebas.

bajo estas condiciones, el sistema presentó fallas intermitentes en su funcionamiento: en algunas ocasiones la *QBee* no inició correctamente, o no fue capaz de realizar la grabación de video como lo hace regularmente. Estas fallas pueden estar asociadas a una inicialización deficiente del sistema de procesamiento (Raspberry Pi 4), o a alteraciones en el comportamiento de los sensores VIS y NIR debido a la baja temperatura.

No obstante, también se registraron casos exitosos de captura de video, lo cual demuestra que el sistema *QBee* puede llegar a operar de forma funcional en condiciones de frío extremo. Estos resultados parciales abren la posibilidad de implementar ajustes de hardware y software para robustecer el funcionamiento del sistema en ambientes más hostiles. Queda como trabajo futuro el estudio detallado de las causas específicas de las fallas observadas, así como la exploración de soluciones que permitan una operación más confiable en entornos como la Antártida.

A pesar de los resultados mixtos, se concluye que el sistema actual no está diseñado para misiones operativas regulares en la Antártida u otras regiones con condiciones ambientales similares, sin modificaciones adicionales en aislamiento térmico, tolerancia de componentes y procedimientos de inicialización.



FIGURE 2.6: Captura de video realizada exitosamente durante la expedición científica en la Antártida. La imagen confirma que, a pesar de las condiciones extremas, el sistema *QBee* En la imagen se aprecia que la cámara visible no se encuentra correctamente enfocada, lo que puede deberse a un mal ajuste de la distancia entre el objetivo y el sensor. Sin embargo, este tipo de desajuste es corregible mediante ajuste mecánico y no afecta el funcionamiento general del sistema *QBee*. fue capaz de operar y registrar datos multiespectrales de forma puntual.

Pruebas en vuelo

Las pruebas en vuelo del sistema *QBee* fueron posibles gracias a la colaboraci'on con la Fuerza A'erea Colombiana, la cual facilit'o el montaje del dispositivo en distintas aeronaves de su flota. En una primera prueba, la unidad *QBee* fue instalada a bordo de una aeronave Cessna 208 Caravan, realizando un vuelo a una altitud aproximada de 5000 pies.

El vuelo se desarroll'o en condiciones ideales, con un rumbo y comportamiento t'ípico de una ruta comercial y sin presencia de perturbaciones atmosf'ericas significativas. Durante toda la duraci'on del trayecto, el sistema oper'o de forma estable y sin presentar inconvenientes.

Como parte de esta prueba, se verific'o la capacidad de monitoreo remoto del sistema utilizando una red Wi-Fi habilitada dentro de la aeronave, mediante la cual se accedi'o al entorno gr'afico de la Raspberry Pi utilizando el protocolo VNC. Esta conexi'on permiti'o observar en tiempo real la adquisici'on de datos por parte del sistema, confirmando la funcionalidad completa del script y la respuesta de los sensores.

En una segunda prueba, la unidad *QBee* fue montada a bordo de una aeronave de combate Tucano T-27, con el fin de validar su desempeño bajo condiciones de vuelo más exigentes. En este caso, no se contó con un sistema de monitoreo en tiempo real debido a las restricciones propias de la aeronave. Sin embargo, el sistema operó de forma autónoma durante la misión, registrando exitosamente la captura de video.

A diferencia del vuelo en la Cessna Caravan, esta prueba presentó una complejidad adicional, ya que durante la operación se ejecutaron maniobras que alcanzaron aceleraciones de hasta 4g. A pesar de estas condiciones dinámicas, la *QBee* logró completar su función de adquisición sin incidentes, lo cual

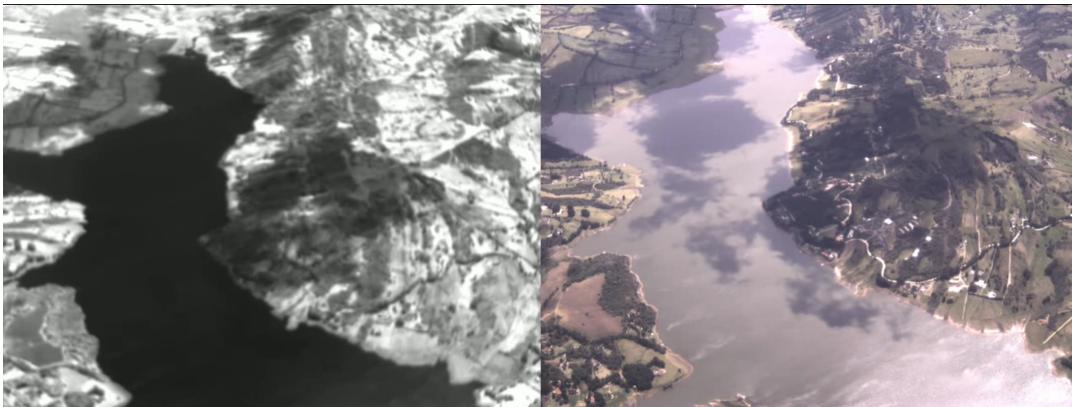


FIGURE 2.7: Captura tomada durante el vuelo de prueba en la aeronave Cessna 208 Caravan. Se observó un comportamiento estable del sistema y transmisión remota exitosa mediante protocolo VNC.

representa un resultado relevante sobre la robustez mecánica y operativa del sistema.



FIGURE 2.8: Captura de video realizada durante prueba a bordo del avión de combate T-27 Tucano. A pesar de las maniobras con aceleraciones de hasta 4g, el sistema QBee logró registrar imágenes de forma autónoma y estable. Las condiciones de iluminación ambiental no eran las más adecuadas debido a la hora del día (proximadamente las 6 pm).

2.5 Conclusiones y lecciones aprendidas

temperatura, la saturación, la cita de velocidad, los links a los videos, sobre el código,

Chapter 3

Characterization and main contributions

This chapter details the materials and methods used for the development of this work. Initially, the materials employed are described, including specific equipment, light sources, calibration patterns, and software used for data acquisition, processing, and analysis.

Subsequently, the experimental methods are presented, organized according to the type of measurement performed: geometric and spectral measurements. For each method, the experimental procedure is clearly described, justifying the choice of technique and specifying the conditions under which the experiments were conducted, including details of instrument configuration and protocols followed.

3.1 Geometric Characterization

Determination of Field of View (FOV) and Angular Field of View (AFOV)

The Field of View (FOV) of the optical system is determined in order to assess the maximum angle of the scene that the camera can capture. First, a test film is placed on a stable base located on the optical bench, preferably using a clamp that allows proper orientation with respect to the optical axis of the system. It is essential that the film is properly positioned to minimize errors caused by tilts or misalignments.

Next, the optical system is positioned on its corresponding base on the optical bench, ensuring it is centered and properly aligned with the test film (see Figure 3.1). Once the initial setup is established, images of the film are captured at different working distances. During image acquisition, an effort is made to precisely align the visible edges of the image with a known edge on the test film. Measurements are taken strictly in the vertical or horizontal direction, explicitly measuring the distance between objects located at opposite edges of the image. This procedure is carried out for both the horizontal and vertical FOV, as they may differ depending on the format of the optical sensor.

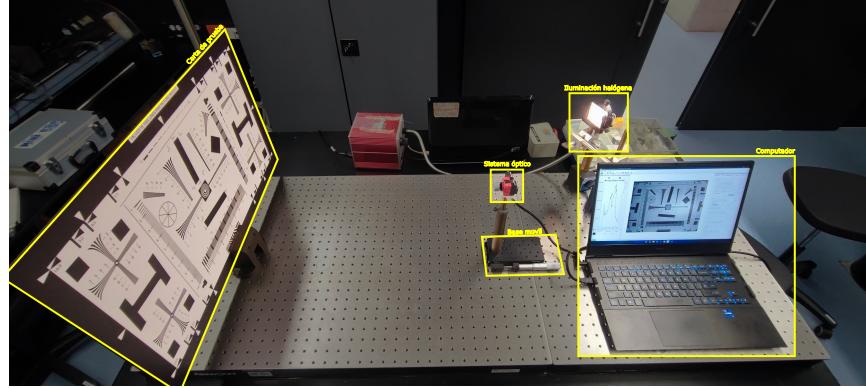


FIGURE 3.1: Optical setup developed. In this case, the use of barriers to prevent capture of unwanted light directly from the illumination source was not necessary, as the source is located behind the optical system under test. The illumination source is a tungsten halogen lamp coupled with a fiber optic cable and a diffuser.

Since FOV measurements have inherent uncertainties due to the measuring instrument and other experimental sources, a statistical analysis using weighted linear regression is implemented to properly model the functional relationship between the measured FOV and the working distance. This method explicitly considers errors in both the dependent and independent variables, allowing for consistent and less biased estimates of the model parameters. The weighted linear regression is fitted using total least squares (Deming regression), which simultaneously minimizes deviations in both variables:

$$\text{FOV} = \beta_1 \cdot \text{Working distance} + \beta_0, \quad (3.1)$$

where β_1 is the slope and β_0 is the intercept, both calculated along with their associated uncertainties, thus ensuring a statistically reliable model to describe the behavior of the FOV as a function of working distance.

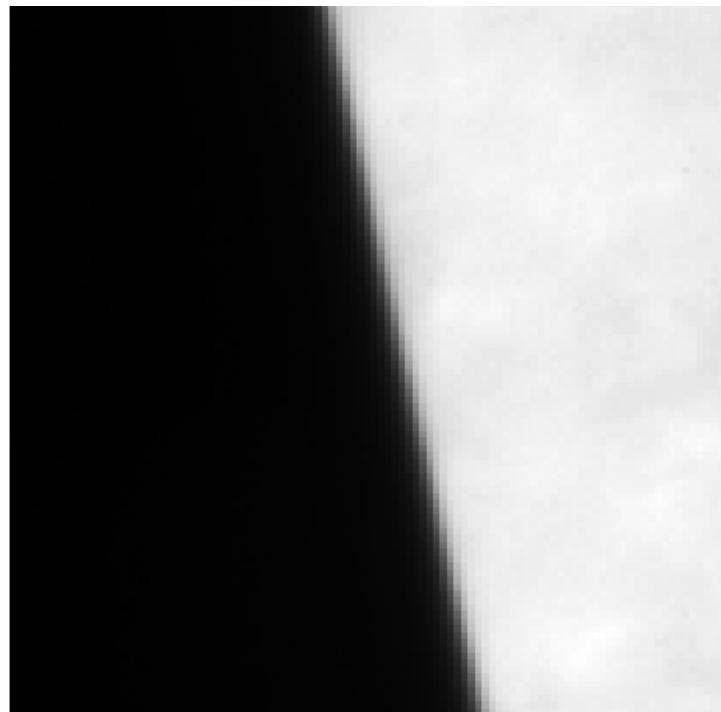
To minimize errors introduced by optical aberrations, such as spherical aberration, the measurements are preferably taken along the central vertical axis of the image. Specialized Python software is then used to analyze the images and calculate the angular FOV using the geometric relation:

$$\text{AFOV} = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\text{FOV}}{2 \cdot d} \right), \quad (3.2)$$

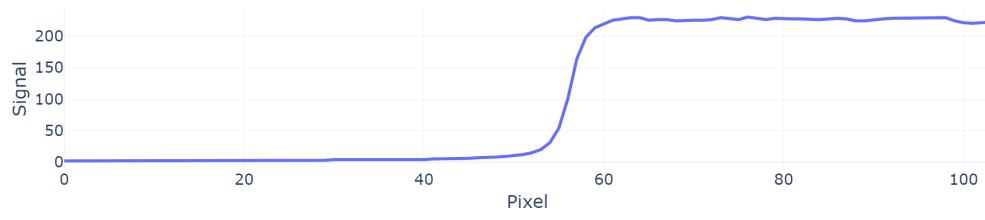
where d is the working distance.

Regarding the system's focusing, it is recommended to use an autofocus mechanism for proper image acquisition of the test chart. Since the optical systems used in this study have a fixed focal length, the focus must be manually adjusted to obtain a high-quality image. To optimize this adjustment, a method is used based on capturing an image of a well-defined edge, from which the corresponding intensity profile is extracted and displayed

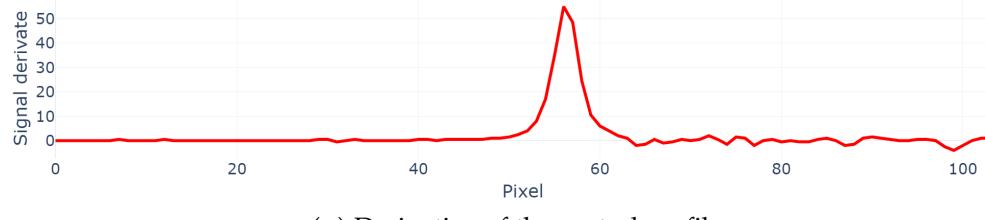
in real-time, in this case along the central horizontal line. The derivative of this profile is then calculated and plotted to represent the intensity variation across the edge transition. Focus optimization is achieved by maximizing the prominence of the peak in the derivative, indicating a higher definition in the signal variation. This point of maximum variation is considered indicative of correct focus. Figure 3.2 shows a representative example of optimal edge focusing.



(A) Image of an edge, used to properly adjust the optical system focus.



(B) Central profile of the edge image.



(C) Derivative of the central profile.

FIGURE 3.2: Set of images with their corresponding profile and derivative.

3.1.1 Modulation Transfer Function (MTF) Characterization

The Modulation Transfer Function (MTF) enables an objective evaluation of the optical system's ability to reproduce detail and contrast at different spatial frequencies. In this work, the slanted-edge method is used, as established by the international standard ISO 12233, which offers high precision, repeatability, and reliability.

The procedure begins by placing the ISO 12233 standard spatial resolution chart (see Figure 3.3) on a stable base. Uniform illumination over the chart's surface is ensured, guaranteeing that the light intensity at any point does not vary more than $\pm 10\%$ from the center value. To prevent direct light from hitting the optical system, barriers are installed to block any undesired light.

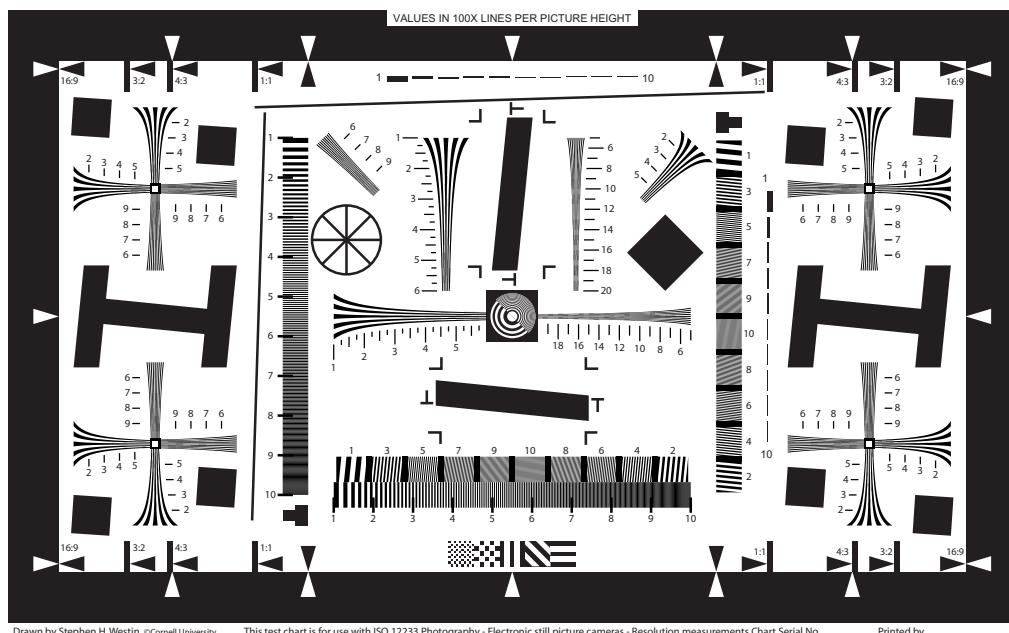


FIGURE 3.3: Standard chart used to measure the spatial frequency response of the optical system, as established in the ISO 12233 standard.

Since the optical system under analysis does not have autofocus and instead requires manual adjustment, a Python script was implemented to display the camera or sensor image in real time, along with a window showing the central horizontal intensity profile and another window showing its derivative. To determine optimal focus, the method seeks to maximize the magnitude of the extreme values—peaks and valleys—of the derivative of the central profile, since a higher derivative corresponds to better edge resolution. This indicates that the focus point has been reached where high spatial frequency details are best reproduced. This method is the same as described in Section 3.1.

The aperture and exposure time of the optical system are carefully adjusted to obtain a maximum signal without saturation in the bright areas of

the target. Signal clipping must be avoided in both bright and dark regions, including the transition zones of the slanted edge. As image compression can significantly affect resolution measurements, all system settings must be recorded and reported, including focal length, aperture, sensor resolution, and compression modes used. When using color cameras, proper white balance must be applied according to the light source, as specified in ISO 14525. White balance may be performed automatically if the software and optical system support it, or manually using the RGB channel histogram. The goal is to overlap the histogram peaks of the three channels as much as possible. For this work, white balance was performed manually, ensuring that the peaks corresponding to the bright zone overlap across the three RGB channels. This signal distribution can be seen in Figure 3.5.

The MTF measurement is carried out following the steps outlined below:

1. The illumination is configured as shown in Figure 3.4. Ambient lighting must be reduced to a minimum. If necessary, a diffuser should be used to ensure the illumination is as homogeneous as possible and to avoid unwanted intensity patterns from the light source.

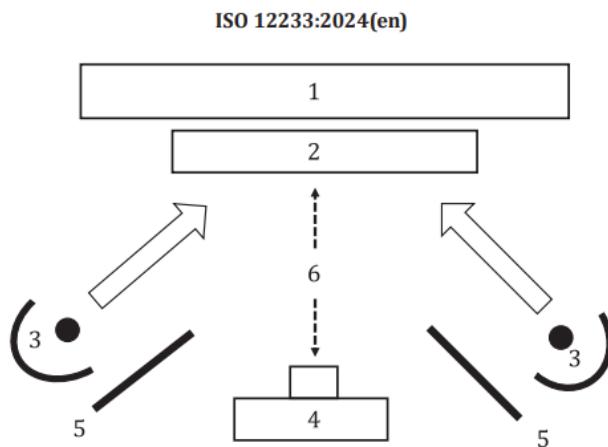


FIGURE 3.4: Optical setup recommended by ISO 12233:2024 for accurate MTF measurement. (1) matte black background, (2) test chart, (3) white illumination, (4) optical system under test, (5) barriers to prevent direct illumination of the optical system, (6) adjustable working distance.

2. The illumination is arranged such that the signal distribution delivered by the optical system is as homogeneous as possible. This implies that the captured image should show two well-defined peaks: one for the dark areas and another for the bright areas of the test pattern. Ideally, these peaks would be delta functions, indicating sharp transitions between intensity regions. In practice, secondary peaks should be minimized and the main peaks should be as narrow as possible. A homogeneous distribution ensures the optical system's response is measured under controlled conditions and the MTF analysis is not affected by

unwanted illumination variations. Figure 3.5 shows the distribution achieved for the region of interest shown in Figure 3.2a. Additionally, this distribution confirms that signal saturation is minimal in the region of interest.

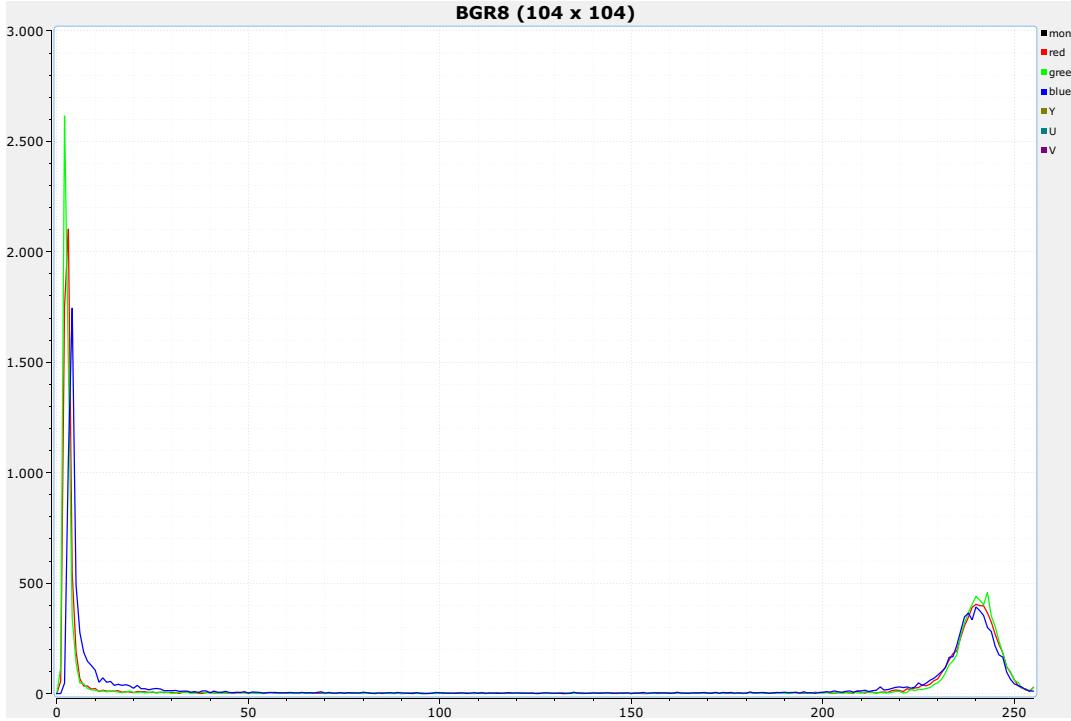


FIGURE 3.5: Signal distribution delivered by the optical system under the configured experimental illumination. Two main peaks are observed: one in the dark zone and another in the bright zone, with attenuated secondary peaks.

3. The optical system is positioned to properly frame the test chart. Vertical arrows help adjust magnification, while horizontal arrows assist in centering the image. The tips of the central black arrows should be fully visible, while the white arrows should be completely hidden. The horizontal edge of the chart should be aligned approximately parallel to the sensor's horizontal lines. The approximate distance between the camera and the test chart is recorded for later analysis. Figure 3.6 shows the arrows used for alignment.

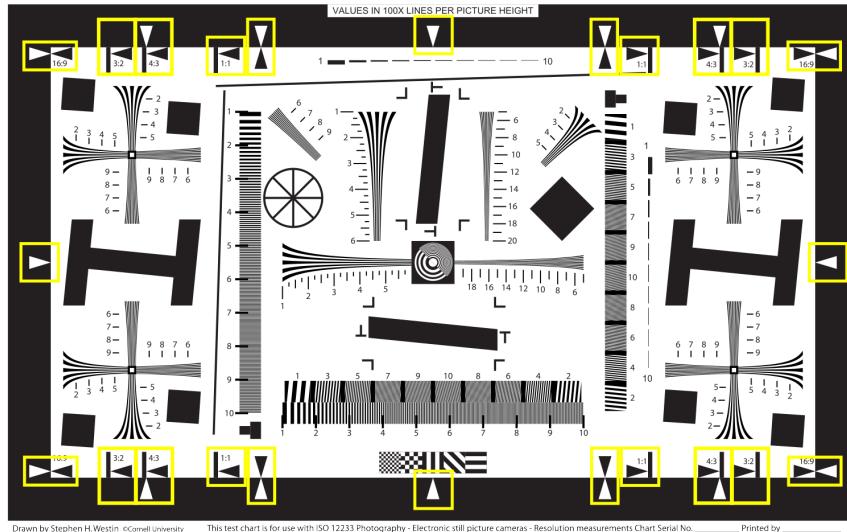


FIGURE 3.6: Standard chart used to measure the spatial frequency response of the optical system. The arrows used for framing and camera alignment are highlighted.

4. The chart is carefully rotated at an angle between 2° and 10° relative to the sensor's pixel rows or columns to ensure accuracy in the MTF determination. The chart shown in Figure 3.3 includes slanted edge patterns that meet this angular requirement.
5. 50 images of the slanted edge are captured and averaged to reduce temporal noise and improve statistical quality.
6. 50 dark images are also captured and averaged for sensor non-uniformity correction. This correction is detailed in Section 3.2.1.
7. The slanted edge image is corrected using the previously obtained average dark image.
8. A specific analysis region is selected within the corrected image, where the slanted edge is clearly distinguishable.
9. The exact angle of the slanted edge with respect to the sensor rows or columns is determined in order to properly normalize spatial frequency for MTF analysis.
10. The Edge Spread Function (ESF) is obtained by analyzing pixel intensity values across multiple rows or columns crossing the slanted edge.
11. To enhance method precision, oversampling is performed by combining multiple rows or columns (at least four) to generate a single, more accurate spatial function.
12. The ESF is numerically differentiated to generate the Line Spread Function (LSF).

13. Finally, the Fast Fourier Transform (FFT) is applied to the LSF to obtain the MTF:

$$\text{MTF}(f) = |\mathcal{F}\{\text{LSF}(x)\}(f)|, \quad (3.3)$$

where \mathcal{F} denotes the Fourier transform operation and f is the spatial frequency.

14. The resulting MTF curve is normalized to its maximum value at low frequencies and plotted against spatial frequency for analysis.

MTF processing is performed using the **SE_MTF** plugin from **ImageJ**. In this procedure, the image scale is configured in physical units (e.g., lp/mm) based on the actual sensor size and number of photodetectors. Once parameters are configured, the plugin extracts the Edge Spread Function (ESF) from the image edge and, through numerical differentiation, generates the Line Spread Function (LSF). Then, a Fast Fourier Transform (FFT) is applied to the LSF to obtain the Modulation Transfer Function (MTF).

Figure 3.7 shows the interface for configuring parameters. Based on the Region of Interest (ROI) and pixel size, it is possible to compute the required parameters for plugin configuration.

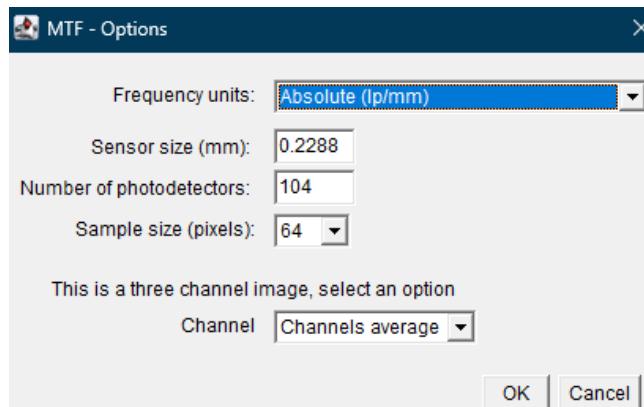


FIGURE 3.7: Configuration screen of the **SE_MTF** plugin in **ImageJ**. Setup for a Region of Interest of 104×104 pixels and a pixel size of $2.2 \mu\text{m}$.

Ground-Resolved Distance (GRD) Derived from the MTF

The Modulation Transfer Function provides a frequency-domain representation of the optical system's ability to reproduce scene detail. To translate the laboratory MTF into a practical “ground” resolution (often called the *ground-resolved distance*, GRD), the following procedure is applied¹.

¹The workflow follows the recommendations of ISO 12233 and common practice in remote-sensing optics **Boreman2001MTF**; **Holst2008Electro-Optical**.

1. Identify the cut-off spatial frequency in the image plane. From the measured MTF curve, the spatial frequency f_{im} (in line-pairs per millimetre, lp/mm) at which the modulation falls to 30 % is chosen as the *cut-off* frequency:

$$\text{MTF}(f_{\text{im}}) = 0.30. \quad (3.4)$$

2. Convert to object-space frequency. The primary lateral magnification² of the lens is

$$\text{PMAG} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{FOV}}. \quad (3.5)$$

The corresponding frequency in object space is therefore

$$f_{\text{obj}} = f_{\text{im}} \times \text{PMAG} \quad \left[\frac{\text{lp}}{\text{mm}} \right]. \quad (3.6)$$

3. Compute the linear ground-resolved distance. A line pair consists of one dark and one bright line; hence the minimum distinguishable physical period on the ground, expressed in micrometres, is

$$\Delta_{\text{ground}} = \frac{1}{2f_{\text{obj}}} \times \frac{1000 \mu\text{m}}{1 \text{ mm}}. \quad (3.7)$$

If a specific flight altitude (working distance) WD is assumed, the same result can be expressed directly in metres by multiplying Eq. (3.7) by the scale factor $\frac{\text{WD}}{\text{focal length}}$, yielding the *ground sample distance* (GSD).

4. Reporting. For every lens/sensor pair characterised in Section 3.1–3.1.1, Table 3.1 lists f_{im} at 30 % contrast, the computed f_{obj} , and the resulting Δ_{ground} for the three mission altitudes analysed (50 m, 1000 m, and 5000 m).

TABLE 3.1: Ground-resolved distance (GRD) derived from the 30 %-contrast MTF cut-off. Placeholder numbers are shown; replace them with the values measured for each optical system.

System	f_{im} [lp/mm]	f_{obj} [lp/mm]	GRD @50 m [cm]	GRD @1000 m [m]	GRD @5000 m [m]
VIS	-	-	-	-	-
NIR	-	-	-	-	-

²For object distances much larger than the focal length, the primary magnification PMAG is well approximated by $\text{PMAG} = \frac{\text{Horizontal Sensor Size}}{\text{FOV}}$; see Eq. (??).

3.1.2 Acquisition Settings for VIS and NIR Systems

The accuracy of resolution and MTF measurements largely depends on the optical system configuration during image capture. In this study, all configurations used for each system were recorded and reported. The following tables summarize the parameters used for the VIS system (visible spectrum camera) and for the NIR system (near-infrared camera):

Parameter	FOV		MTF	
	VIS	NIR	VIS	NIR
ExposureTime (ms)	18264.15	498463.3	2636.135	47487.15
Gain	0.0	24.1	0.0	0.0
Height (pixels)	1944	1944	104	104
Width (pixels)	2592	2592	104	104
OffsetX	0	0	1230	1200
OffsetY	0	0	920	900
Gamma	1.0	1.0	1.0	1.0
Hue	0.0	–	0.0	–
BalanceRatio_Red	1.307617	–	1.289063	–
BalanceRatio_Blue	1.957031	–	1.979004	–

TABLE 3.2: Acquisition Configuration for MTF and FOV Experiments (VIS and NIR)

Below is a brief description of each parameter used in the configuration:

- **ExposureTime:** Exposure time in milliseconds, determining how long the sensor collects light. Longer exposures increase the captured light but may cause saturation if not properly adjusted.
- **Gain:** Sensor gain factor, amplifying the generated electrical signal. A high gain may increase noise; hence, it is set to 0.0 to avoid unwanted amplification.
- **Gamma:** Gamma correction applied to the image, adjusting the linearity of the light response. A value of 1.0 ensures a linear response.
- **Height (pixels):** Image height in pixels. This parameter defines the vertical resolution and the area of interest.
- **Width (pixels):** Image width in pixels. Together with height, it defines the spatial resolution of the sensor.
- **OffsetX and OffsetY:** Horizontal (OffsetX) and vertical (OffsetY) displacements of the capture area over the sensor. These values help center or adjust the region of interest according to the position of the object or test chart.
- **Hue:** Hue adjustment in the image, used only in color cameras (VIS system). A value of 0.0 means no tonal adjustment is applied.

- **BalanceRatio_Red and BalanceRatio_Blue:** White balance ratios for the red and blue channels in color cameras. These coefficients are used to match the responses of each channel and ensure proper white balance. In this study, they were manually adjusted to overlap the peaks of the bright zone in the RGB histograms.

These settings are defined to ensure maximum signal without saturation and to avoid clipping in bright and dark areas, guaranteeing that the slanted-edge image is captured under controlled conditions. These parameters are recorded to allow for study replication and for detailed analysis of the optical system response under both low- and high-intensity conditions.

3.2 Spectral Characterization of Multispectral Cameras

Spectral characterization is a fundamental process for color calibration and accurate spectral estimation in multispectral cameras. This process is particularly relevant in applications such as remote sensing, precision agriculture, and environmental analysis, where precision in detecting different wavelengths determines the quality of the obtained data. For this characterization, two main calibration methods using a monochromator were employed: joint calibration of the entire system and separate calibration of its components.

3.2.1 Experimental Procedure in the Laboratory

This section details the laboratory procedure used for the spectral response characterization of various optical systems. The methodology includes the selection of the illumination source, validation of its spectrum, beam collimation, dark current correction of the minispectrometer, use of a set of filters and acrylic sheets, selection and combination of said filters, determination of the central wavelength, and measurement of optical power, followed by image capture with the optical system under test.

Selection and Validation of the Illumination Source

A tungsten lamp from ThorLabs, model OSL-2 **OSL2-Manual**, was selected as the main illumination source. This type of lamp emits radiation over a broad range, approximately from 400 nm to 1600 nm, which is suitable for covering both the visible and part of the near-infrared spectrum.

To ensure the spectral distribution of the lamp matched expectations, a minispectrometer from Newport (reference pending) was used to measure its output spectrum. Figure 3.8 shows an example of the measured spectral signal, expressed in *counts*, which is the standard output format of such spectrometers. These counts represent the relative intensity recorded by the spectrometer's sensor, but do not constitute an absolute radiometric quantity. Therefore, to obtain a fully calibrated measurement, these counts must be related to the optical power measured by an independent power meter.

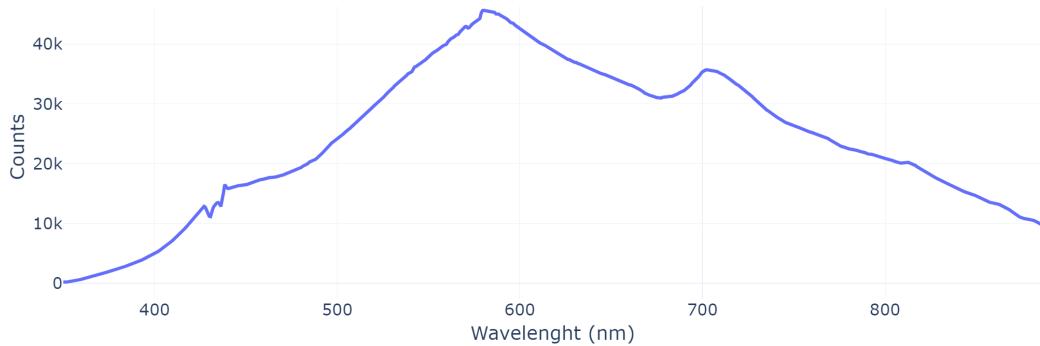


FIGURE 3.8: Example of the measured spectrum of the tungsten lamp (OSL-2) using the minispectrometer. The vertical axis is expressed in counts, which depend on the intrinsic response of the spectrometer.

Setup and Collimation of the Illumination Beam

The tungsten lamp mentioned includes a fiber optic coupling that allows directing the light toward various optical elements. The wavefront emerging from the fiber optic is *divergent*, so the optical power decreases significantly as the distance between the fiber output and the measurement plane increases. To work under controlled conditions and optimize power utilization, the light beam was **collimated** by mounting the fiber in a one-inch diameter lens tube.

1. **Selection of the collimating lens:** A plano-convex lens with a focal length of 25 mm was selected. Although a longer focal length would reduce divergence, in practice, using lenses with longer focal lengths limits the effective light collection area (especially when the source is not a point source), thus decreasing the total power available in the collimated beam. A 25 mm lens provides greater light collection, albeit at the cost of slightly more divergence.

2. Collimation method:

- Traditionally, collimation is achieved by measuring the spot size at various distances along the optical axis and adjusting the lens position to find the point where the beam shows a more constant diameter (or minimum divergence) along its propagation. However, this method was not used in this work due to:
 - (a) The lens used is spherical, and the beam coming from the fiber (an extended source) causes noticeable divergence, making it difficult to pinpoint the collimation position solely by observing the spot.
 - (b) The main goal is to ensure maximum usable optical power at the measurement plane, making it inefficient to characterize beam uniformity based only on spot size.
- Instead, an optical power meter is placed at a fixed distance from the collimating lens (see Figure 3.9).

- A 4 nm bandwidth filter centered at 633 nm is placed in the optical path to isolate a specific spectral range and reduce dispersive effects.
 - The distance between the fiber and the lens is varied around the nominal focal length (25 mm), *searching for the maximum optical power* measured at the detector. This point indicates minimum beam divergence near the measurement plane and maximum power collection.
3. **Final positioning:** Once the position that maximizes the detected power is found, the positions of the fiber and the lens are mechanically fixed. Additionally, the distance between the lens and the power meter is kept constant for subsequent measurements, ensuring consistent illumination conditions.

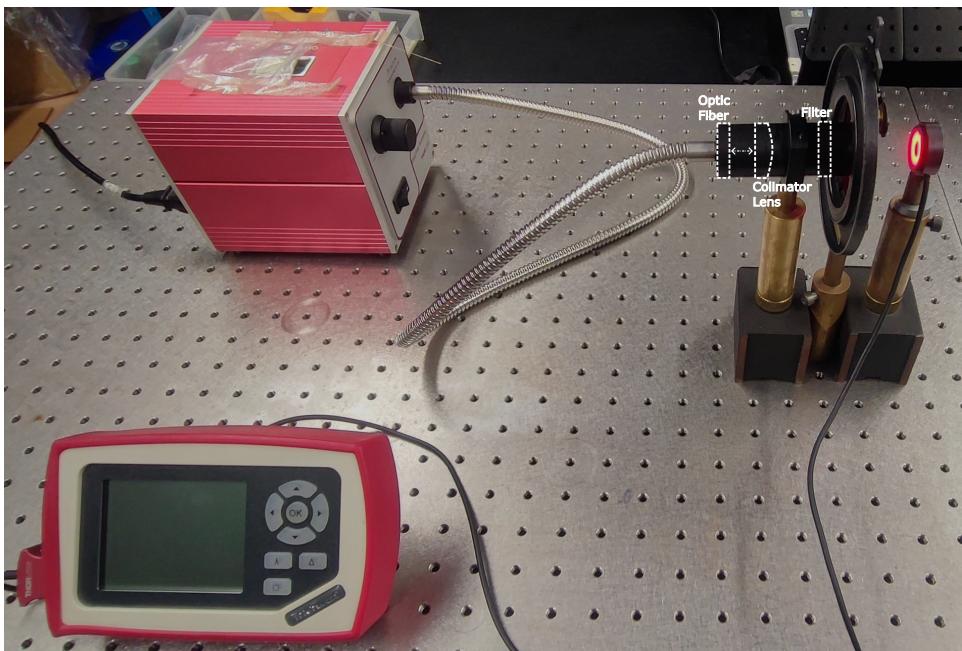


FIGURE 3.9: Setup for collimating the beam of the tungsten lamp with fiber optics. The adjustment of the distance between the fiber and the plano-convex lens aims to maximize the optical power measured by the detector.

Dark Current Correction in the Minispectrometer

The minispectrometer used to validate the light source spectrum and measure the transmissions of different filters records a base signal even without illumination, known as *dark current* or *electronic noise*. To improve the accuracy of spectral measurements, the following procedure was applied:

- A reference measurement was taken under **total absence of light** (fiber and input blocked). This signal is denoted by **D** and corresponds to the electronic noise level.

- For any measured spectrum \mathbf{S} (e.g., the spectrum of the tungsten lamp or a specific filter), correction is applied by subtracting \mathbf{D} :

$$\mathbf{S}_{\text{corr}} = \mathbf{S} - \mathbf{D}.$$

This attenuates the offset due to readout noise and provides a more reliable reading of the spectral distribution in *counts*.

Set of Filters and Acrylic Sheets

To discretize or modify the spectral distribution of the tungsten lamp, the following elements were used:

- **Nine high-quality optical filters** mountable in one-inch tubes. These filters are numbered from 0 to 6, with two additional filters labeled 532 and 633 (corresponding to their central wavelengths).
- **Eight acrylic sheets** of different colors, each 2 x 2 inches, mountable in an optical slide holder.

Figure 3.10 shows the filters and acrylic sheets with their respective labels. The transmitted spectrum of each element was measured (using the tungsten lamp as the illumination source) with the minispectrometer. These measurements were corrected for dark current as described in Section 3.2.1.

Measurement of Transmission Spectra

The transmission spectra of each filter and acrylic sheet are measured to determine their effective spectral transmission. Figure 3.11 shows the optical setup used to measure the transmission spectrum.

- For the **illumination**, the base spectrum \mathbf{I} is obtained (dark-current corrected).
- For each **filter or sheet**, the transmitted spectrum \mathbf{T}_j is measured, also corrected for dark current.

The recorded spectra are shown in Figure 3.12. Then, the dimensionless relative spectral response for each element is calculated by dividing \mathbf{T}_j by \mathbf{I} . The justification lies in the fact that, in linear systems, the transmission is modeled as a multiplication of the source spectrum by the spectral transfer function of the element (filter or sheet):

$$\mathbf{T}_j = \mathbf{I} \times \beta_j(\lambda),$$

$$\frac{\mathbf{T}_j}{\mathbf{I}} = \beta_j(\lambda).$$

Thus, the curve $\beta_j(\lambda)$ represents the **effective spectral transmittance** of the filter or sheet (see Figure 3.13).



(A) Set of acrylic sheets used. Each is individually labeled based on its apparent color.



(B) Set of filters used. Filters are numbered 0 to 6, with two additional filters labeled 532 and 633.

FIGURE 3.10: Acrylic sheets and filters used in the experiment.

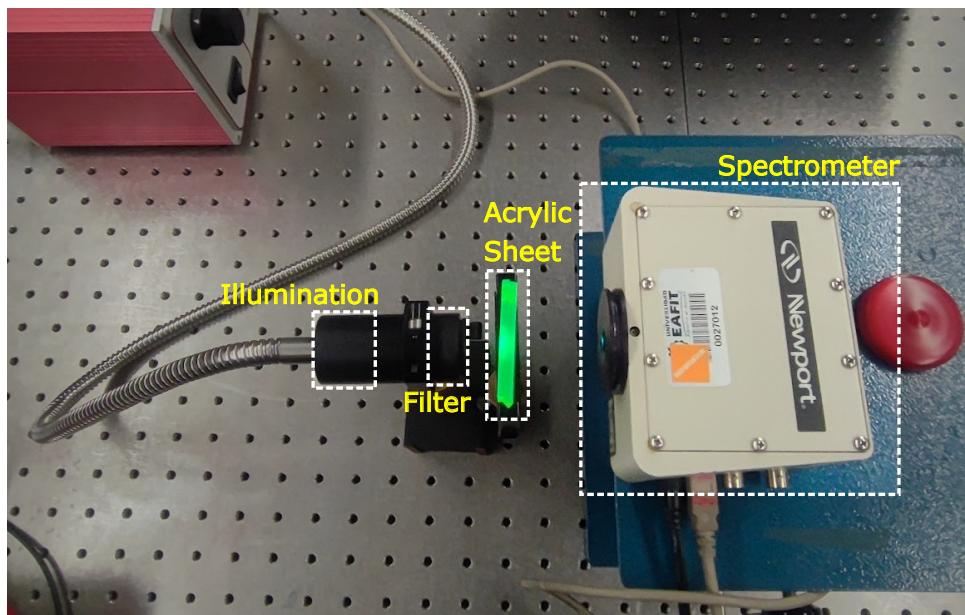


FIGURE 3.11: Setup for measuring the transmission spectrum of filters and acrylic sheets.

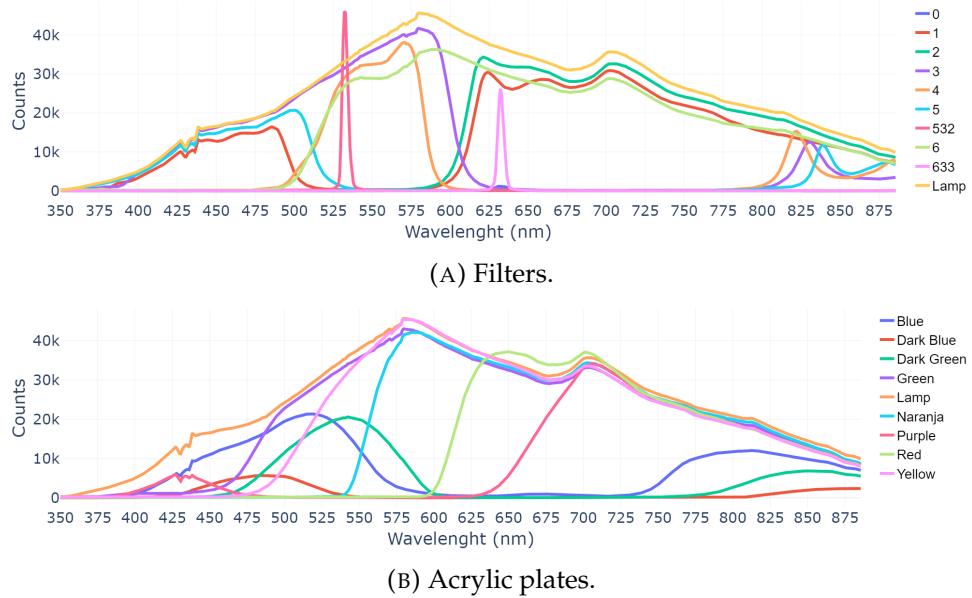


FIGURE 3.12: Measured spectra (in counts) of tungsten light transmitted through various filters (A) and acrylic plates (B). The vertical axis shows the relative intensity recorded by the minispectrometer in counts.

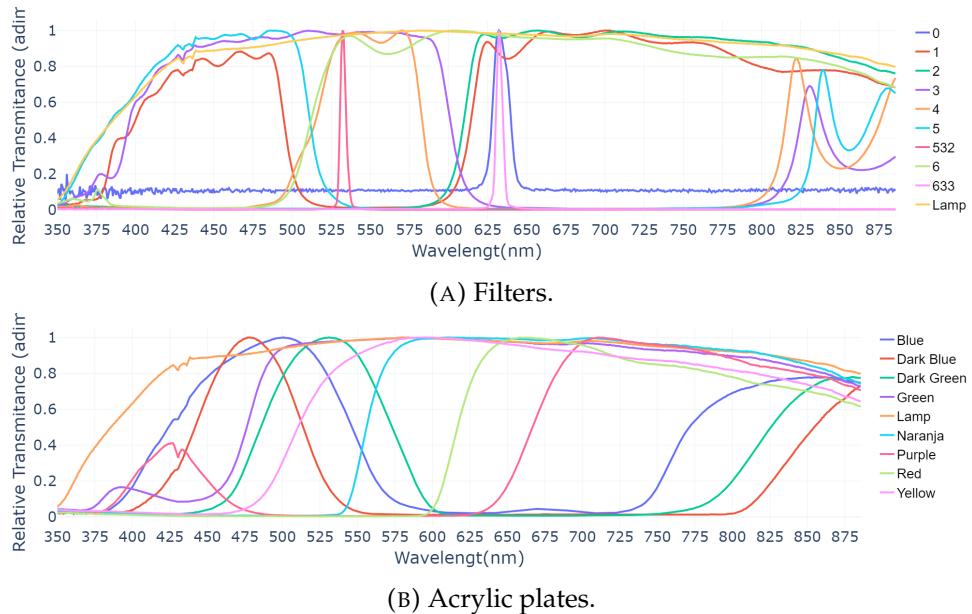


FIGURE 3.13: Normalized dimensionless spectral response (transmittance) obtained by dividing each filtered spectrum by the tungsten lamp spectrum.

Generación y selección de combinaciones de filtros

Generation and Selection of Filter Combinations

Given that the filters have relatively wide bandwidths (many exceeding 100 nm), this work evaluates the possibility of combining up to three filters to

obtain more selective transmission curves. A Python script is developed that:

1. Lists all possible combinations of:
 - Individual filters and/or acrylic sheets,
 - Pairs of filters/sheets,
 - Triplets of filters/sheets.
2. For each combination, calculates the *composite transmission curve* $\beta_{\text{comp}}(\lambda)$, which is the **product** of the individual transmissions as a function of wavelength.
3. Generates a total of 987 combinations (including single, double, and triple combinations).

Ideal Transmission Curves. To guide the selection process, 10 target curves are defined, modeled as Gaussian functions with a standard deviation of 3 nm:

- Seven curves centered in the visible spectrum: 400, 450, 500, 550, 600, 650, and 700 nm.
- Three curves for the near-infrared (NIR): 825, 850, and 875 nm.

Each $\beta_{\text{ideal}}(\lambda)$ adopts the form:

$$\beta_{\text{ideal}}(\lambda) = \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2} \right],$$

where λ_0 is the central wavelength and $\sigma = 3$ nm. Figure 3.14 illustrates the ideal profiles used.

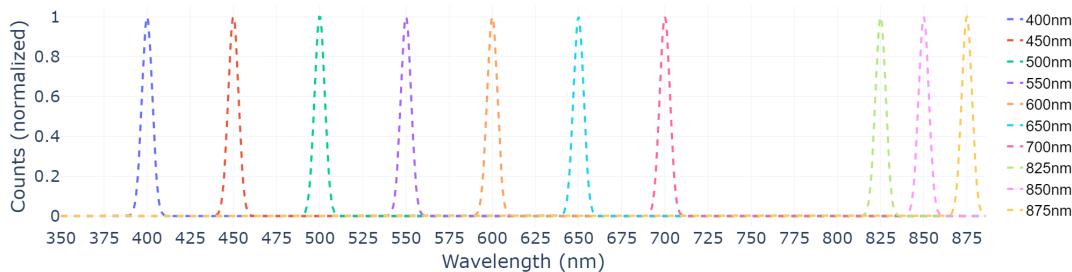


FIGURE 3.14: Ideal transmission curves for selecting filter combinations. This example shows 10 Gaussians centered at 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 825, 850, and 875 nm, respectively.

Selection Metric. To determine which filter combination best matches the defined ideal curves, the Pearson correlation coefficient is used. Given an ideal curve $\beta_{\text{ideal}}(\lambda)$ and a composite curve $\beta_{\text{comp}}(\lambda)$, both discretized in N spectral points, the Pearson correlation coefficient r is defined as:

$$r(\beta_{\text{ideal}}, \beta_{\text{comp}}) = \frac{\sum_{i=1}^N [\beta_{\text{ideal}}(\lambda_i) - \bar{\beta}_{\text{ideal}}] [\beta_{\text{comp}}(\lambda_i) - \bar{\beta}_{\text{comp}}]}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N [\beta_{\text{ideal}}(\lambda_i) - \bar{\beta}_{\text{ideal}}]^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N [\beta_{\text{comp}}(\lambda_i) - \bar{\beta}_{\text{comp}}]^2 \right)}} \quad (3.8)$$

where:

- $\beta_{\text{ideal}}(\lambda_i)$ is the ideal transmission at wavelength λ_i ,
- $\beta_{\text{comp}}(\lambda_i)$ is the composite transmission of the filter combination at λ_i ,
- $\bar{\beta}_{\text{ideal}}$ and $\bar{\beta}_{\text{comp}}$ are the mean values of each curve across the evaluated range.

The Pearson coefficient ranges from $[-1, 1]$. A value close to 1 indicates high similarity in shape and relative distribution; values near 0 or negative indicate low similarity. Therefore, the combination with the highest r is selected as the “optimal” match for a given target curve.

Selection Procedure:

1. For each ideal curve $\beta_{\text{ideal}}(\lambda)$, all composite curves $\beta_{\text{comp}}(\lambda)$ are evaluated.
2. $r(\beta_{\text{ideal}}, \beta_{\text{comp}})$ is computed over the same wavelength range.
3. The combination that maximizes r is selected.

This method allows identifying the filter combination that best approximates a desired spectral shape. For each central wavelength (e.g., 400, 450, 500, ..., 700, 825, 850, and 875 nm), an “optimal” combination is thus obtained. Figure 3.15 shows an example of the best-matching filter combinations overlaid on their corresponding ideal curves.

Additionally, some combinations are selected experimentally, since the correlation-based method does not consider absolute transmittance. It is possible that the combination with the highest correlation r has very low transmittance, limiting its practical utility. Also, individual filters such as those centered at 532 and 633 nm show good spectral performance. By combining the maximum correlation criterion with experimental validation, the final set of filters used for spectral characterization is selected.

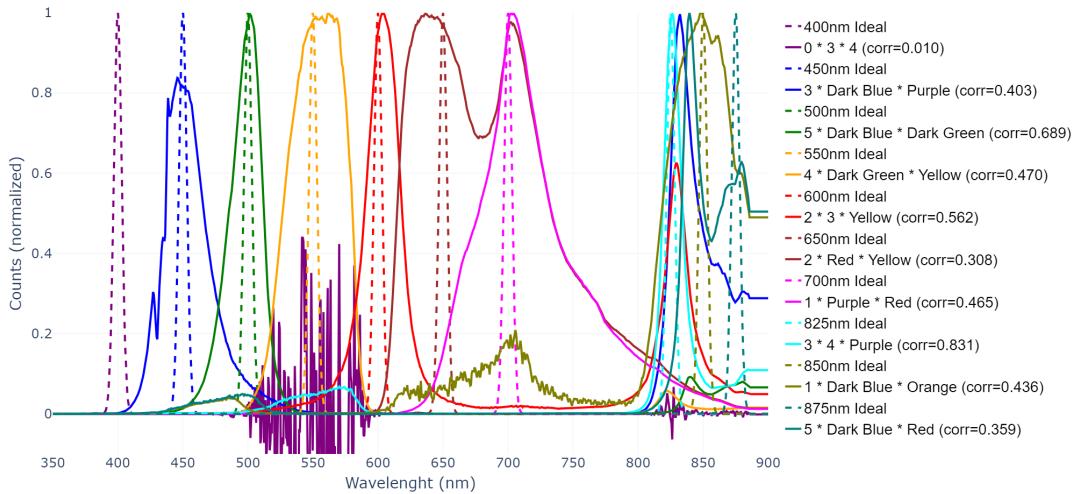


FIGURE 3.15: Filter combinations (solid lines) with the highest correlation to their corresponding ideal curves (dashed lines). The shape and peak position of the selected combinations match the target profiles.

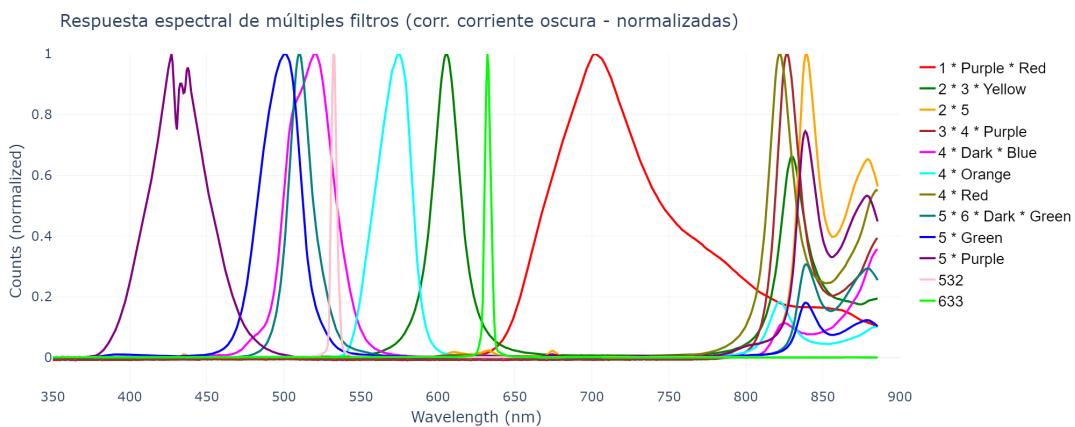


FIGURE 3.16: Final filter selection used for spectral characterization of the optical systems. Includes both experimentally selected configurations and individual filters (532 and 633 nm) showing good correlation and transmittance.

Determination of Central Wavelength, Bandwidth, and Optical Power of Selected Combinations

After defining the optimal combinations, the actual transmission spectra are measured using the minispectrometer to verify the effective central wavelength, resulting bandwidth, and transmitted optical power. This is essential to:

1. Properly configure the optical power meter (which requires the central wavelength of the incoming radiation).
2. Verify that the actual transmission curves are consistent with the numerically determined ones.

The optical power transmitted by each selected combination is then measured using a power meter. To maintain consistency across measurements:

- The tungsten lamp operates at its **maximum irradiance capacity**.
- For each combination, the power is measured at the previously determined central wavelength λ_0 .

The lowest power value among all combinations is used as the reference. This ensures that subsequent optical system measurements are performed under the same irradiance conditions, using neutral density filters to reduce irradiance in cases where power exceeds this reference.

The bandwidth of the measured spectra for each selected filter is also calculated. Each spectrum is first normalized to have a maximum value of 1. The bandwidth is defined as the spectral interval where the signal reaches at least 50% of its maximum value (i.e., the Full Width at Half Maximum, FWHM). For filters with multiple peaks, the main peak of interest is selected, usually corresponding to the expected region (e.g., NIR).

A Python script is developed that:

1. Identifies the maximum peak of each normalized spectrum.
2. Determines the wavelengths λ_{left} and λ_{right} where the spectral response falls to 50% of the maximum.
3. Calculates the bandwidth as:

$$\text{FWHM} = \lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}.$$

Figure 3.17 shows the central wavelength and FWHM of the selected filters, obtained through the described procedure. These parameters are key to assessing the system's ability to discriminate spectral bands and for configuring the power meter accurately.

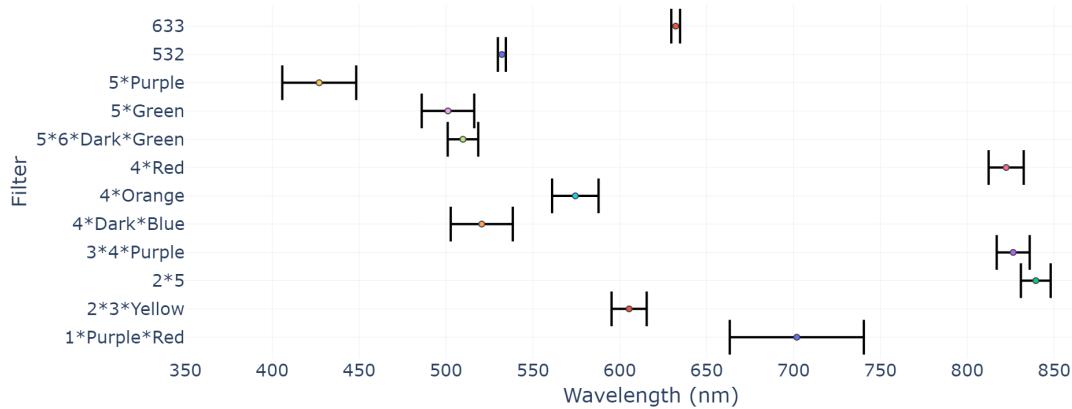


FIGURE 3.17: Example of a normalized spectrum of a selected filter. The central wavelength and bandwidth (FWHM) are indicated, defined as the spectral range where the signal reaches 50% of its maximum value.

Image Capture with the Optical System Under Test

Once the filter combinations are defined and the optical power is adjusted, the characterization of the target optical systems (e.g., an RGB system and/or a monochannel NIR system) is performed. The procedure is as follows:

1. Camera or sensor configuration:

- *Gain*: Set to 1 for all measurements to avoid scaling differences between captures.
- *Gamma*: Set to 1 (linear) to suppress any internal nonlinearity curves.
- *White balance*: In RGB cameras, the red and blue coefficients are set to 1, and the green channel is also set to 1 (if allowed by the firmware). This ensures that the camera does not apply color corrections.

2. Use of neutral density filters (optional):

If the power exceeds the reference level, a neutral density filter is inserted into the lens tube after collimation. This ensures the same final power for all combinations.

3. Exposure time adjustment:

The exposure time is set to avoid image saturation. This value is recorded, since the system's response is **linearly proportional** to the integration time (see Equation ??).

4. Data capture:

- For each selected filter combination, 50 consecutive images of the optical system are acquired and saved in an uncompressed or minimally processed format. In this case, the format used is .npy.
- Additionally, 50 dark current images are taken by completely covering the objective.

5. Noise correction and averaging:

- The average of the 50 dark current images is calculated, resulting in an image \mathbf{D}_{prom} that represents the system's electronic offset.
- Each of the 50 illuminated captures is corrected by subtracting \mathbf{D}_{prom} , thereby eliminating the dark current contribution.
- The 50 corrected images are then averaged, generating a single image \mathbf{I}_{filt} for each filter combination.

6. Spectral response calculation:

- For each averaged image (\mathbf{I}_{filt}), a *response* metric is defined as the sum of all pixel values within the region of interest. In the case of an RGB camera, this sum can be calculated per channel (R, G, or B), or by converting the image to grayscale.
- In a monochromatic or NIR camera, the single available channel is used.
- The resulting value represents the system's total response to the corresponding filter combination, associated with the calculated λ_0 .

This process is repeated for each selected filter/sheet combination, generating a discrete spectral response map of the optical system, which relates the central wavelength to the response (as grayscale level sum or per channel).

3.3 Main contributions

3.3.1 Resultados de la caracterización del campo de visión (FOV)

Para validar el campo de visión de los sistemas ópticos seleccionados (Sistema 7 VIS y Sistema 6 NIR), se realizaron mediciones de FOV horizontal (H) y vertical (V) a tres distancias de trabajo (WD) empleando la carta de prueba ISO 12233. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

La Figura 3.18 muestra las 12 capturas originales (3 filas \times 4 columnas) utilizadas para determinar experimentalmente el FOV. Cada fila corresponde a una distancia de trabajo distinta; las dos primeras columnas son las mediciones H y V de VIS (Sistema 7) y las dos últimas, las de NIR (Sistema 6).

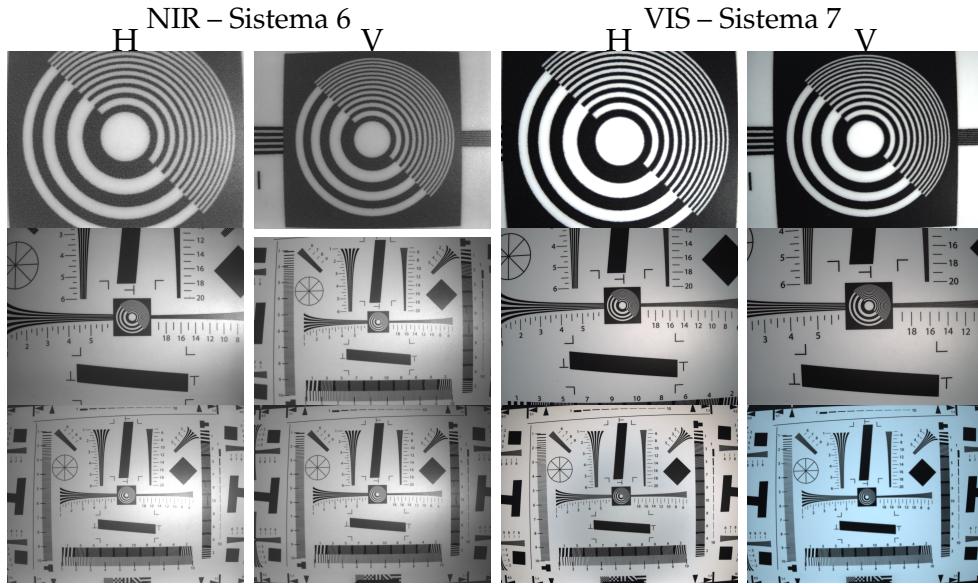


FIGURE 3.18: Imágenes originales para la medición del FOV horizontal (H) y vertical (V) en tres distancias de trabajo.

Las mediciones, convertidas a metros, se resumen en la Tabla 3.3, donde cada FOV se acompaña de una incertidumbre instrumental $\sigma = 1 \text{ mm}$.

TABLE 3.3: WD y FOV medidos para cada sistema óptico y orientación

Prueba	NIR (Sis. 6)				VIS (Sis. 7)			
	WD _H [m]	FOV _H [m]	WD _V [m]	FOV _V [m]	WD _H [m]	FOV _H [m]	WD _V [m]	FOV _V [m]
1	0.071	0.0350	0.087	0.0350	0.092	0.0350	0.107	0.0350
2	0.331	0.231	0.350	0.180	0.379	0.239	0.303	0.138
3	0.650	0.468	0.650	0.349	0.694	0.458	0.700	0.342

Aplicando regresión lineal ponderada (Deming) con pesos $w = 1/\sigma$, los ajustes óptimos fueron:

$$\begin{aligned} \text{VIS: } \text{FOV}_H &= (0.7025 \pm 0.0045) \text{ WD} - (0.0288 \pm 0.0021), \\ \text{VIS: } \text{FOV}_V &= (0.5171 \pm 0.0029) \text{ WD} - (0.0197 \pm 0.0013), \\ \text{NIR: } \text{FOV}_H &= (0.7477 \pm 0.0031) \text{ WD} - (0.0175 \pm 0.0013), \\ \text{NIR: } \text{FOV}_V &= (0.5579 \pm 0.0034) \text{ WD} - (0.0141 \pm 0.0015). \end{aligned}$$

La Figura 3.19 ilustra los ajustes con sus bandas de confianza 1σ .

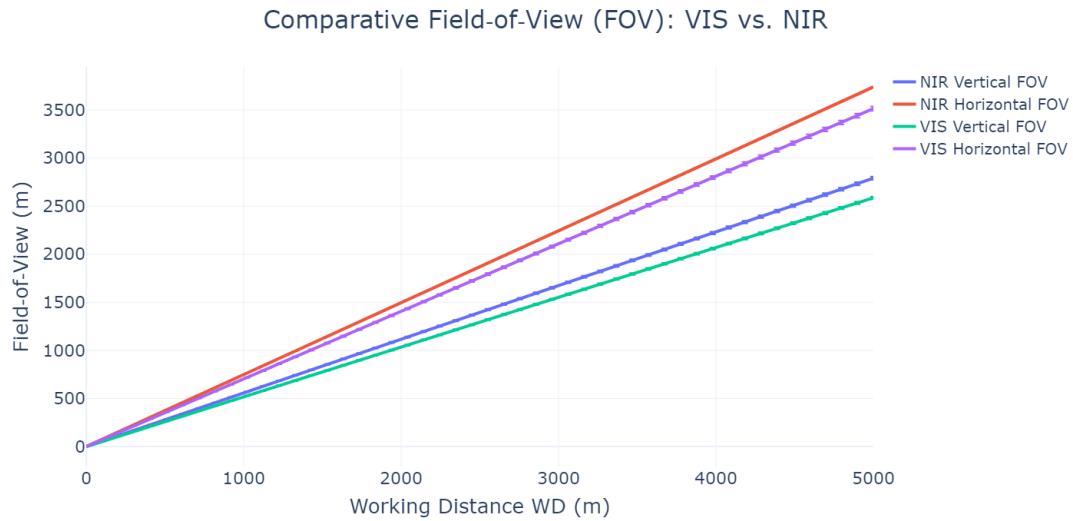


FIGURE 3.19: Ajuste lineal ponderado de FOV vs. WD para los cuatro casos: VIS–H, VIS–V, NIR–H y NIR–V .

La Tabla ?? compara el FOV horizontal predicho por los ajustes empíricos con los valores teóricos calculados en la Sección ?? para alturas de 50 m, 1000 m y 5000 m.

TABLE 3.4: Comparativa empírico vs. teórico para FOV horizontal (H) y vertical (V).

	VIS (Sis. 7)				NIR (Sis. 6)			
	Altura	Pred H (m)	Teo H (m)	Pred V (m)	Teo V (m)	Pred H (m)	Teo H (m)	Pred V (m)
50 m	35.10	33.54	25.84	25.16	37.37	35.64	27.88	26.73
1000 m	702.50	670.87	517.08	503.15	747.70	712.8	557.90	534.6
5000 m	3512.00	3354.35	2585.48	2515.76	3737.00	3564	2788.89	2673

Con estos resultados, se puedes definir las discrepancias como:

$$\Delta_{\text{abs}} = \text{FOV}_{\text{pred}} - \text{FOV}_{\text{teo}}, \quad \Delta_{\text{rel}} = \frac{\Delta_{\text{abs}}}{\text{FOV}_{\text{teo}}} \times 100\%.$$

A continuación se presentan los resultados para cada altura y sistema:

$$50 \text{ m} : \Delta_{\text{abs}}^{\text{VIS}} = 35.10 - 33.54 = 1.56 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{VIS}} = \frac{1.56}{33.54} \times 100\% \approx 4.65\%,$$

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{NIR}} = 37.37 - 35.64 = 1.73 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{NIR}} = \frac{1.73}{35.64} \times 100\% \approx 4.85\%.$$

$$1000 \text{ m} : \Delta_{\text{abs}}^{\text{VIS}} = 702.5 - 670.9 = 31.6 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{VIS}} = \frac{31.6}{670.9} \times 100\% \approx 4.71\%,$$

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{NIR}} = 747.7 - 712.8 = 34.9 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{NIR}} = \frac{34.9}{712.8} \times 100\% \approx 4.90\%.$$

$$5000 \text{ m} : \Delta_{\text{abs}}^{\text{VIS}} = 3512 - 3354 = 158 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{VIS}} = \frac{158}{3354} \times 100\% \approx 4.71\%,$$

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{NIR}} = 3737 - 3564 = 173 \text{ m}, \quad \Delta_{\text{rel}}^{\text{NIR}} = \frac{173}{3564} \times 100\% \approx 4.86\%.$$

Los resultados confirman que, en ambos sistemas, la discrepancia relativa se mantiene entre un 4.6–4.9 % independientemente de la altura de operación. Este sesgo prácticamente constante refuerza la hipótesis de un error geométrico sistemático (distorsión radial y paralaje en la medida de WD) que debe corregirse antes de la generación de ortomosaicos.

3.3.2 Caracterización angular: AFOV vs. WD

Las figuras 3.20 presentan dos curvas para cada sistema: horizontal y vertical. En el caso VIS, el AFOV crece hacia el valor teórico sin sobrepasarlo; en NIR, el experimento supera ligeramente el teórico a medida que WD aumenta, sugiriendo un enfoque ligeramente desajustado.

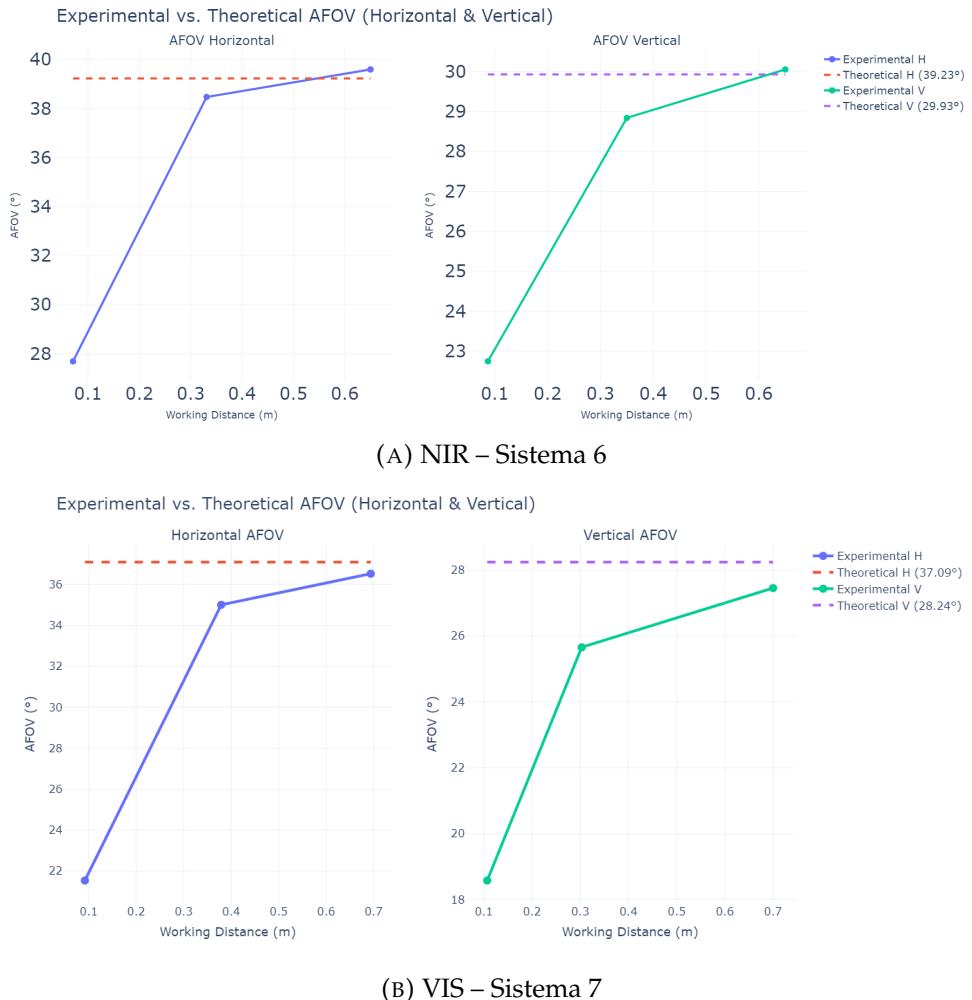


FIGURE 3.20: AFOV experimental vs. WD (flecha punteada: valor teórico).

Para cuantificar la convergencia, en la Tabla 3.5 se resumen los valores experimentales de AFOV en los tres WD medidos. A la mayor distancia, la discrepancia horizontal con el valor teórico (37.1° para VIS y 39.3° para NIR) es:

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{VIS-H}} = 36.52^\circ - 37.10^\circ = -0.58^\circ \quad (\Delta_{\text{rel}} \approx 1.6\%),$$

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{NIR-H}} = 39.60^\circ - 39.30^\circ = +0.30^\circ \quad (\Delta_{\text{rel}} \approx 0.8\%).$$

Verticalmente, comparando con el valor teórico de 28.24° , para WD máximo:

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{VIS-V}} = 27.46^\circ - 28.24^\circ = -0.78^\circ \quad (\Delta_{\text{rel}} \approx 2.8\%),$$

$$\Delta_{\text{abs}}^{\text{NIR-V}} = 30.05^\circ - 28.24^\circ = +1.81^\circ \quad (\Delta_{\text{rel}} \approx 6.4\%).$$

TABLE 3.5: AFOV experimental para WD de 0.07–0.09 m, 0.30–0.38 m y 0.65–0.70 m.

Sistema	WD [m]	AFOV _H [°]	AFOV _V [°]
VIS (Sistema 7)	0.09	21.54	18.58
	0.38	35.00	25.66
	0.69	36.52	27.46
NIR (Sistema 6)	0.07	27.69	22.75
	0.33	38.47	28.84
	0.65	39.60	30.05

3.3.3 Magnificación primaria (PMAG) de los sistemas 6 (NIR) y 7 (VIS)

Por otro lado, a partir de la ecuación 3.5, se obtuvó la magnificación primaria para ambos sistemas NIR y VIS para cada valor de altitud, como se muestra en la Tabla ??.

TABLE 3.6: Magnificación primaria (PMAG) de los sistemas VIS (Sis. 7) y NIR (Sis. 6) a distintas alturas.

Altura [m]	PMAG VIS (Sis. 7)	PMAG NIR (Sis. 6)
50	1.62×10^{-4}	1.53×10^{-4}
1000	8.12×10^{-6}	7.63×10^{-6}
5000	1.62×10^{-6}	1.53×10^{-6}

Para el rango operacional propuesto (50–5000 m) las diferencias entre ambos sistemas son < 6 %, consecuencia de que comparten el mismo tamaño de sensor y distancias focales muy próximas (8.0 mm – NIR, 8.5 mm – VIS).

3.3.4 Modulation Transfer Function (MTF) Measurements

Aunque el montaje experimental para la caracterización de la MTF se describió en la metodología (véase la Figura 3.4), durante las primeras pruebas se constató que el contraste entre las zonas claras y oscuras resultaba insuficiente para aplicar con fiabilidad el método ISO 12233. Según este estándar, el test chart debe presentar un contraste mínimo de 4:1 y una distribución de irradiancia lo más uniforme posible en ambas regiones, de modo que el histograma de intensidad exhiba dos picos nítidos (uno correspondiente a las zonas claras y otro a las zonas oscuras). Sin embargo, al analizar la carta de prueba impresa en papel mate —una reprografía de bajo costo— se observó una continuidad de valores intermedios y múltiples picos espurios que comprometían la extracción precisa de la Edge Spread Function (ESF). Esta carta de ruebas puede ser adquirida por proveedores de instrumentos ópticos, pero su costo es elevado.

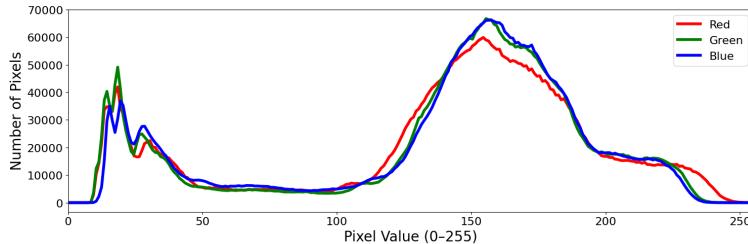


FIGURE 3.21: Histograma de la carta de prueba ISO 12233 impresa en papel mate. Se aprecian tres picos en la región oscura y dos picos muy anchos en la región clara, reflejo de una alta desviación estándar y de un contraste inferior al requerido por la norma.

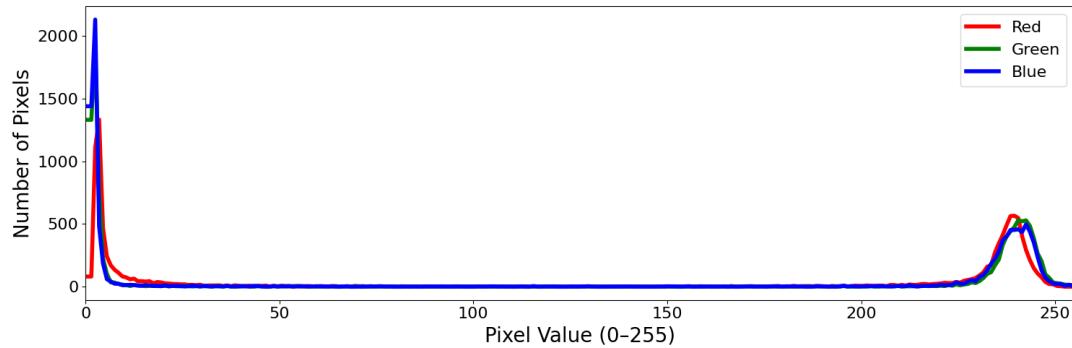
El origen de esta dispersión radica en dos factores principales. Primero, la calidad de impresión (impreso en una impresora de un proveedor local no especializado en cartas para pruebas ópticas de laboratorio) del test chart no garantizaba bordes suficientemente definidos ni un nivel de negros que proporcionaran el suficiente contraste ni precisión en la impresión de líneas. Segundo, el esquema de iluminación no siguió estrictamente la recomendación de emplear dos fuentes homogéneas (véase la Figura 3.4), lo cual impidió alcanzar una irradiancia uniforme sobre la carta y acentuó las zonas de sombra y reflejo. Ante ello, se optó por un patrón de prueba empírico, el cual consistía en una hoja de papel inclinada y un fondo oscuro, y por limitar la región de interés a un área de 104×104 píxeles, de forma que la iluminación pudiera controlarse de manera más rigurosa.

La imagen finalmente utilizada para la determinación de la MTF —mostrada en la Figura 3.2a— fue corregida previamente, en primer lugar, de la corriente oscura según se describe en la Sección 3.2.1, y, en segundo lugar, de los errores aleatorios mediante el promediado de múltiples capturas (tal como se detalló en la metodología de MTF). Sobre estas imágenes corregidas se generaron histogramas de intensidad para cada sistema, a fin de verificar que ahora sí se obtenía una distribución bimodal aceptable.

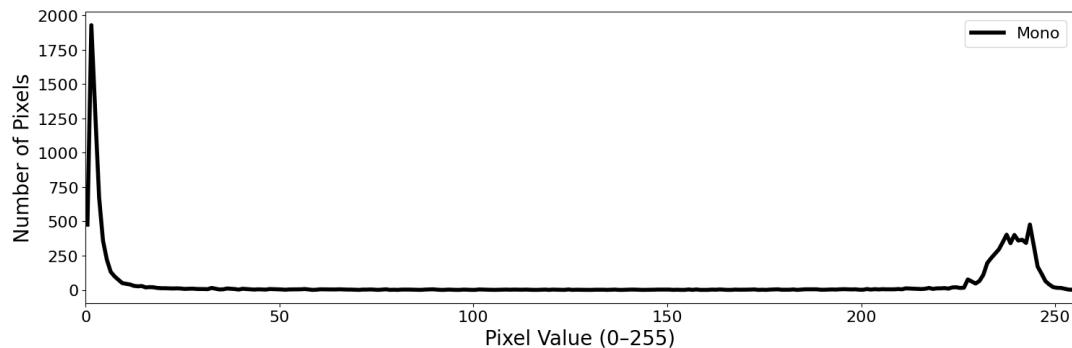
Con estas condiciones mejoradas se pudo proceder a extraer la ESF y, posteriormente, la Line Spread Function (LSF) y su transformada de Fourier para obtener las curvas de MTF de ambos sistemas. Este rigor en la corrección y control de iluminación garantiza que las mediciones resultantes reflejen fielmente la capacidad de resolución de los ópticos evaluados.

MTF Curves for VIS and NIR Systems

Las curvas MTF se obtuvieron con el plugin SE_MTF de *ImageJ* siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.1.1. Para el sistema VIS (Sistema 7) se procesaron independientemente los tres canales *R*, *G* y *B* y, adicionalmente, la imagen promedio (*Mono*). Para el sistema NIR (Sistema 6) únicamente se dispone de un canal monocromático.

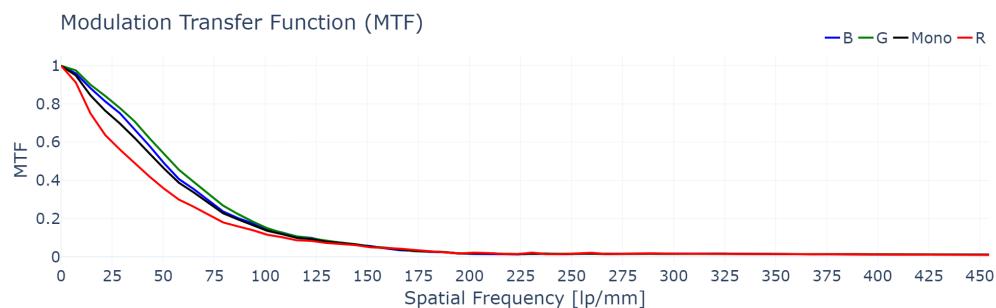


(A) Sistema VIS: histogramas de los canales R, G y B después de correcciones.

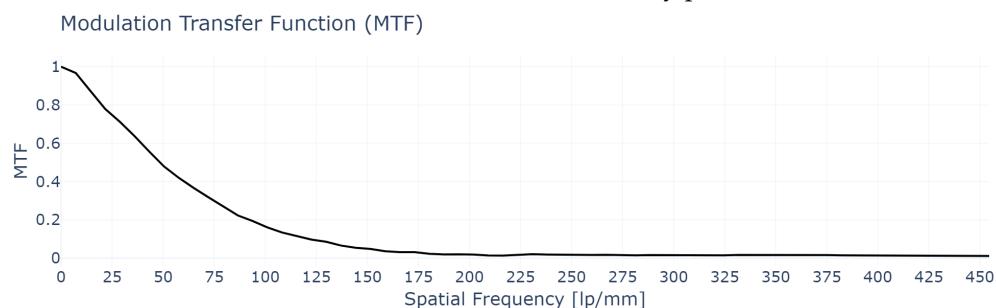


(B) Sistema NIR: histograma de su único canal tras correcciones.

FIGURE 3.22: Distribución de valores de intensidad en imágenes corregidas (corriente oscura y ruido aleatorio) para los sistemas VIS y NIR, empleadas en la extracción de la MTF.



(A) Sistema VIS: MTF de los canales R, G, B y promedio (Mono).



(B) Sistema NIR: MTF del canal monocromático.

FIGURE 3.23: Curvas MTF obtenidas con *ImageJ*. La configuración del plugin se muestra en la Fig. 3.7. Esta medida fue tomada con una distancia de trabajo de 925 mm.

Los puntos donde la modulación cae al 30 % proporcionan la frecuencia de corte f_{im} . La Tabla 3.7 resume estos valores y los compara con las especificaciones teóricas (Tabla 1.2).

TABLE 3.7: Frecuencia de corte a 30 % de contraste: mediciones frente a especificación.

Sistema / Canal	$f_{\text{im, meas}} [\text{lp mm}^{-1}]$	$f_{\text{im, theo}} [\text{lp mm}^{-1}]$	$\Delta [\%]$
VIS – R	57.72	85	-32.1
VIS – G	79.36	85	-6.6
VIS – B	72.15	85	-15.1
VIS – Mono	72.15	85	-15.1
NIR – Mono	79.36	120	-33.9

Cut-off Frequency and Ground Resolution Calculation

La resolución en tierra (Δ_{ground}) se obtuvo aplicando los pasos 1–3 de la sección 3.1.1. Para cada canal se parte del $f_{\text{im, meas}}$ de la Tabla 3.7; se calcula la frecuencia en el objeto f_{obj} y, posteriormente, Δ_{ground} . Los parámetros geométricos (PMAG y FOV) provienen de la Tabla 1.4; las distancias focales son $f_{\text{VIS}} = 8.5 \text{ mm}$ y $f_{\text{NIR}} = 8.0 \text{ mm}$.

TABLE 3.8: Resolución en tierra Δ_{ground} – Sistema VIS (Sis. 7)

Canal	$\Delta_{\text{ground}} [\text{cm}]$			$\Delta_{\text{ground}} [\text{m}]$ 5000 m
	50 m	1000 m	5000 m	
R	5.35	106.68	534.72	5.35
G	3.89	77.59	388.91	3.89
B	4.28	85.34	427.78	4.28
Mono	4.28	85.34	427.78	4.28

TABLE 3.9: Resolución en tierra Δ_{ground} – Sistema NIR (Sis. 6)

Canal	$\Delta_{\text{ground}} [\text{cm}]$			$\Delta_{\text{ground}} [\text{m}]$ 5000 m
	50 m	1000 m	5000 m	
Mono	4.12	82.57	411.79	4.12

Comparison with Theoretical Resolution

La Figura ?? contrasta la resolución teórica ($\Delta_{\text{ground, theo}}$, Tabla 1.4) con la experimental para los cortes a 30 %. Los valores experimentales del canal G (VIS) y del canal único (NIR) son los que más se aproximan a la especificación, con desviaciones absolutas inferiores a 6 mm a 50 m y relativas menores del 7 % en todas las altitudes.

Error Sources and Discrepancy Analysis

Las diferencias observadas entre la especificación y la medición se asocian a:

Distorsión radial El modelo de tamaño de imagen supone proyección pin-hole sin distorsión. Una distorsión barril del 1% desplaza la frecuencia de corte hasta un 3 %.

Paralaje en la medida de WD Un error sistemático de ± 1 cm en la distancia de trabajo introduce una incertidumbre del 2.4 % en PMAG y, por tanto, en f_{obj} .

Enfoque imperfecto Una desviación de solo $10 \mu\text{m}$ en la posición del plano focal puede reducir la MTF de alta frecuencia entre 5 y 8 %.

Ruido y cuantización Aunque se promediaron 50 imágenes y se corrigió la corriente oscura (Sección 3.2.1), el SNR limita la estimación de la ESF, añadiendo ≈ 2 % de dispersión a f_{im} .

Una calibración geométrica por cámara-patrón y la compensación de distorsión de lente deberían reducir el sesgo relativo por debajo del 3 %.

Summary of MTF Findings

En síntesis:

1. El sistema VIS cumple el requisito de $f_{\text{im}} \geq 40 \text{ lp mm}^{-1}$ en los tres canales; el canal G ofrece el mejor desempeño con 79.4 lp mm^{-1} .
2. El sistema NIR alcanza 79.4 lp mm^{-1} , un 34 % por debajo de la especificación, pero mantiene una resolución en tierra $< 3 \text{ cm}$ a 50 m, suficiente para la misión.
3. Las discrepancias con la teoría se deben, principalmente, a distorsión geométrica y a tolerancias de enfoque; ambas pueden mitigarse mediante calibración adicional.
4. Para mejorar la concordancia, se propone añadir una etapa de rectificación geométrica antes de la extracción de la ESF y repetir la medición con iluminación de mayor contraste (4:1 según ISO 12233).

3.3.5 Respuesta espectral

Curvas de sensibilidad

Linealidad y repetibilidad

3.4 Síntesis y comparación con los requisitos

3.5 Lecciones aprendidas y trabajo futuro

1 Parámetros geométricos, espetrales y radiativos de sistemas formadores de imagen

1.1 Spectral Response of RGB Color Cameras

In the process of acquiring color images using digital RGB cameras, each channel (red, green, and blue) responds to the incoming radiation according to its own *spectral sensitivity*. This response can be modeled linearly or may incorporate some additional nonlinearity, depending on the internal architecture of the camera and the electronic processing applied by the manufacturer Vora et al. 1997; Cheung, Westland, and Thomson 2004; Uttner, Bobey, and Schlichting 2006.

Linear Response Model

Let K be the number of channels of the camera (normally, $K = 3$, for the red, green, and blue channels). For a given channel i , the response of the camera r_i is defined as an integral (or discrete sum) of the incident spectral power, filtered by the spectral sensitivity $s_i(\lambda)$, during an integration time t_{integ} Vora et al. 1997; Uttner, Bobey, and Schlichting 2006:

$$r_i = t_{\text{integ}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_i(\lambda) I(\lambda) d\lambda + n_i, \quad (9)$$

where:

- $s_i(\lambda)$ is the spectral sensitivity of channel i (e.g., R, G, or B),
- $I(\lambda)$ represents the spectral power distribution of the incoming light (including both the light source and the reflectance of the object at each wavelength),
- t_{integ} is the integration time of the camera (a scalar factor),
- n_i is a noise term (dark offset, read noise, etc.).

In cameras whose sensor is strictly linear and in which the manufacturer does not apply any nonlinear processing to the signal, Equation (9) can adequately represent the response Vora et al. 1997. Under this assumption, the digital value read by the camera increases proportionally to the light intensity, provided that the saturation region is not reached and that the noise remains relatively constant.

Response Model with Static Nonlinearity

In many cases, the manufacturer implements a *gamma curve* or some other nonlinear mapping to compress the dynamic range or compensate for subsystem responses. In such cases, the response is modeled as a monotonically

increasing function $F(\cdot)$ acting on the internal linear signal Vora et al. 1997; Cheung, Westland, and Thomson 2004:

$$r_i = F \left(t_{\text{integ}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_i(\lambda) I(\lambda) d\lambda + n_i \right). \quad (10)$$

In practice, a power-law model can be used to approximately describe the nonlinearity:

$$r_i = (\rho_i)^{\gamma_i}, \quad \text{with} \quad \rho_i = t_{\text{integ}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_i(\lambda) I(\lambda) d\lambda + n_i. \quad (11)$$

The exponent γ_i depends on the specific camera and channel; sometimes it is assumed that all channels share the same γ . To *linearize* the measurements, the inverse is applied:

$$\rho_i = (r_i)^{\frac{1}{\gamma_i}}. \quad (12)$$

In this way, a signal proportional to the actual energy incident on the sensor is recovered, which is essential for tasks such as calibration, color balancing, and estimation of spectral sensitivity Cheung, Westland, and Thomson 2004; Uttner, Bobey, and Schlichting 2006.

Spectral Sensitivity Characterization

There are direct methods, such as illuminating the camera with monochromatic light and measuring the response at each λ , but these are often costly and impractical. Therefore, *indirect estimation* techniques have been developed to estimate spectral sensitivity using a set of known filters or color patches under a measured illumination Uttner, Bobey, and Schlichting 2006. These use equations of the form:

$$R = t_{\text{integ}} \mathbf{s}^T \mathbf{C}, \quad (13)$$

where: \mathbf{C} contains the contribution of the filters and the illuminant in matrix form; \mathbf{s} is the matrix containing, in its columns, the $s_i(\lambda)$ for each channel; and R is the matrix of measured responses for each filter.

Usually, the matrix \mathbf{C} is poorly conditioned because the filters used for characterization often have overlapping spectra, which introduces some dependency among the matrix columns. Using inversion techniques (or constrained quadratic programming), one can solve Equation (13) to find \mathbf{s} Uttner, Bobey, and Schlichting 2006.

Several authors have emphasized the importance of correcting nonlinearity before attempting color calibrations. In particular, Cheung, Westland, and Thomson 2004 shows that failing to properly linearize the response can significantly increase errors in colorimetric characterization. Similarly, Uttner, Bobey, and Schlichting 2006 points out that knowing the spectral sensitivity curve (and having linearized data) helps to develop more robust *color constancy* and color correction algorithms. Therefore, the models described in

Equations (9, 10) form the theoretical foundation for understanding signal formation in RGB cameras.

1.2 Luminance in Optical Systems

Luminance is the luminous intensity per unit area in a given direction, expressed in *candela per square meter* (cd/m^2). It is defined as:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos \theta d\Omega} \quad (14)$$

where $d^2\Phi$ is the luminous power, dA is the area of the source, $d\Omega$ is the solid angle, and θ is the angle of incidence. In optical systems, luminance is key to evaluating radiometric response and image quality Wüller and Gabele 2007.

The use of digital cameras to measure luminance requires calibration and control of variables such as exposure and spectral response. By applying appropriate procedures, accurate and reproducible measurements can be obtained.

1.3 Contrast in an Optical System

Contrast is a fundamental property in evaluating the performance of optical systems, as it determines the system's ability to distinguish differences in light intensity in an image. In physical terms, contrast is defined as the relative variation in luminance between the bright and dark regions of an object or image Boreman 2001.

Mathematical Definition of Contrast

Contrast is generally expressed in terms of *modulation depth*, defined as:

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (15)$$

where:

- A_{\max} is the maximum intensity in the image.
- A_{\min} is the minimum intensity in the image.

When $A_{\min} = 0$, the contrast is maximum ($M = 1$). Conversely, if $A_{\max} = A_{\min}$, the modulation is null ($M = 0$), implying that the image lacks intensity variations and, therefore, visual detail.

Relation with the Modulation Transfer Function (MTF)

Contrast in an optical system is directly related to the *Modulation Transfer Function* (MTF), which measures how modulation is preserved in the image across different spatial frequencies. The MTF is defined as:

$$\text{MTF}(f) = \frac{M_{\text{image}}(f)}{M_{\text{object}}(f)} \quad (16)$$

where:

- $M_{\text{image}}(f)$ is the measured modulation in the image for a spatial frequency f .
- $M_{\text{object}}(f)$ is the modulation of the object at the same frequency.

At low spatial frequencies, the MTF is close to unity, indicating that the object's contrast is preserved in the image. As the spatial frequency increases, the MTF decreases due to the limitations of the optical system, such as diffraction, aberrations, and noise.

Contrast is a key parameter in evaluating image quality, as it directly influences an optical system's ability to reproduce details faithfully. Its impact on visual perception and optical system design is significant, especially in applications where resolution and sharpness are essential. Generally, contrast determines the differentiation between regions of different luminance in an image, affecting the perception of fine details and the visual quality in optical and electro-optical systems.

An adequate level of contrast is crucial for correctly identifying low-contrast structures in scientific and medical images. In applications such as microscopy, radiography, and remote sensing, differentiating between regions of similar intensity is essential for extracting relevant information. The ability to detect subtle variations in light intensity can influence the analysis of biomedical images, the identification of structures in astronomical images, and the classification of surfaces in satellite imagery.

In addition to its impact on visual perception, contrast plays a key role in optimizing optical system design. Evaluating contrast through the modulation transfer function (MTF) allows designing and optimizing optical systems for specific applications. In fields such as astronomy and precision optics, an appropriate MTF ensures that optical systems can resolve fine structures without significant loss of information. This is particularly important in applications requiring high fidelity in detail transfer, such as designing lenses for scientific photography, surface inspection, and image reconstruction in computed tomography.

From a visual perception perspective, the human eye's sensitivity varies with spatial frequency, being most efficient at detecting intermediate contrasts. Therefore, an optimized optical design must ensure that the MTF maximizes contrast transfer in the range of spatial frequencies most relevant to human vision. This consideration is essential in display systems, digital cameras, and augmented reality devices, where the perceived image quality directly depends on correct contrast reproduction.

Contrast not only determines an optical system's ability to resolve fine details but also conditions the design of optical components and their applicability in various scientific and technological fields. Proper characterization of contrast using the MTF and other metrics is essential to ensure optimal performance of imaging systems, guaranteeing a faithful representation of captured information.

1.4 Image Formation in Optical Systems

Image formation in optical systems can be mathematically described as a convolution operation between the spatial irradiance distribution of the object and the impulse response of the optical system. This operation captures how an object is transformed into the final image generated by the system. Formally, the image $g(x, y)$ is obtained by:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (17)$$

where $f(x, y)$ is the spatial irradiance of the ideal object and $h(x, y)$ is the impulse response of the optical system, which characterizes the combined effects of physical phenomena such as diffraction and aberrations on the final image.

In an ideal optical system, the impulse response is a delta function $\delta(x, y)$, resulting in an exact replica of the object. However, in real systems, the impulse response has a finite spatial distribution due to diffraction and aberration effects, causing even point sources to appear as blurred spots in the image, known as *blur spots* Boreman 2001. This actual distribution, known as the Point Spread Function (PSF), defines the smallest detail that can be resolved by the optical system.

The convolution process requires the system to meet the properties of linearity and spatial invariance (LSI), implying that the functional form of $h(x, y)$ does not change with position in the image plane. Although these conditions are only approximated in real systems due to field-angle-dependent aberrations, the convolutional analysis remains valid within isoplanatic regions, where the PSF stays approximately constant Boreman 2001.

A continuous function $f(x_{\text{obj}}, y_{\text{obj}})$ can be discretized using the sampling property of the Dirac delta function as:

$$f(x', y') = \iint f(x_{\text{obj}}, y_{\text{obj}}) \delta(x' - x_{\text{obj}}, y' - y_{\text{obj}}) dx_{\text{obj}} dy_{\text{obj}}. \quad (18)$$

The convolution of this discretized function with the impulse response $h(x', y')$ of the optical system can be physically interpreted as placing a copy of the impulse response centered at each discrete point (x', y') , weighted by the object irradiance at that point, and then summing all these individual contributions to generate the resulting image. Mathematically, this process is equivalent to the convolution:

$$g(x, y) = \iint h(x - x', y - y') f(x', y') dx' dy'. \quad (19)$$

1.5 Spatial Frequency Response of Optical Systems

The spectral response of an optical system describes its behavior with respect to different spatial and spectral frequencies. In this context, the concept of *impulse response* is fundamental, since any image can be considered as a weighted combination of responses to point sources. This section develops the mathematical framework to model light propagation in an optical system through various key functions Boreman 2001.

Impulse Response and the Point Spread Function (PSF)

The *impulse response* of an optical system describes how it responds to a point source. Mathematically, a point source is modeled using the Dirac delta function:

$$f(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0), \quad (20)$$

where (x_0, y_0) represents the position of the point in the object plane. In an ideal system without aberrations or diffraction, the image of this source would be another point. However, in practice, the optical system produces an irradiance distribution known as the *Point Spread Function* (PSF):

$$g(x, y) = h(x, y) = \text{PSF}(x, y), \quad (21)$$

where $h(x, y)$ represents the impulse response of the system. The PSF describes how a point is spread in the image plane due to effects such as diffraction and optical aberrations.

The PSF is related to the Optical Transfer Function (OTF) through the Fourier transform:

$$\text{OTF}(u, v) = \mathcal{F}\{\text{PSF}(x, y)\}. \quad (22)$$

Line Spread Function (LSF)

The *Line Spread Function* (LSF) is a function derived from the PSF and describes the response of the optical system when the excitation is a thin line instead of a point. It is obtained by integrating the PSF along one of its dimensions:

$$\text{LSF}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{PSF}(x, y) dy. \quad (23)$$

This function is used in the characterization of optical systems, as it allows the study of blur propagation in a specific direction.

Edge Spread Function (ESF)

The *Edge Spread Function* (ESF) models the system's response to an abrupt edge transition. This function is particularly useful in the experimental measurement of the MTF, as it can be easily obtained from images of high-contrast edges. The ESF is related to the LSF through the derivative:

$$\text{LSF}(x) = \frac{d}{dx} \text{ESF}(x). \quad (24)$$

This relationship allows determining the sharpness of an optical system from images of well-defined edges.

Modulation Transfer Function (MTF)

The *Modulation Transfer Function* (MTF) characterizes the ability of an optical system to transfer contrast of different spatial frequencies from the object to the image. It is obtained from the Fourier transform of the LSF:

$$\text{MTF}(u) = |\mathcal{F}\{\text{LSF}(x)\}|. \quad (25)$$

The MTF indicates the resolving power of the system: a value close to 1 implies perfect contrast transfer, while values close to 0 indicate total loss of detail at those spatial frequencies. The formal definition of contrast or modulation is expressed as:

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \frac{ac}{dc}, \quad (26)$$

where the terms refer respectively to the amplitude of the irradiance variation (variable sinusoidal component) and the mean level (bias).

It is important to note that the MTF generally decreases with spatial frequency, which reflects the reduction in the system's ability to reproduce fine details.

Additional Considerations on the OTF and System Linearity

A relevant extension of the above lies in the distinction between the *Optical Transfer Function* (OTF) and the *Modulation Transfer Function* (MTF). Although in many applications direct reference is made to the MTF, the OTF is, in general terms, a complex function that can be expressed as

$$\text{OTF}(f) = \text{MTF}(f) \exp[-j \text{PTF}(f)], \quad (27)$$

where $\text{MTF}(f)$ represents the magnitude of the OTF and $\text{PTF}(f)$ describes the phase associated with the transfer of spatial frequencies Boreman 2001. This phase can introduce changes in the shape of the wave function in the image, generating, for example, contrast inversions or shifts in the position of the distribution's maximum. In a system with good symmetry and no significant aberrations, the phase tends to be zero or constant, but in cases

of aberrations such as coma or astigmatism, the PTF becomes more complex and affects the fidelity with which fine details are reproduced.

Another aspect that complements the study of the MTF is the linear and shift-invariant (LSI) nature of the system. The formulation through the convolution

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (28)$$

is strictly valid when the system is linear in irradiance and when its *Point Spread Function* (PSF) does not depend on the position in the image plane. These assumptions hold to a good approximation in incoherent optical systems with moderate aberrations, but may fail if the system operates outside its linear regimes or if aberrations vary drastically with field angle Boreman 2001. This observation explains the importance of the so-called *isoplanaticity*, which delimits regions where shift invariance is preserved and allows the convolution model to be applied without loss of accuracy.

The practical relevance of the MTF becomes evident when analyzing the resolution and sensitivity of the system for different values of spatial frequency. Although a single number is sometimes used to represent resolution (for example, the spatial frequency at which the MTF drops to a certain threshold), it is more informative to have the complete MTF curve as a function of frequency. This makes it possible to determine whether a system maintains contrast across the entire range of spatial frequencies of interest, or if its performance is limited in intermediate or high frequencies. Additionally, in a system composed of multiple subsystems, the total MTF is obtained as the product of the MTFs of each element in the image formation chain, which helps identify where the greatest contrast losses occur.

Finally, the notion of resolution should not be restricted to the simple separation between two distinguishable points, but rather, following Boreman's criterion Boreman 2001, should be evaluated through the integral behavior of the MTF. Especially in applications such as microscopy, astronomical observation, or remote sensing, it is not enough to reach a high cutoff frequency; solid performance in intermediate frequencies is also essential to ensure the detection of low-contrast structures. This is directly related to the characterization of *image quality* and to the possibility of optimizing optical design by maximizing the MTF in the range of spatial frequencies most relevant to each application.

In summary, the OTF approach and its magnitude, the MTF, provide a comprehensive framework to understand and quantify how contrast and resolution are affected by diffraction, aberrations, and the intrinsic limitations of the system. Phase details (PTF) can become decisive when analyzing the distortion of shapes and the displacement of irradiance maxima, while linearity and shift invariance provide the foundations for these frequency-domain descriptions to be rigorous and applicable in a wide range of optical systems

Boreman 2001.

Phase Transfer Function (PTF)

The *Phase Transfer Function* (PTF) describes the phase shift introduced by the optical system as a function of spatial frequency. It is formally defined as the argument part of the OTF:

$$\text{PTF}(u, v) = \arg \text{OTF}(u, v). \quad (29)$$

In ideal and symmetric systems, the PTF can take very simple values (0 or π), indicating very basic phase changes. However, in real systems that present optical aberrations such as coma, astigmatism, or focal shifts, the PTF exhibits more complex nonlinear behaviors. These nonlinearities introduce significant distortions in the final image, altering not only the position but also the shape of the object's details.

An important property of the PTF occurs when the MTF passes through zero: at that point, the PTF experiences an abrupt change of π , known as phase inversion. This is visually manifested in radial test patterns as a sudden switch from white to black, clearly perceptible and useful for experimentally evaluating the properties of the system.

Relationship Between the Response Functions

The image formation process in an optical system can be understood as a convolution between the object irradiance and the PSF:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y). \quad (30)$$

If the system is linear and time-invariant, this convolution in the spatial domain becomes a multiplication in the spatial frequency domain:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v), \quad (31)$$

where:

- $G(u, v)$ is the Fourier transform of the resulting image.
- $F(u, v)$ is the Fourier transform of the object.
- $H(u, v) = \text{OTF}(u, v)$ is the optical transfer function of the system.

The spectral response of an optical system is defined through the impulse response and derived functions such as the PSF, LSF, and ESF. These functions allow modeling how an optical system processes light and affect the quality of the final image. The MTF, obtained from the Fourier transform of the LSF, provides an essential quantitative criterion for evaluating the resolution of an optical system.

1.6 Relationship Between MTF and the Resolution of Optical Systems

The relationship between the *Modulation Transfer Function* (MTF) and the resolution of an optical system is essential for understanding how these systems transfer object details to the image. Although resolution is commonly specified as the minimum discernible distance between two points or lines in object space or the image plane, a more complete and rigorous description of resolution can be made using the MTF.

In the spatial domain, resolution can be defined as the minimum distance Δx at which two points can be identified as separate:

$$\Delta x \quad \text{or} \quad \Delta\theta \quad (32)$$

However, in the spatial frequency domain, resolution can be specified by the maximum frequency f_{\max} , known as the cutoff frequency, for which the MTF drops below a certain defined threshold:

$$\text{MTF}(f_{\max}) = \text{specified threshold} \quad (33)$$

This maximum frequency is usually measured in cycles per millimeter (cy/mm) or cycles per milliradian (cy/mrad). The main advantage of the MTF-based approach lies in its ability to provide information about how the system transfers contrast across a broad range of spatial frequencies, not only at the cutoff frequency.

Moreover, the concept of *Noise Equivalent Modulation* (NEM) can be introduced, which represents the minimum modulation discernible above the inherent noise of the system. The frequency at which the MTF curve intersects the NEM curve can be considered a practical criterion for determining the system's effective resolution:

$$\text{MTF}(f_{\text{NEM}}) = \text{NEM} \quad (34)$$

Nonetheless, specifying only the cutoff frequency as an indicator of resolution may be insufficient or even misleading. Two systems with identical cutoff resolution frequencies may exhibit substantial differences in image quality due to variations in their performance at intermediate and low spatial frequencies. Therefore, the concept of *MTF Area* (MTFA) is introduced, defined as the area between the MTF curve and the NEM curve within the range of relevant spatial frequencies:

$$\text{MTFA} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} [\text{MTF}(f) - \text{NEM}(f)] df \quad (35)$$

Maximizing the MTFA implies optimizing system performance across all relevant spatial frequencies, thus ensuring a faithful and detailed reproduction of the object in the final image. In conclusion, evaluating resolution using the MTF provides a more complete and meaningful characterization of the performance of optical systems, especially in critical applications that require high image quality and precision.

1.7 Image Quality Factors

The evaluation of image quality in digital capture systems is fundamental in the field of applied physics, as it allows determining the performance and suitability of these systems for specific applications. Various factors contribute to image quality, and their detailed analysis is essential for a comprehensive understanding of the system. The main image quality factors are described below:

Factor	Description	Graph Used
Sharpness	Measure of the system's ability to resolve fine details. Evaluated using the Spatial Frequency Response (SFR) Imatest 2025.	Slanted-edge, ISO 12233
Noise	Random variations in brightness or color that degrade the image. Depends on ISO sensitivity and lighting conditions.	Step charts, ColorChecker
Dynamic Range	System's ability to capture details in both shadows and highlights simultaneously.	Grayscale step charts (transmissive and reflective)
Distortion	Geometric alterations in the image such as barrel or pincushion distortion.	Rectangular grid or Checkerboard
Chromatic Aberration	Color fringing at the edges of objects due to wavelength-dependent refraction.	Dot pattern, SFRplus
Uniformity	Consistency of brightness and color in the image, affected by vignetting or uneven lighting.	Uniformly illuminated surface
Artifacts	Image anomalies such as aliasing, moiré, or excessive compression.	Wedges in ISO 12233, Log F-Contrast
Sensitivity	Capture capability under low-light conditions without excessive noise.	Step charts, ColorChecker
Color Reproduction	Accuracy in capturing and representing the original scene colors.	X-Rite ColorChecker, IT8.7
Internal Reflection (Flare)	Light scattering within the optical system that reduces contrast.	Q-13 or Q-14 step chart, white with "black hole"

Texture Detail	Ability to preserve fine details without excessive smoothing.	Log F-Contrast, Dead Leaves (Spilled Coins)
Flicker	Temporal variations in image brightness caused by intermittent lighting.	Step charts, eSFR ISO
Color Moiré	Color interference patterns in fine details due to the sensor's structure.	Wedges in ISO 12233, Log F-Contrast
Blemishes	Image defects caused by dead pixels, dust, or sensor imperfections.	Uniformly illuminated surface

TABLE 10: Image Quality Factors and graphs used for their measurement, based on *Imatest* image quality evaluation standards and ISO 12233. Adapted from Imatest Team [2025](#).

Bibliography

- Chen, Ting et al. (May 2000). "How small should pixel size be?" In: *Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications*. Vol. 3965. SPIE, p. 451. DOI: [10.1117/12.385463](https://doi.org/10.1117/12.385463).
- Vora, Poorvi et al. (1997). *Digital color cameras-1-Response models*. Tech. rep. URL: <https://www.researchgate.net/publication/2254013>.
- Cheung, Vien, Stephen Westland, and Mitch Thomson (Dec. 2004). "Accurate estimation of the nonlinearity of input/output response for color cameras". In: *Color Research and Application* 29.6, pp. 406–412. ISSN: 03612317. DOI: [10.1002/col.20061](https://doi.org/10.1002/col.20061).
- Uttner, Carsten B „, Klaus Bobey, and Bernd Schlichting (2006). *Spectral Sensitivity Estimation of Digital Cameras*. Tech. rep.
- Wüller, Dietmar and Helke Gabele (2007). *The usage of digital cameras as luminance meters*. Tech. rep.
- Boreman, G. D.. (2001). *Modulation transfer function in optical and electro-optical systems* (TT52). Vol. TT52. SPIE Press, p. 110. ISBN: 0819441430.
- Imatest (2025). *Sharpness*. URL: <https://www.imatest.com/imaging/sharpness/>.
- Imatest Team (2025). *Image Quality Factors*. URL: <https://www.imatest.com/docs/iqfactors>.