



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

### Implementación y Metodología de Calibración de Cámaras Multiespectrales para Aplicaciones en Agricultura de Precisión

Autor: Alejandro Morales Carreño  
Tutor(es): José Fco. López Feliciano  
Raúl Guerra Hernández  
Fecha: julio del 2019



t +34 928 451 150  
+34 928 451 086

e: [iuma@iuma.ulpgc.es](mailto:iuma@iuma.ulpgc.es)  
w: [www.iuma.ulpgc.es](http://www.iuma.ulpgc.es)

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

### Implementación y Metodología de Calibración de Cámaras Multiespectrales para Aplicaciones en Agricultura de Precisión

## HOJA DE FIRMAS

<b>Alumno/a:</b>	Alejandro Morales Carreño	Fdo.:
<b>Tutor/a:</b>	José Fco. López Feliciano	Fdo.:
<b>Tutor/a:</b>	Raúl Guerra Hernández	Fdo.:

**Fecha: julio del 2019**



t +34 928 451 150 | e: [iuma@iuma.ulpgc.es](mailto:iuma@iuma.ulpgc.es)  
+34 928 451 086 | w: [www.iuma.ulpgc.es](http://www.iuma.ulpgc.es)

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

<<Título del Trabajo Fin de Máster>>

## HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: .....

Presidente

Fdo.:

Secretario

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Fecha: julio del 2019



t +34 928 451 150 | e: iuma@iuma.ulpgc.es  
+34 928 451 086 | w: www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria



# Resumen

La *agricultura de precisión* es uno de los áreas que más puede verse beneficiado por los avances en *tecnología espectral* y *teledetección*. Sin embargo, en la práctica, los altos costes asociados a los sistemas que aprovechan dichas tecnologías resultan prohibitivos para los agricultores. Por otro lado, los dispositivos presentes en el mercado cuentan con numerosas limitaciones de uso, dado que se trata de sistemas cerrados de difícil integración en sistemas más complejos. Actualmente la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria participa en el Proyecto PLATINO, cuyo objetivo es el de desarrollar un sistema de agricultura de precisión a bajo coste, accesible a los agricultores y de máxima eficiencia.

Un sistema de agricultura de precisión basado en tecnología espectral emplea la información obtenida a partir de la energía que reflejan los cultivos en diferentes longitudes de onda para calcular *índices de vegetación* que indican la composición de los mismos. Esto permite detectar de forma remota el estado de dichos cultivos, permitiendo una detección temprana de cultivos secos, plagas, etc.

Este Trabajo de Fin de Máster pretende ser una aportación a dicho proyecto, desarrollando por un lado, una *cámara multispectral* propia, que cumpla con las especificaciones concretas que requiere el sistema desarrollado y que ofrezca las características de modularidad, adaptabilidad y personalización que no tienen las cámaras multispectrales que se encuentran actualmente en el mercado. Por otro lado, en este Proyecto de Fin de Máster se propone una metodología de caracterización que permite calcular de forma cuantitativa la calidad de los resultados obtenidos por la cámara desarrollada, facilitando así la elección de los componentes que forman parte del diseño final de la cámara en función de la relación entre coste económico y prestaciones ofrecidas; así como una metodología de calibración que facilita el empleo del dispositivo desarrollado en aplicaciones de campo para asegurar la obtención de imágenes espectrales de buena calidad.

**Palabras clave:** *tecnología espectral, teledetección, agricultura de precisión, cámara multispectral, índices de vegetación, dron*

# Abstract

*Smart Farming* is one of the areas that can benefit the most from the advances in *spectral technology* and *remote sensing*. However, in practice, the high costs associated with systems that take advantage of these technologies are prohibitive for farmers. Furthermore, the spectral devices currently found on the market have numerous limitations of use, given that they are completely closed systems, difficult to be integrated into more complex systems. At the present time, the University of Las Palmas de Gran Canaria participates in the PLATINO Project, whose goal is to develop a smart farming system at low cost, accessible to farmers and with maximum efficiency.

A smart farming system based on spectral technology uses the information obtained from the energy reflected by the crops in different wavelengths to calculate *vegetation indices* that indicate the composition of those crops. This allows to remotely detect the current status of the crops, allowing an early detection of dry crops, pests, etc. This Master's Thesis aims to be a contribution to this project, developing on the one hand, an own *multispectral camera*, that meets the specific specifications required by the developed system and that offers the characteristics of modularity, adaptation and customization that the multispectral cameras that are on the market today lack. On the other hand, a characterization methodology is developed in this Master's Thesis, allowing to quantitatively calculate the quality of the results obtained by the developed camera as well as facilitating the choice of the components that integrate the final design of the camera, considering both their economic cost and the benefits they offer. Additionally, a calibration process specifically conceived for ensuring the acquisition of high quality spectral images in farming environments is also proposed, thus simplifying the utilization of the developed camera. **Keywords:** *spectral imaging, remote sensing, smart farming, multispectral cameras, vegetation index, drone*

# Índice general

<b>1</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1	Estructura del documento . . . . .	1
1.2	Introducción . . . . .	1
1.2.1	Agricultura de precisión . . . . .	2
1.3	Tecnología Espectral . . . . .	4
1.3.1	Cámaras Espectrales . . . . .	8
1.4	Remote Sensing . . . . .	14
1.4.1	Dron como Plataforma de Adquisición de Imágenes . . . . .	16
1.5	Proyecto Platino . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Objeto del Trabajo</b>	<b>18</b>
2.1	Motivación . . . . .	18
2.2	Objetivo final del Trabajo de Fin de Máster . . . . .	20
2.3	Utilidad de este Trabajo de Fin de Máster . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Desarrollo de Una Cámara Multiespectral</b>	<b>22</b>
3.1	Recursos empleados para el desarrollo de la cámara . . . . .	22
3.2	Desarrollo de la Cámara . . . . .	26
3.2.1	Introducción . . . . .	26
3.2.2	Diseño Mecánico . . . . .	26
3.2.3	Diseño Electrónico . . . . .	29
3.2.4	Desarrollo del Software . . . . .	31
3.3	Calibración . . . . .	33
3.3.1	Particularidades de la Calibración . . . . .	35
3.4	Caracterización . . . . .	40
3.4.1	Introducción . . . . .	41
3.4.2	Descripción del Proceso . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Resultados y Conclusiones</b>	<b>49</b>
4.1	Explicación de los Resultados Obtenidos . . . . .	49
4.1.1	Cámara Espectral Desarrollada . . . . .	49
4.1.2	Resultados de la Caracterización . . . . .	51
4.1.3	Imágenes e Índice NDVI . . . . .	58
4.2	Análisis y Conclusiones Extraídas . . . . .	62

4.2.1	Conclusiones del producto final . . . . .	62
4.2.2	Conclusiones de la caracterización . . . . .	62
4.2.3	Conclusiones de las Imágenes Tomadas por la Cámara y de los Índices NDVI Calculados a Partir de Estas . . . . .	63
4.3	Trabajo Futuro . . . . .	64
4.4	Presupuesto . . . . .	66
4.5	Comparativa con las alternativas presentes en el mercado . . . . .	66
	<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>

# Antecedentes

## 1.1 Estructura del documento

El presente documento se encuentra desglosado en cuatro capítulos. El primero de ellos (1), introduce los antecedentes pertinentes, además de introducir los principales conceptos y conocimientos a tener en cuenta para el completo entendimiento de este trabajo de fin de Máster. El segundo capítulo (2), expone los objetivos y motivaciones que han llevado a su realización. El tercer capítulo (3), detalla el desarrollo realizado para afrontar los retos presentados, exponiendo a su vez, las métricas y los recursos empleados. Por último, el cuarto capítulo (4), expone los resultados obtenidos y las conclusiones destacadas de la realización de este trabajo, comparando dichos resultados con otras soluciones presentes actualmente en el mercado.

## 1.2 Introducción

Con cada innovación tecnológica aparecida en los tiempos actuales, surge la necesidad de implementar soluciones que aprovechen dichos avances para mejorar, en mayor o menor medida, la comodidad y la vida de la sociedad, incluido aquella que vive más alejada y ajena de la comunidad científica y de la vanguardia tecnológica. La automatización es, sin duda, uno de los grandes objetivos a perseguir para mejorar la calidad de vida de este sector. Dos de los campos con más interés en este aspecto son los vehículos aéreos no tripulados (*drones*) y la tecnología *spectral*. Ambas, por separado, ofrecen un amplio abanico de posibilidades, dadas las múltiples aplicaciones y la gran variedad de campos en los que es posible aprovechar dichas tecnologías. En conjunto, ofrecen una oportunidad excepcional para afrontar los retos más apasionantes que plantea el futuro.

Dentro de las múltiples aplicaciones en las que se puede aprovechar la dupla antes mencionada, es la agricultura la que tiene interés especial para este proyecto. Se trata de uno de los pocos conjuntos de actividades realmente indispensables para el ser humano, y que, a pesar de ello, parece carecer de la atención requerida para que se desarrollen las aplicaciones que la tecnología de hoy permite en su favor. En los últimos años ha surgido un concepto que pretende revertir esta situación y dirigir

algunos de los avances tecnológicos a mejorar tanto la agricultura como la vida de aquellos que la trabajan. Se trata de la *agricultura de precisión*.

### 1.2.1 Agricultura de precisión

La *agricultura de precisión* es el estudio de las técnicas que pretenden gestionar los campos de cultivo en base a un conjunto de medidas obtenidas mediante la observación de los mismos. A lo largo de la historia, la producción agrícola se ha beneficiado de los avances tecnológicos desarrollados generalmente para otras aplicaciones [47]. Las bases de la agricultura de precisión son el estudio y observación tanto de la tierra como de la cosecha. Observar y estudiar la tierra y la cosecha es algo que se ha realizado durante siglos. Esto ha sido posible dadas las reducidas dimensiones que históricamente los campos de cultivo han tenido. La era de revolución tecnológica en que nos encontramos, está permitiendo continuar con dichas labores de estudio en campos de cultivo de dimensiones mucho mayores, como son actualmente, y que, debido a estas características, resulta imposible realizar de forma manual por un reducido número de agricultores [43]. Los avances en agricultura de precisión se sustentan gracias al perfeccionamiento de diversas tecnologías como el sistema de posicionamiento global (*GPS*), el sistema de información geográfica (*GIS*), la miniaturización de ordenadores y componentes electrónicos, las mejoras en automatización y control de sistemas así como la mejora en telecomunicaciones. Todo ello permite el desarrollo de sistemas de agricultura de precisión que son capaces de reunir una mayor cantidad de datos, así como una mayor cantidad de información sobre las variaciones espaciales y temporales en la producción agrícola. Por lo general, el estudio de las variaciones en los campos de cultivo se centra en los siguientes aspectos:

**Variaciones en producción** Se estudia las variaciones en el rendimiento del campo de cultivo comparando las cantidades producidas históricamente y actualmente.

**Variaciones en la topografía del campo** Se estudia cómo varía el terreno de cultivo en aspectos como elevaciones, pendientes, dimensiones, etc.

**Variaciones en el suelo** Se estudia la variación de la fertilidad del suelo, su composición química (cantidad de elementos como nitrógeno, carbono o calcio[47]), el pH, la salinidad, etc.

**La variabilidad en las cosechas** Se estudia la densidad de las cosechas, la cantidad de nutrientes presentes en las plantas (nitrógeno, calcio, carbono, etc), el índice de

área de hoja [21], cantidad de agua, calidad del grano, o cantidad de clorofila, entre otros.

**Variabilidad en factores anómalos** Se estudia la presencia de factores externos como plagas, enfermedades o defectos debidos al viento u otros fenómenos medioambientales.

Si bien existen numerosas formas de enfocar dichas actividades, todas ellas tienen una estructura similar. En primer lugar, se debe dotar al campo de cultivo de la infraestructura necesaria para recoger la información relacionada con los aspectos que se pretenden monitorizar. Por lo general, conocer el estado de salud de los cultivos, la existencia de plagas o vegetación seca o estresada suelen ser algunos ejemplos.

En segundo lugar, se requiere un procesamiento de la información obtenida por estos sensores, mediante la cual se extrae la información pertinente. Por último, es necesario disponer de las herramientas necesarias para llevar a cabo las acciones que sean convenientes sobre el cultivo. Uno de los ejemplos más sencillos es un sistema de riego automático, que cuente con sensores de humedad implantados por todo el área a regar, y que sea capaz de activar o desactivar el riego en función de las necesidades de la plantación, las condiciones climáticas, etc. Idealmente, un sistema de agricultura de precisión implementado correctamente, supondrá un beneficio *agrícola* por el cual mejorará la calidad del producto cosechado; un beneficio *medioambiental*, dado que se reducirán al mínimo necesario las cantidades de agua de riego, de pesticidas o de usos de maquinaria agrícola, entre otros; un beneficio en la comodidad del agricultor y un beneficio *económico*, dado que un sistema de agricultura de precisión prioriza maximizar la eficiencia, optimizar los beneficios y realizar acciones de forma selectiva.

Uno de los objetivos más ambiciosos de la agricultura de precisión es el de automatizar por completo las tareas de la agricultura. Para ello, se requiere, por un lado, de una maquinaria específica capaz de realizar las diferentes tareas, como el sembrado, el riego o la recolección de forma autónoma. Esta clase de maquinaria está cada vez más desarrollada y extendida. Por otro lado, se requiere un sistema que sea capaz de obtener toda la información necesaria para que la maquinaria autónoma ejecute sus labores correctamente. Pongamos por ejemplo que la plantación de un campo de cultivo se encuentra seca. En primer lugar, los sensores que monitorizan dicho cultivo detectarían, bien por la humedad de la tierra, o por el estado de la vegetación, una falta de riego en algunas o todas las partes del campo. Automáticamente, se transmitiría la señal necesaria para activar el sistema de riego en el sector del campo de cultivo correspondiente. Se trata de un sistema sencillo. Sin embargo, existen

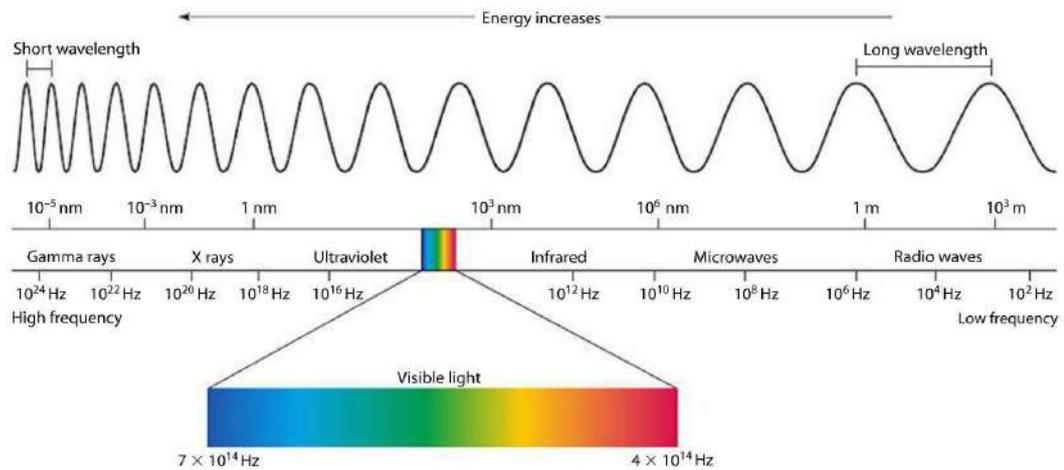
tareas con un mayor grado de dificultad. Pongamos por ejemplo la maquinaria encargada de recoger los frutos de la plantación. Esta debe esperar a que, de alguna forma, los sensores de monitorización detecten que la mayoría de la plantación ha dado frutos y, por tanto, es el momento de llevar a cabo la recogida de los mismos. La maquinaria encargada de dicho proceso debe ser capaz de trasladarse por el campo de cultivo, evitando obstáculos como piedras o personas, sin dañar las plantaciones y siendo capaz de recoger los frutos correctamente. Este proceso requiere de un sistema muy preciso en términos de geolocalización, visión artificial y otros campos científicos en constante desarrollo.

## 1.3 Tecnología Espectral

La tecnología *espectral* surgió hace varias décadas para aplicaciones de *teledetección* (ver sección 1.4), mediante satélites de observación de la tierra. Se basa en obtener una imagen, de una zona espacial, en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético.

La tecnología espectral consiste en aprovechar la radiación electromagnética (Figura 1.1) que reflejan o absorben todos los cuerpos para obtener información acerca de los mismos. Por lo general, todos los cuerpos absorben una cantidad de energía que reciben en forma de radiación, reflejando toda la demás. La tecnología espectral trata de identificar las particularidades de cada material en su capacidad de absorber o reflejar la radiación en diferentes longitudes de onda. En una imagen convencional (RGB), se capta solo una pequeña fracción del espectro: la correspondiente al rango del visible. Este rango se ve ampliado con la tecnología espectral a otras longitudes de onda, como puede ser el infrarrojo o el ultravioleta. A partir de estos datos se puede obtener información físico-química del objeto que se está observando, siendo este el principal beneficio que otorga esta tecnología. La tecnología espectral permite no solo detectar objetos sino identificar su composición.

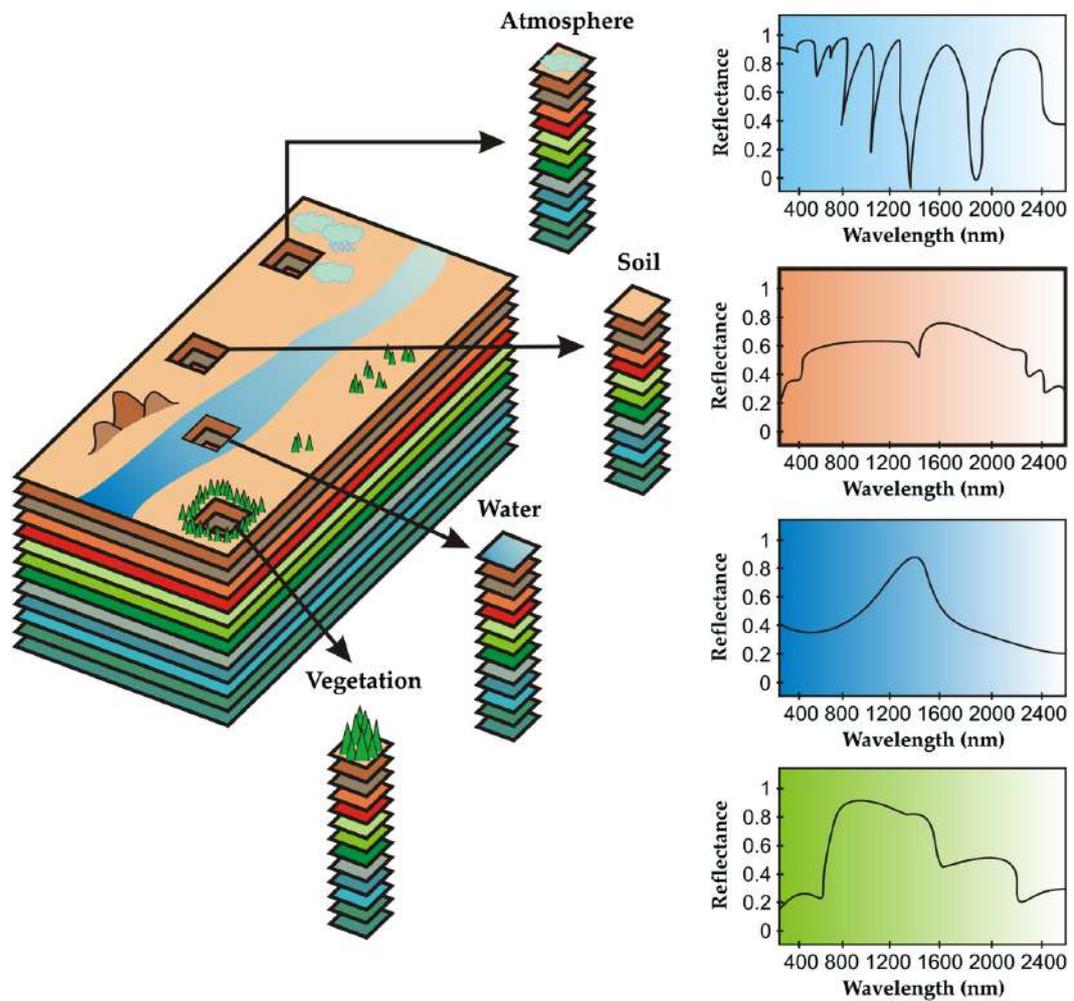
Concretamente, en agricultura de precisión, los rangos electromagnéticos más estudiado son el *rango visible* (de 400 a 700 nm) y el *infrarrojo cercano* (hasta 1000 nm)[25].



**Figura 1.1:** Diagrama del espectro electromagnético [32]

La tecnología espectral permite obtener la firma espectral de los materiales estudiados. La firma espectral de un material indica la cantidad de radiación electromagnética que el material refleja o absorbe en cada longitud de onda. Se trata de un vector numérico de longitud igual al número de bandas de las que se compone el estudio, compuesto por los valores de radiación que refleja o absorbe dicho objeto en cada banda. Esto permite, entre muchas otras cosas, caracterizar el objeto observado, de modo que es posible diferenciar qué es lo que se está observando, o en qué medida o cantidad, mediante las coincidencias entre las firmas espectrales medidas y las conocidas. Esto permite obtener información acerca de la composición del objeto observado de forma *no invasiva*.

Conocer la *firma espectral* de los materiales observados y por tanto, la composición de los mismos, abre la puerta a una gran variedad de aplicaciones en campos muy diversos. En el ámbito médico, ya se emplean imágenes espectrales para, de forma no invasiva, diferenciar entre tipos de células (cancerosas o sanas), que a simple vista resulta complicado determinar [2]. En visión artificial, se emplean imágenes espectrales para facilitar la caracterización del entorno, por ejemplo, para los coches de conducción autónoma [48]. En defensa, la tecnología espectral es de gran utilidad, tanto para caracterización de terrenos como detección de objetivos, etc [33]. En seguridad, ya se emplean imágenes espectrales para detectar si una persona está maquillada o disfrazada [8]. En mineralogía, es posible detectar composición de minerales, ya sea observando el suelo terrestre desde una gran distancia, como a escala microscópica. En medio ambiente, tiene multitud de aplicaciones como la detección de gases o la caracterización de la atmósfera [16]. La detección de variaciones en la composición del suelo o del mar, puede otorgar información sobre zonas contaminadas o que han sufrido cambios químicos, etc [5].



**Figura 1.2:** Diagrama sobre la firma espectral de diferentes elementos.

La agricultura de precisión es la aplicación que concierne en mayor medida al Proyecto PLATINO (ver sección 1.5) y a este trabajo en concreto. Mediante la tecnología espectral, se pretende simplificar la infraestructura necesaria para monitorizar un campo de cultivo, sustituyendo amplias y costosas redes de sensores por un único sensor espectral que, a bordo de una plataforma de adquisición no tripulada, como un *dron* obtenga la información requerida para la toma de decisiones y la automatización de las labores de agricultura.

El estudio para obtener información sobre la composición de un terreno de cultivo, y, por tanto, información sobre el estado de la tierra, la salud de las plantaciones, la sequía o el estrés de las mismas o la existencia o no de plagas, se lleva a cabo mediante el cálculo de *índices de vegetación*. Estos índices se calculan a partir del valor de diferentes bandas concretas del espectro electromagnético. Existen numerosos índices en función de la aplicación [15]. Un ejemplo es el Índice de Vegetación

de Diferencia Normalizada, o NDVI. Este índice indica la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación, y se obtiene a partir de la ecuación 1.1. [6].

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1.1)$$

donde las siglas *NIR* se refieren, por sus iniciales en inglés, a la banda electromagnética del infrarrojo cercano ( $\approx 800nm$ ) y *Red* a la banda del rojo visible ( $\approx 670nm$ ). Existen diversas variaciones del índice NDVI, y cada uno emplea un rango diferente de longitudes de onda tanto para el *NIR* como para el *Red*. La utilización de uno u otro dependerá del sensor que se emplee para la captura así como de la disponibilidad de las bandas capturadas.

Como se puede observar en la ecuación 1.1, el número de bandas necesario para el cálculo es muy reducido (solo 2 bandas). Esto es un aspecto muy a tener en cuenta, dado que la diferencia entre conocer o no qué bandas son útiles para el estudio o análisis a realizar es de suma importancia en el desarrollo de la aplicación o investigación espectral. Una cantidad notoria de esfuerzos realizados por la comunidad científica, especializada en tecnología espectral, se encarga de averiguar qué rangos espectrales son los más útiles y contienen más información para las diferentes aplicaciones. En este tipo de investigaciones, es importante capturar la información del mayor número de bandas posible, para poder deducir cuáles de estas son útiles y cuales redundantes.

Sin embargo, conocer qué bandas espectrales son de utilidad para una aplicación concreta permite ignorar por completo aquellas que no lo son. Por lo general, se distingue entre *multiespectral*, cuando se trabaja con entre una y unas pocas decenas de bandas; *hiperespectral*, cuando se trabaja con cientos de bandas; y *ultraespectral*, cuando se cuenta con miles de bandas. Estas divisiones no son en absoluto precisas y solo deben tomarse como una aproximación muy vaga de las cantidades con las que se relaciona cada concepto. Otra forma de diferenciar las imágenes *multiespectrales* de las *hiperespectrales* y *ultraespectrales* es la naturaleza de las bandas capturadas. En el caso de las hiperespectrales y ultraespectrales, las bandas capturadas tienen un ancho y una frecuencia de muestreo tal que puede considerarse una medición continua, presentando incluso una leve superposición entre las bandas contiguas capturadas. Por otro lado, las imágenes multiespectrales pueden estar compuestas por bandas alejadas entre sí en el espectro electromagnético. Es habitual que esta segunda forma de distinguir los conceptos de *multi* o *hiper* espectral tenga más peso que el número de bandas con que se trabaja.

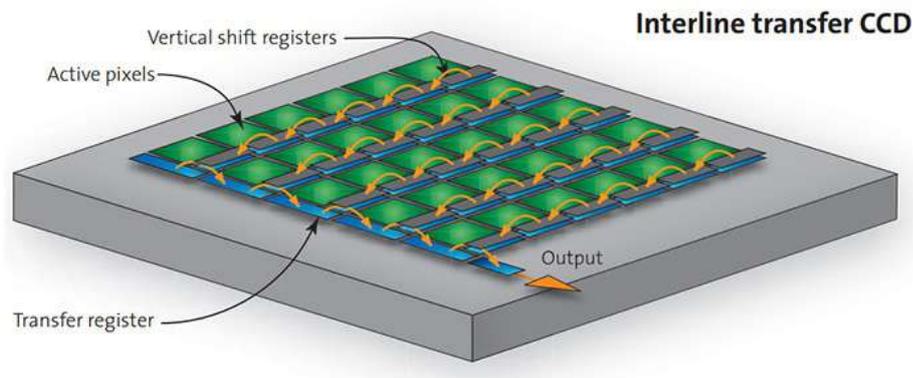
### 1.3.1 Cámaras Espectrales

Los sensores espectrales son las herramientas empleadas para capturar las imágenes espectrales. Las cámaras espectrales son similares a las cámaras de fotografía digital corrientes (o cámaras RGB). Tanto las cámaras de fotos normales como las espectrales están compuestas por dos elementos principales: el sensor y la óptica. Ambos en conjunto son los que definirán las características de la cámara, su rango de captura, su resolución, su campo de visión, enfoque, etc.

#### Sensores

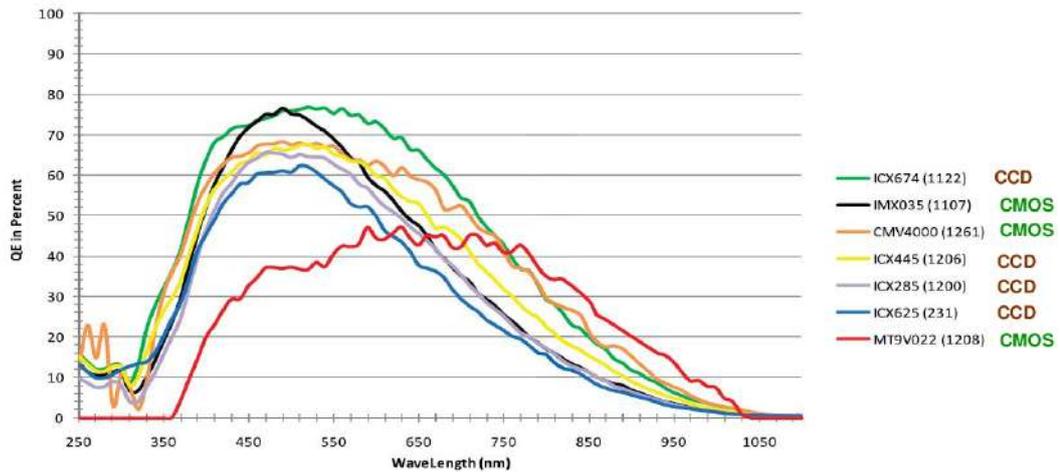
El sensor es la parte de la cámara encargada de transformar la energía de la radiación electromagnética que recibe en corriente eléctrica. Los sensores digitales, de interés para este proyecto, están formados por un área rectangular compuesto por un conjunto de células fotosensibles. Además, los sensores requieren de una electrónica que permita su uso y que tiene gran importancia en términos de consumo del sensor. Existen numerosos tipos de sensores digitales. A continuación se nombran solo los más comunes.

**Sensores CCD** Los sensores con dispositivo de carga acoplada, o CCD, son sensores con una relación de área fotosensible por célula muy alta, por lo que se consideran de gran calidad. Son sensores con muy pocas irregularidades así como bajo nivel de ruido. El área fotosensible de los sensores CCD está formada por un conjunto de electrodos acoplados en serie por columnas. La radiación excita las células fotosensibles, cargando en mayor o menor medida estos electrodos. Una vez realizado el muestreo, la carga de la última fila del sensor se vacía en un *array* de condensadores de lectura, de modo que la fila anterior se descarga en esta última fila, ahora vacía. Esto se repite a lo largo del sensor, de modo que es necesario eliminar la carga eléctrica presente en el sensor para completar la lectura. El patrón eléctrico que se elimina del sensor con cada lectura, que es análogo al patrón lumínico recibido por el mismo, se introduce tras la lectura en un amplificador integrado en el chip [26] como puede verse en la Figura 1.3. Esta arquitectura no solo implica una lectura destructiva, sino que también requiere una electrónica de control compleja, lo cual provoca un consumo muy elevado. Además, esto supone que potencialmente miles de píxeles deben ser procesados por un mismo amplificador. Por todo esto, los sensores CCD se emplean por lo general en el ámbito profesional, en aplicaciones que requieren una alta calidad de color e imagen, como la industria cinematográfica. Estos sensores son especialmente sensibles entre 400 y 750 nm.



**Figura 1.3:** Diagrama de la arquitectura CCD

**Sensores CMOS** Estos sensores emplean la tecnología CMOS. Emplear la tecnología CMOS supone ciertas ventajas con respecto a los sensores CCD. Entre otras, supone una electrónica de control mucho menor, por lo que se reduce el área del sensor. Además, la lectura de estos sensores no es destructiva por lo que se facilita su uso. Sin embargo, la mayor de sus diferencias radica en el consumo de energía. El consumo de energía de un sensor CMOS es mucho menor que el de un sensor CCD. Por ello, son los sensores con un mayor uso, convirtiéndose en los sensores idóneos para aquellos sistemas alimentados por baterías, como los teléfonos móviles. La gran diferencia entre los sensores CCD y los CMOS radica en cómo se produce la lectura del valor eléctrico de cada célula fotosensible. Los sensores CMOS no requieren desplazar los valores leídos a lo largo de todo el sensor para procesar la información, sino que pueden ser leídos de manera individual. Esto se debe a que cada célula fotosensible de un sensor CMOS cuenta con un amplificador individual propio, que permite su lectura sin necesidad de desplazar las cargas eléctricas. A su vez, esto supone una gran reducción en el tiempo de lectura, y por tanto, una mejora en la cantidad de fotogramas por segundo o *frame rate*. El rango de medición de estos sensores es similar al de los sensores CCD, siendo más sensible entre 400 y 750 nm.



**Figura 1.4:** Comparativa de sensibilidad entre diferentes tipos de sensores CCD y CMOS [34]

**Sensores de Arseniuro de Indio y Galio** Los sensores de arseniuro de indio y galio, o InGaAs, son sensores menos extendidos que los dos anteriores, dado que sus aplicaciones son más específicas. La particularidad de este tipo de sensores está en que su composición química los hace sensibles a un rango del espectro electromagnético al que no alcanzan los sensores CCD y CMOS. Estos sensores están basados en el mecanismo de absorción de *banda a banda*. Esto significa que cuando los electrones de la capa de valencia reciben un fotón, estos cuentan con la energía suficiente para excitarse directamente a la banda de conducción, dejando un *hueco* tras de sí. La sensibilidad espectral de estos sensores se centra en el infrarrojo de onda corta, *SWIR (Short-Wave Infrared)*, entre 900 y 1700 nm. Este rango espectral hace a estos sensores particularmente atractivos para ciertos campos como el de la defensa y seguridad (visión nocturna), espacial (observación de la Tierra), automotriz (seguridad en el transporte) o industrial (control del producto no invasivo).

## Ópticas

El segundo aspecto que conforma una cámara espectral es su óptica. La óptica que emplee la cámara será la que determine cómo la luz entrante excitará las células fotosensibles del sensor. Como se vió en el apartado 1.3.1, cada cámara puede contar con uno o más sensores, pero el área de estos es limitada y, por tanto, la información que pueden recoger también lo es. Dado que la información que puede recoger un sensor es limitada, existe un compromiso entre la cantidad de información espacial y espectral que se podrá capturar. La forma en la que se gestiona este compromiso diferenciará el tipo de cámara espectral.

Se distinguen por tanto dos categorías principales de cámaras: aquellas que requieren realizar un barrido para obtener toda la información espacial y espectral, y aquellas que no. Dentro de la categoría de cámaras que requieren realizar un barrido existen las que dedican la mayor parte del sensor a capturar información espectral, y por tanto, requieren realizar un barrido espacial (*whiskbroom* y *pushbroom*); y aquellas que priorizan capturar información espacial, teniendo que realizar un barrido espectral (*staring*). En principio, las cámaras que priorizan la captura de información *espectral* deberán realizar un barrido *espacial*, mientras que aquellas que priorizan la captura de información *espacial* deberán realizar un barrido espectral. Las cámaras que no requieren realizar un barrido, sin embargo, sacrifican parte de la resolución espacial y espectral que capturan en cada imagen, alcanzando un punto intermedio.

**Whiskbroom** Las cámaras tipo whiskbroom son una de las más populares en aplicaciones de *teledetección*, dado que son las cámaras con mayor información espectral; sin embargo, esto supone reducir al mínimo la resolución espacial. Es por esto que las cámaras whiskbroom capturan la información de un único píxel. Por tanto, este tipo de cámaras requiere realizar un barrido espacial, en dos dimensiones si se pretende obtener un cubo espectral completo. Por lo general, este tipo de cámaras se suelen emplear a bordo de satélites, por lo que aprovecha el movimiento de estos para realizar dicho barrido. Algunas de las plataformas de adquisición hiperespectral que emplean cámaras whiskbroom son AVIRIS y HyMap [24][11]. La arquitectura de la óptica de una cámara hiperespectral tipo whiskbroom puede verse a modo de diagrama en la Figura 1.5. Su estructura está formada por un espejo móvil que rota en la dirección opuesta a la del movimiento de la cámara. La luz atraviesa un orificio puntual para alcanzar un divisor espectral, típicamente un prisma que refracta la luz en sus diferentes longitudes de onda. Al atravesar el prisma, la luz puntual proveniente del orificio se transforma en una línea de luz compuesta por los rayos paralelos pertenecientes a las diferentes longitudes de onda. Esta línea de luz se propaga a lo largo del sensor mediante una lente cilíndrica. En el diagrama se emplea un dispositivo digital de microespejos (DMD) para mejorar la precisión de la cámara. Los dispositivos digitales de microespejos se emplean para realizar un producto internamente entre el patrón de fotones a medir en el DMD y la imagen que se está adquiriendo. El patrón de medición del DMD se modifica y se realiza una nueva medición, hasta obtener el número de muestras deseado [11]. El movimiento del espejo, unido al movimiento del sistema completo (provocado, generalmente, por el propio movimiento del satélite) efectúan los dos barridos necesarios para generar el cubo espectral.

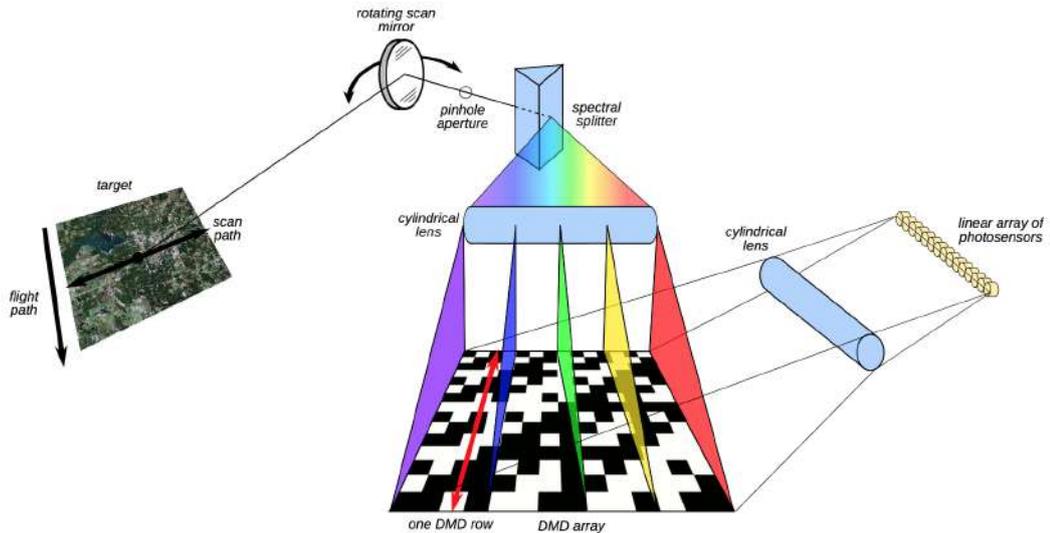


Figura 1.5: Arquitectura de una óptica tipo whiskbroom[11]

**Pushbroom** Las cámaras tipo pushbroom son posiblemente las más populares en *teledetección*, siendo empleadas, entre otras, por las plataformas HYDICE, CASI o Hyperion [24][11]. La peculiaridad de este tipo de cámaras es que son capaces de capturar una imagen con una resolución espacial igual a una de las dimensiones del sensor (fila o columna), empleando la otra para capturar información espectral. Este tipo de cámaras requiere realizar un barrido espacial en una única dirección. Esto significa que únicamente aprovechando el movimiento del satélite o de la plataforma de adquisición que se emplee, puede realizarse un barrido completo. La arquitectura de la óptica que emplean este tipo de cámaras se detalla en la Figura 1.6. El sensor recibe la luz proveniente de un dispositivo DMD, que refleja la luz refractada por un prisma, que a su vez ha atravesado una apertura con forma de rejilla, permitiendo el paso de una única línea de luz. Este tipo de cámaras, al igual que las *whiskbroom*, capturan bandas de forma *continua*.

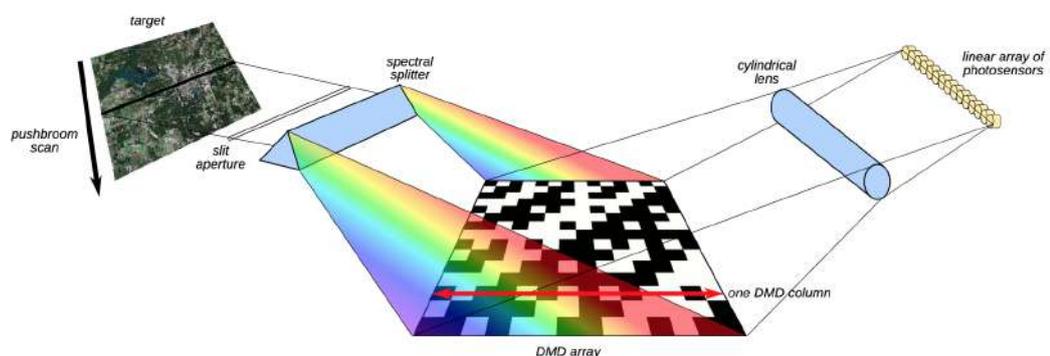
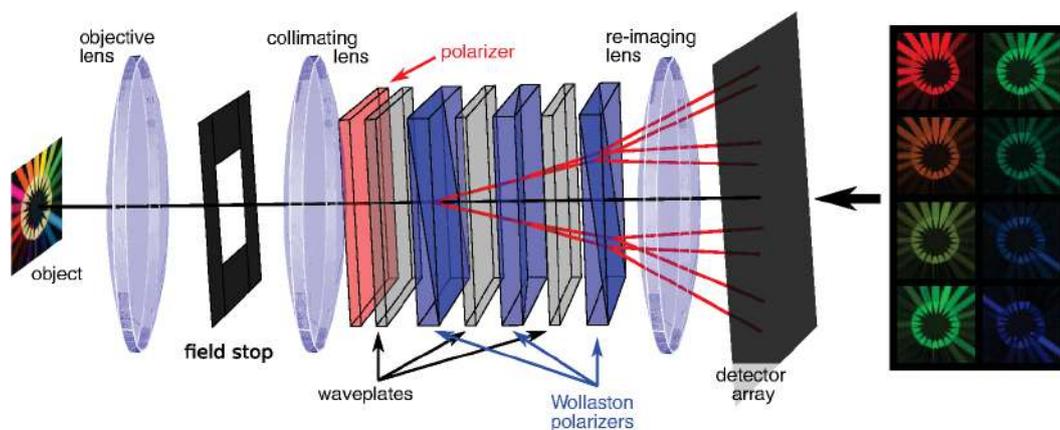


Figura 1.6: Arquitectura de una óptica tipo pushbroom[11]

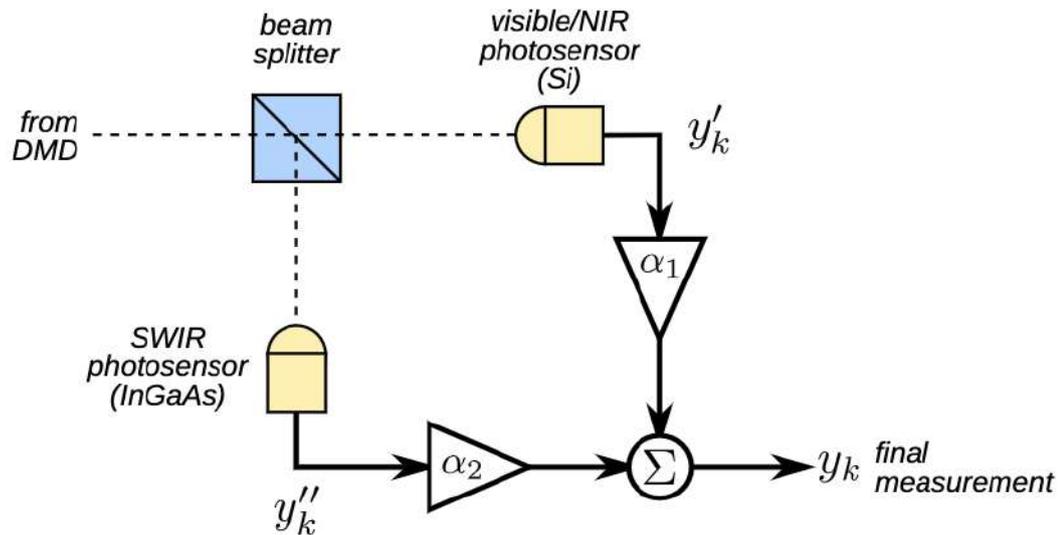
**Staring** Este tipo de cámaras deben realizar un barrido espectral, capturando las diferentes bandas que se requieran según la aplicación. Esta arquitectura se emplea tanto en cámaras multispectrales como hiperespectrales. Existen diferentes formas de realizar el barrido espectral, según como sea la topología de la cámara. Este tipo de cámaras captura una única longitud de onda por cada imagen. Por tanto, para completar un *cube espectral* es necesario barrer el espectro electromagnético variando la longitud de onda a capturar en cada imagen. Para ello, es posible emplear múltiples filtros diferentes, o un mismo filtro modificable. Cuando se emplean múltiples filtros diferentes, es habitual disponerlos en una rueda, la cual gira gracias a un motor, seleccionando qué filtro es empleado en cada captura. De este modo, la resolución espectral de dicha cámara será igual a la cantidad de filtros que disponga la rueda. Por otro lado, es posible emplear filtros modificables, de modo que sea necesario emplear un único filtro. Este tipo de cámaras se diferencia en la forma en la que se modifican dichos filtros. Existen los *liquid crystal tunable filters* [12], es decir, filtros de cristal líquido modificables, cuyas características se alteran en función de la frecuencia de la señal eléctrica que se les aplique; y los *acousto optic tunable filters* [14], cuyas características dependen de una señal acústica. El mayor problema de los filtros modificables eléctricamente es que requieren una electrónica compleja, así como fuentes de alimentación de gran tamaño que limitan mucho su uso. Además, el alcance de estos filtros se reduce al espectro visible y al infrarrojo cercano (VNIR).

**Snapshot** Las cámaras tipo *snapshot* son las únicas que no requieren realizar un barrido de ningún tipo. Esto significa que se obtiene todo el cubo espectral en un único muestro del sensor. Para ello, estas cámaras cuentan con una óptica que separa la luz irradiada por la escena a capturar en las diferentes longitudes de onda deseadas y dirige cada banda a una parte concreta de un mismo sensor, como puede verse en la Figura 1.7. Obviamente esto implica una reducción en la resolución espacial, así como una restricción en el número de bandas que se pueden capturar, limitado por el área del sensor.



**Figura 1.7:** Arquitectura de una cámara snapshot

**Ampliación de la resolución espectral** En ocasiones se requiere ampliar el rango espectral de una cámara, para capturar bandas en distintos rangos del espectro electromagnético, como el VNIR y el SWIR. Para ello, es posible combinar distintos tipos de sensores, como sensores CCD o CMOS con sensores InGaAs. El método empleado se detalla en el esquema de la Figura 1.8. De este modo, es posible dirigir la luz irradiada por la escena a capturar en dos direcciones diferentes, de modo que se exciten los sensores por separado.



**Figura 1.8:** Esquema de un sistema para aumentar la sensibilidad espectral

## 1.4 Remote Sensing

*Remote sensing*, o teledetección, es la ciencia que se dedica a la observación de objetos o fenómenos desde una cierta distancia. Este proceso se basa en la detección de la energía reflejada por el objeto a observar en un amplio rango del espectro electromagnético. Típicamente, la teledetección se ha empleado para la observación de la Tierra. La observación terrestre remota surgió con la invención del vuelo, concretamente en globo, en la década de 1860. Sin embargo, la observación sistemática de la Tierra comenzó a realizarse con motivos militares durante la Primera Guerra Mundial, y llegó a su momento cúlmine durante la Guerra Fría. Si bien dichas mediciones suelen realizarse mediante fotografía, el *remote sensing* no está limitado a estas, y puede realizarse mediante otra clase de sensores como RADAR o LIDAR. Para realizar *teledetección*, el sensor ha de montarse en una plataforma de adquisición. Esta suele ser un satélite, un High Altitude Pseudo-Satellite, un avión o un dron. Las condiciones de trabajo de los sistemas que operan en las diferentes plataformas de adquisición son muy variadas, pero también tienen muchos aspectos en común que son de vital importancia tener en cuenta cuando se diseñan sistemas para remote

sensing.

Entre otras, se cuenta con un área limitada, por lo que dichos sistemas deben ser lo más compactos posible. Además, dichos sistemas deben tener un consumo energético mínimo, dado que las fuentes de energía en dichas plataformas, por lo general baterías, son un factor *extremadamente* limitante en la mayoría de los casos. Otro aspecto a tener en cuenta es el de la comunicación y envío de información entre la plataforma de vuelo y Tierra. Esta comunicación, ya de por sí complicada, puede plantearse de dos formas opuestas. Por un lado, es posible realizar el procesamiento de la información muestreada en la propia plataforma de vuelo, enviando *únicamente* aquella información relevante para el estudio o la aplicación. Esto supone un aumento de la complejidad del sistema a bordo de la plataforma de adquisición así como un aumento considerable del consumo energético en procesamiento de información. Por otro lado, es posible reducir la capacidad de procesamiento al mínimo, y derivar esa parte del trabajo a los centros en Tierra. Sin embargo, esto supone enviar *toda* la información capturada por los sensores de la plataforma de adquisición, dado que esta es incapaz de diferenciar entre información inútil, redundante o errónea. Por tanto, aumentaría el consumo energético en procesos de comunicación. Como es habitual, la elección correcta dependerá de cada caso concreto.

Por otro lado, surgen particularidades en función de la aplicación y de la plataforma de adquisición. Por ejemplo, un satélite debe estar preparado para operar en condiciones adversas, con temperaturas extremas y muy cambiantes además de una exposición constante a la radiación. Por ello, cuando se diseña un sistema para operar a bordo de un satélite, ha de tenerse todo esto en cuenta, de modo que se realice un diseño robusto y fiable. Las aplicaciones de *teledetección* son muy diversas: mineralogía, caracterización atmosférica, detección de objetivos, detección de anomalías, meteorología y por supuesto, agricultura de precisión. Algunas de las aplicaciones más conocidas son el estudio de la deforestación en áreas como la cuenca del Amazonas, el estudio del efecto del cambio climático en glaciares y zonas polares o la caracterización de zonas inaccesibles por tierra. Además, la teledetección agiliza la recogida de información con respecto a la detección terrestre, más costosa y lenta, asegurándose también que esta recogida de información no altera en ningún caso el objeto o zona estudiado. De ahí que actualmente la NASA tenga alrededor de quince misiones solo de teledetección mediante sensores espectrales pasivos. Los sensores pasivos aprovechan la radiación natural que emiten los cuerpos para realizar sus mediciones, en contraposición con los sensores activos, que emiten una radiación en la dirección del objeto a medir, calculando así la cantidad de esta energía reflejada [28][1].

### 1.4.1 Dron como Plataforma de Adquisición de Imágenes

Las plataformas de vuelo no tripuladas, o drones, se han convertido en una de las plataformas de adquisición más populares en los últimos años. Esto se debe a que cuentan con unas características muy atractivas dada su capacidad de transportar diferentes tipos de sensores así como su disponibilidad y la facilidad con la que es posible tanto programar vuelos como modificarlos en tiempo real. Existen dos tipos principales de drones: los de ala fija y los drones con rotor. Estos últimos cuentan con la ventaja de poder detenerse en el aire un tiempo determinado, lo cual puede ser de utilidad cuando se está llevando a cabo un proceso de teledetección. Al igual que ocurre con los satélites, los sistemas de teledetección que emplean drones como plataforma de adquisición, también tienen sus particularidades. En primer lugar, un dron tiene una capacidad de carga reducida, por lo que el peso del sistema a implementar es importante. A mayor peso, más energía requiere el dron para realizar sus movimientos, y, por tanto, menor tiempo de vuelo. Obviamente, el consumo energético del propio sistema es otro factor limitante a tener en cuenta, por razones obvias. Además, el muestreo desde un dron esta sujeto a las condiciones atmosféricas en el momento del mismo. El viento, el sol, el polvo en suspensión, son factores que alteran en gran medida el proceso de detección remota realizado por el dron, y por lo tanto, modifican los resultados obtenidos.

## 1.5 Proyecto Platino

Este Trabajo de Fin de Máster es una aportación al desarrollo del sistema de adquisición de imágenes espectrales para agricultura de precisión. Este área de investigación se basa en aprovechar el potencial tecnológico actual para disminuir el esfuerzo del agricultor y aumentar la productividad en los campos agrícolas. Además de las connotaciones tecnológicas derivadas de este tipo de proyectos, hay otras de tipo socio-económico y medio ambiental. En cuanto al primer factor, el socio-económico, hay que indicar que, según el Banco Mundial, en los últimos 50 años se ha perdido casi la mitad de la tierra cultivable por persona (en el caso de España, hemos pasado de 0,53 hectáreas por persona en 1961 a 0,26 hectáreas en 2014), a lo que se une el aumento de población que en el año 2030 pasará a ser de 8.500 millones de personas. Indudablemente esto afectará en gran medida a toda aquella población que tenga una gran dependencia del sector agrícola, y todo lo que sea mejorar los recursos y aumentar la productividad de sus tierras beneficiará a su economía y a su bienestar. Por otro lado, el uso de recursos hídricos para abastecer a los campos de cultivo, así como el de pesticidas para evitar la llegada de plagas o eliminarlas, hace necesaria una estrategia que permita optimizar su utilización, disminuyendo el impacto negativo que pueda tener sobre el medio ambiente y la salud. Los riesgos

que los pesticidas tienen para la salud (sobre todo en niños, adolescentes y mujeres embarazadas), hacen que debamos afrontar este problema de forma inteligente para evitar consecuencias fatales, como pueden ser el provocar cáncer o acarrear consecuencias para los sistemas reproductivo, inmunitario o nervioso. El proyecto PLATINO pretende crear una prueba de concepto encaminada a desarrollar una maquinaria agrícola de gestión de cosecha (trigo, uvas, etc) que sea autónoma y automática, de forma que se dirija por sí sola a aquellas zonas de un campo de cultivo en el que se haya detectado previamente que el grado de madurez es óptimo para realizar la recogida, o el grado de humedad está por debajo de un límite y haya que aumentar el riego, o que comienza a producirse un cambio en la calidad de las plantas debido a la llegada de una plaga y por lo tanto haya que distribuir pesticidas de forma selectiva en determinadas áreas. Para ello, ha de desarrollarse una cámara espectral que cumpla con los requisitos de dicha aplicación.

El proyecto PLATINO fue aprobado por el Ministerio de Economía Industria y Competitividad en el año 2018. La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria participa en él de mano del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA). La ULPGC participa conjuntamente con la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM), la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y la Universidad de Cantabria (UC). La duración estimada del proyecto es de 3 años.

El proyecto PLATINO tiene un carácter claramente aplicado, y su objetivo prioritario es el desarrollo de sistemas altamente automatizados, autónomos y seguros en el ámbito de la *agricultura inteligente* aprovechando los avances tecnológicos actuales, tanto en tecnología espectral, como en procesamiento de imágenes, redes de sensores o visión artificial. Los avances en electrónica han permitido desarrollar sistemas, como redes de sensores, más potentes y miniaturizados. Esto supone un aumento en la cantidad de datos recogidos y, por tanto, la necesidad de una mayor capacidad computacional para procesar la información adquirida. El objetivo del proyecto PLATINO es de desarrollar un sistema altamente automatizado de agricultura de precisión 1.2.1, La principal aportación del IUMA en este proyecto es la de dotar de tecnología *espectral* al sistema a desarrollar, mejorando de esta forma su funcionalidad y prestaciones. Dada la naturaleza de las imágenes espectrales, se requieren algoritmos más sofisticados para su procesamiento, así como el desarrollo de un hardware específico para acelerar estos procesos. Tanto la adquisición de estas imágenes espectrales como el desarrollo de algoritmos de procesamiento de las mismas son las tareas principales del IUMA en el proyecto PLATINO.

# Objeto del Trabajo

## 2.1 Motivación

Como se explica en el apartado 1.5, uno de los objetivos del IUMA es el de desarrollar un sistema de agricultura de precisión basado en tecnología espectral al menor coste posible. Un aspecto fundamental de dicho sistema es la cámara espectral. Actualmente, existen numerosos modelos en el mercado, con diferentes especificaciones y precios [27]. Sin embargo, estos modelos tienen diferentes inconvenientes. En primer lugar, suelen tratarse de sistemas cerrados, que permiten poca o ninguna modificación o adaptación a diferentes aplicaciones y que, de hecho, su capacidad de configuración no es suficiente para las aspiraciones del sistema que se está diseñando en el proyecto PLATINO. Por ello, contar con una cámara espectral de diseño propio permite la completa integración con el sistema que está desarrollando el IUMA, dado que se tiene un control absoluto sobre dicha cámara. Por otro lado, significa que la cámara desarrollada tendrá las especificaciones exactas requeridas por el proyecto en cuanto a peso, resolución espacial, resolución espectral, precio, etc. A su vez, es uno de los objetivos de este proyecto, diseñar una cámara espectral *modular*, cuyo diseño permita modificaciones de modo que pueda aprovecharse para diferentes aplicaciones. Por último, se pretende que la cámara a fabricar tenga un coste menor que las actuales alternativas presentes en el mercado.

En concreto, se ha decidido desarrollar una cámara multiespectral por varios motivos. En primer lugar, la cámara se ha desarrollado concretamente para un sistema de agricultura de precisión. Como se explicó en la introducción, estos sistemas se basan en diferentes índices de vegetación, los cuales ya están estudiados y se conoce qué bandas son útiles. Esto implica que no es necesario capturar un gran número de bandas para más tarde estudiar cuáles serán de utilidad, sino que el sistema puede centrarse en capturar un reducido número de bandas. Por ello, una cámara multiespectral resulta ventajosa frente a una hiperespectral. En segundo lugar, hay que tener en cuenta que el sistema será instalado en una plataforma de adquisición para teledetección, en concreto en un dron. Esto implica ciertas particularidades en el proceso de medición, que hay que tener en cuenta dado que afectan enormemente a los resultados obtenidos. El sistema de agricultura de precisión ideado se basa en un dron que sobrevuela un campo de cultivo. Este lleva acoplada una cámara espectral, con la que va capturando imágenes a lo largo de todo el campo de cultivo. Estas imágenes han de ser georreferenciadas y registradas, para crear una única imagen

de alta resolución de todo el campo. Existen diferentes técnicas para el registro de imágenes, si bien todas ellas mejoran conforme aumenta la resolución espacial de cada imagen individual. Esto significa que es muy complicado *unir* correctamente imágenes cuando estas son de un único píxel (cámaras *whiskbroom*) o una línea de píxeles (cámaras *pushbroom*). Las cámaras tipo *staring* cuentan con la mayor resolución espacial, dado que emplean todo el área del sensor para capturar una única banda, facilitando enormemente el postprocesado de las imágenes y su correcto registro. Es necesario tener en cuenta las limitaciones de las cámaras tipo *staring*, como su resolución espectral o la necesidad de realizar un barrido espectral. Las dos principales soluciones a estas limitaciones son las siguientes:

- Desarrollar una cámara con un número de sensores igual al de bandas que se desee capturar.
- Desarrollar una cámara con un motor que mueva una rueda de filtros, permitiendo realizar el barrido espectral.

Ambas posibilidades tienen sus ventajas y sus inconvenientes. La primera solución implica usar un mayor número de sensores. Los sensores son la parte más cara de la cámara, dado que la calidad de las imágenes adquiridas depende en gran medida de ellos. Por tanto, emplear muchos sensores supone un aumento considerable del precio final del producto, a menos que se opte por sensores de un coste muy reducido. Por otro lado, el control de tantos sensores supone un aumento en la complejidad del software de la cámara, muchas veces limitado en cuanto a capacidad de cómputo y a consumo de energía. Sin embargo, esta solución tiene algunas ventajas importantes. Por ejemplo, permite capturar todas las imágenes de diferentes longitudes de onda en el mismo instante. Esto supone que se contaría con un cubo espectral perfectamente alineado. En oposición a esto, si se cuenta con una cámara con rueda de filtros, entre captura y captura es necesario mover la rueda de filtros hasta colocarla en la posición deseada. Esto supone que entre una captura y otra, la posición del dron, y por tanto de la cámara, presumiblemente será distinta, dadas las condiciones de captura como el viento o el propio movimiento del dron. Por tanto, al no coincidir espacialmente las imágenes, el área en el que exista un solape completo entre todas las bandas, y por lo tanto, el cubo espectral esté completo, será menor. Sin embargo, esta forma de diseñar la cámara multispectral también tiene sus ventajas. En primer lugar, al emplearse un único sensor, se reduce drásticamente el precio de fabricación de la cámara pudiendo incluso optarse a sensores de mayor calidad. Además, se simplifica enormemente el software de control de la misma, si bien es necesario añadir el control de un motor que mueva la rueda de filtros. Por último, emplear ruedas de filtros permite aumentar casi indefinidamente el número de bandas que se pueden capturar, mientras que el otro modelo está limitado por el número de sensores que se empleen. El proceso de caracterización desarrollado en este proyecto servirá

también para cuantificar cómo de buena es una determinada solución, permitiendo compararlas.

## 2.2 Objetivo final del Trabajo de Fin de Máster

Los objetivos del presente proyecto son, por un lado, desarrollar una cámara multiespectral que cumpla con las necesidades del IUMA y el Proyecto PLATINO; y, por otro, desarrollar una metodología de calibración y de caracterización para dicha cámara, aplicable a su vez a cualquier sistema de similares características. Estos objetivos se han desglosado en los siguientes:

- Diseño de la estructura de la cámara a nivel físico.
- Desarrollo del software de control de la cámara.
- Integración del software de la cámara en el sistema de control de vuelo del dron.
- Desarrollo de una metodología de calibración propia aplicable a la cámara desarrollada.
- Desarrollo de una metodología de caracterización de cámaras multi-espectrales.
- Realizar la caracterización de diferentes sensores y filtros, implementando dicha metodología.
- Realización de experimentos con el sistema desarrollado para comprobar su funcionalidad.

## 2.3 Utilidad de este Trabajo de Fin de Máster

Como se explica en la sección 1.5, este trabajo forma parte de un proyecto de mayor escala, y pretender ser una aportación al mismo. La utilidad de este trabajo en el proyecto PLATINO es enorme. Contar con una cámara diseñada específicamente para dicho proyecto supone contar con las especificaciones requeridas para el mismo, así como una capacidad de integración y modificación absoluta, y todo a un coste menor que las alternativas presentes en el mercado. Este trabajo puede ser un primer paso en el desarrollo de las cámaras que se instalarán a bordo de las plataformas de adquisición que capturarán la información espectral pertinente para permitir

el correcto funcionamiento del sistema de agricultura de precisión, con todas las ventajas que ello implica.

## Desarrollo de Una Cámara Multiespectral

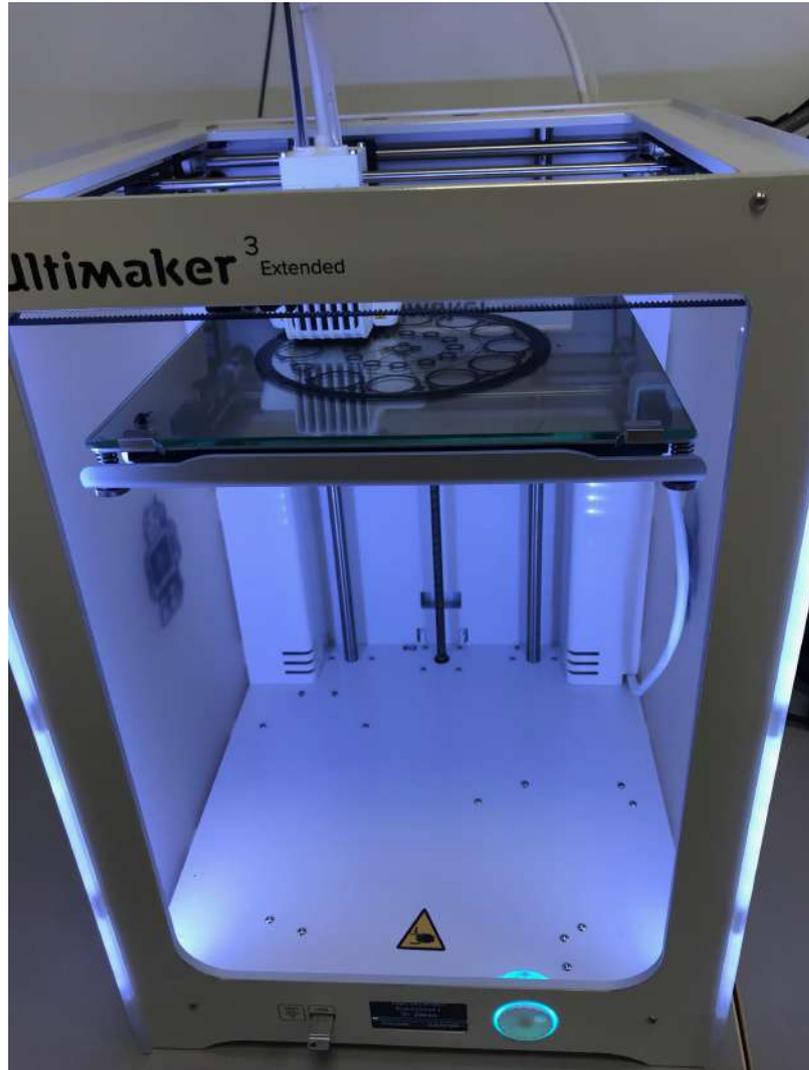
En este capítulo se detalla el proceso de diseño y desarrollo de la cámara multiespectral así como el diseño de las metodologías de calibración y caracterización a emplear. En un primer apartado se enumeran los recursos empleados durante el transcurso de este proyecto. A continuación se detalla el proceso de desarrollo de la cámara, desde su estructura física, sus componentes mecánicos y electrónicos hasta el software desarrollado para su control y su integración con la plataforma de adquisición. El apartado 3.3 explica el proceso de calibración propio desarrollado para la cámara espectral, así como las particularidades y diferencias con respecto al proceso de calibración clásico. Por último, se presenta el desarrollo de la metodología de caracterización desarrollado en este proyecto.

### 3.1 Recursos empleados para el desarrollo de la cámara

Este proyecto se ha realizado principalmente en el laboratorio B del edificio del Parque Científico y Tecnológico del Campus de Tafira de La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en el que se encuentran los laboratorios del IUMA. Este laboratorio cuenta con un espacio especialmente acondicionado para la captura de imágenes espectrales, forrado interiormente con un material cuyo índice de reflexión es muy bajo. Esta instalación es la empleada para realizar las pruebas que requiere la caracterización de la cámara espectral. El laboratorio cuenta además con un ordenador con un procesador Intel Core i7-7700K, CPU a 4.20GHz (x8) y 32 Gb de memoria RAM, que ha sido el empleado para desarrollar el software de la cámara y realizar la caracterización.

Para la fabricación de la estructura de la cámara se ha empleado la impresora en 3D *Ultimaker 3 Extended* [45], disponible en el laboratorio DSI del IUMA. Esta impresora ha facilitado la fabricación tanto de la rueda de filtros, como de la estructura de la cámara y de las piezas necesarias para su acoplamiento al dron. Las especificaciones

de esta impresora 3D se detallan en la tabla 3.1. Dicha estructura se ha diseñado mediante el software SolidWorks [44] de Dassault Systèmes SE.



**Figura 3.1:** Impresora 3D Ultimaker 3

Dimensiones (mm)	342 x 505 x 688
Peso (kg)	11.3
Resolución (um)	20
Velocidad de construcción ( $\frac{mm^3}{sg}$ )	24
Velocidad del cabezal ( $\frac{mm}{sg}$ )	<300
Temperatura de extrusión (°C)	80 - 280

**Tabla 3.1:** Especificaciones de la impresora 3D Ultimaker 3 Extended

El software de control de la cámara se ha implementado en una placa Odroid XU4 [13], un ordenador monoprocesador con un sistema operativo Linux. El sistema ha sido diseñado para poder ser implementado en cualquier placa con sistema operativo

basado en Linux, como las placas Jetson TK1 development board [29] o la Jetson TX2 development board [30] de la empresa NVIDIA con las que cuenta el IUMA. La placa Odroid es al mismo tiempo el *ordenador de a bordo* del dron donde está implementado todo el software de control de la misión a realizar por el dron. Esta placa estará integrada dentro de la propia estructura de la cámara.

El control del motor que mueve la rueda de filtros se realiza a través de un Arduino. Para el desarrollo de este proyecto se ha trabajado tanto con el Arduino UNO [4] como con el Arduino Nano [3].

El motor empleado en el proyecto es el modelo 28BYJ-48 [23]. Se trata de un motor paso a paso de cuatro fases. Para el control de dicho motor se ha empleado un driver basado en el chip ULN2003A [20]. De este modo se evita que el Arduino deba suministrar corrientes elevadas al motor y se protege la electrónica.

Toda la cámara ha sido diseñada con el objetivo de poder ser transportada en un dron. Si bien el modelo del dron es indiferente, en este Trabajo de Fin de Máster las pruebas se han realizado empleando el dron Matrice 600 de DJI [9], cuyas especificaciones se adjuntan en la tabla 3.2.

Distancia entre ejes diagonales (mm)	1133
Dimensiones de la aeronave (mm)	1668 x 1518 x 759
Cantidad de baterías de vuelo inteligente	6
Peso (kg)	9.1
Velocidad angular máx. (°/s)	300
Ángulo máx. de inclinación (°)	25
Velocidad máx. de ascenso (m/s)	5
Velocidad máx. de descenso (m/s)	3
Resistencia al viento máx. (m/s)	8
Velocidad máxma (m/s)	18 (sin viento)
Tiempo en vuelo estacionario (min)	35 (sin carga útil)

**Tabla 3.2:** Especificaciones del dron M600 de DJI

Los filtros empleados han sido del fabricante Omega Óptico [31]. En concreto, los filtros empleados se detallan en la tabla 3.3.

Banda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Diámetro (mm)	Transmitancia (%)	Precio (\$)
475	20	25	>=92	200
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/475af20-25r.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/475af20-25r.html</a>				
550	20	25	>=85	175
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/550bp20-rapidband.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/550bp20-rapidband.html</a>				
560	20	25	>=85	175
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/560bp20-rapidband.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/560bp20-rapidband.html</a>				
668	10	25	>=85	175
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/670bp20-rapidband.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/670bp20-rapidband.html</a>				
717	10	25	>=85	200
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/710af40.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/710af40.html</a>				
840	40	10	>=70	61
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/850bp30.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/850bp30.html</a>				
700	10	25	>=85	200
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/695bp10-rapidband.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/695bp10-rapidband.html</a>				
807.5	20	25	>=60	131
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/807-5df20.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/807-5df20.html</a>				
<700	400-700	25	>=90	100
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/shortpass/700sp-rapidedge.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/shortpass/700sp-rapidedge.html</a>				
330	80	25	>=75	200
<a href="https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/330wb80-1801.html">https://www.omegafilters.com/products/filters/bandpass/330wb80-1801.html</a>				

**Tabla 3.3:** Filtros empleados en el proyecto

En este Trabajo de Fin de Máster se han empleado cuatro sensores CMOS, para poder comparar sus prestaciones, dos pertenecientes a cámaras del fabricante ELP [10] y dos pertenecientes a cámaras del fabricante IDS [17]. Los sensores de las cámaras ELP son el IMX179 5-50mm ([38]) de Sony y el AR0130 1/3 ([35]) de ON Semiconductors [36]. Por otro lado, los sensores de la marca IDS son el uEye 3360CP NIR ([19]) y el uEye 3240LE ([18]), ambos del fabricante CMOSIS [7]. Una comparativa más detallada puede verse en la tabla 3.4. Si bien estos sensores emplean todos la tecnología CMOS, tienen unos precios muy diferentes: entre 30 y 50€ los sensores ELP y entre 600 y 1300€ los sensores IDS. El proceso de caracterización sirve para comprobar si la diferencia de precio se traduce en una mejora en las prestaciones de la cámara.

Nombre	Tipo	Resolución (píxeles)	Velocidad máxima (fps)
IMX179	CMOS	3264x2448	30
AR0130 1/3	CMOS	1280x960	30
3360CP NIR	CMOS	2048x1088	152
3240LE	CMOS	1280x1024	60

**Tabla 3.4:** Tabla comparativa de los sensores empleados

En cuanto a las referencias necesarias en los procesos de calibración y caracterización, en este Trabajo de Fin de Máster, se ha empleado la referencia de blanco de la marca

*Sphere Optics* [40] *Zenith Polymer Reflectance Standards* [41], y el polímero *Zenith Polymer Spectralon* [42], de la misma marca.

## 3.2 Desarrollo de la Cámara

En este apartado se detalla el proceso que se ha seguido para diseñar y desarrollar la cámara espectral. Dicho proceso ha sido dividido en tres tareas principales. El diseño mecánico, el diseño electrónico y el desarrollo del software.

### 3.2.1 Introducción

Como se detalló en el capítulo 2, forma parte de los objetivos de este proyecto el diseñar una cámara cuyas dimensiones y peso sean lo más reducido posible, así como una estructura modular, que permita modificar de forma cómoda los elementos que la componen, ajustando así sus características a diferentes aplicaciones. Si bien la naturaleza modular permite utilizar la cámara para diferentes aplicaciones, la principal aplicación y aquella que se ha tenido en cuenta para realizar el diseño de la misma es la *agricultura de precisión*. Es por ello que se ha partido de la base de que se necesita una cámara *multiespectral*, dado que el número de bandas necesarias es reducido así como conocido. Por otro lado, se requiere una cámara con la mayor resolución espacial posible, dado que esto facilita el proceso de registro de las imágenes que permitirá crear un mapa de los terrenos que se sobrevuelen. Por ello, si bien se ha probado a realizar diferentes diseños, como el de una cámara tipo *snapshot*, se ha decidido diseñar una cámara multiespectral tipo *staring*, basada en rueda de filtros. Algunas de las ventajas de la cámara tipo *staring* son la utilización de un único sensor, la sencillez de su funcionamiento, su resolución espacial, o su facilidad de uso y control.

### 3.2.2 Diseño Mecánico

Para el diseño de la estructura exterior de la cámara se ha empleado el software de modelado 3D *SolidWorks*. Este software permite exportar los modelos en formato *.stl* que son interpretados correctamente por el software (*Ultimaker Cura 4.0*). Este software genera el archivo de impresión que interpreta la impresora 3D de la Universidad. La estructura de la cámara se ha ido perfeccionando y modificando enormemente con el paso de los meses, probándose numerosas variaciones y modelos diferentes.

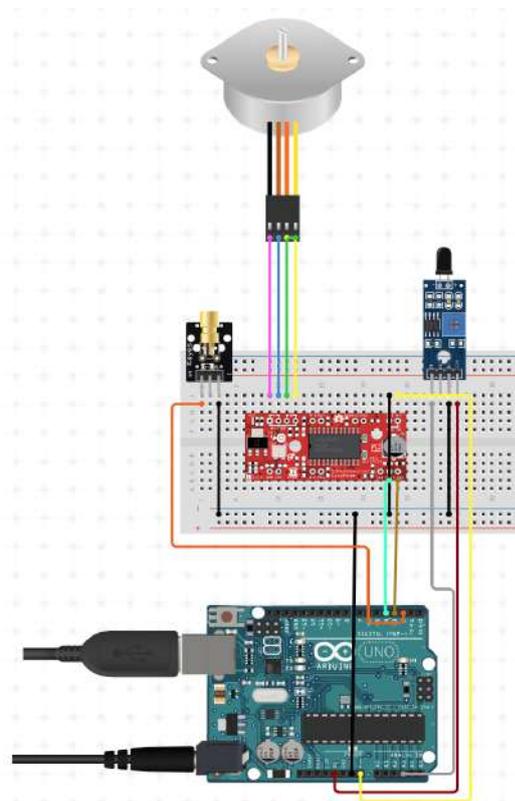


**Figura 3.2:** Modelo 3D de la estructura modular de la cámara

Aún así, todos estos modelos tienen determinadas características en común. En primer lugar, tienen una pieza principal, en la cual se acoplan tanto el sensor como el motor, que será el encargado de mover la rueda de filtros. Esta pieza cuenta a su vez con una hendidura en la cual se coloca la rueda de filtros. La rueda de filtros está diseñada de forma que sea posible sustituir cómodamente los filtros, permitiendo cambiarlos de lugar o intercambiarlos por otros, sin necesidad de desmontar por completo la cámara. La rueda de filtros consta de un eje al cual se le acopla una correa de transmisión que la conecta con el eje del motor. Los filtros se protegen mediante una segunda pieza que cubre la rueda y que sirve de carcasa exterior de la cámara. Por el lado opuesto, otra pieza de plástico separa el sensor y el motor de la placa Odroid. La posición de la placa Arduino ha variado dependiendo del modelo de dicha placa, ya sea el modelo UNO o Nano, puesto que su dimensión varía mucho. En el caso de emplear el Arduino UNO, se ha colocado junto a la placa Odroid, mientras que con la placa Arduino Nano, es más cómodo ubicarla próxima al motor, facilitando las conexiones.

En un primer diseño se optó por emplear un servomotor, debido al bajo consumo de este tipo de motores, a su velocidad y capacidad de posicionamiento. El inconveniente de este tipo de motores es que en su gran mayoría solo tienen un movimiento de 180°. Si bien existen servomotores multivuelta, no son fáciles de adquirir y tienen un

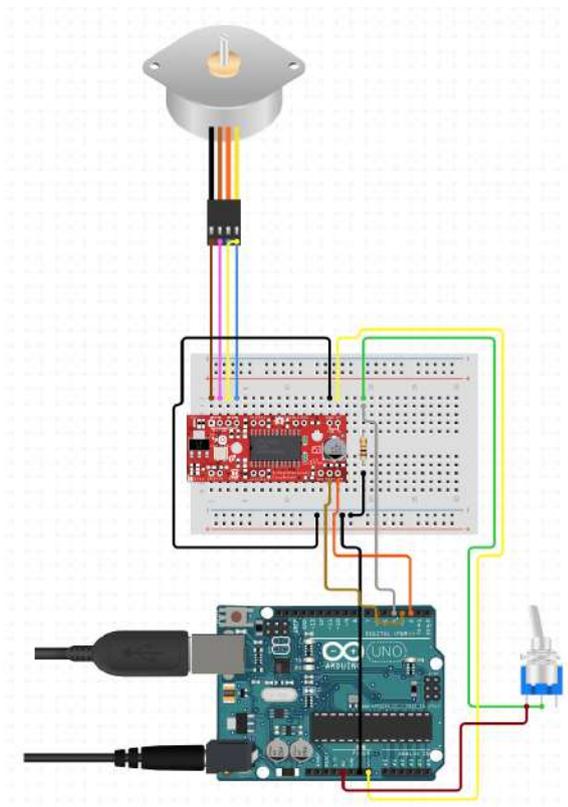
precio y características fuera del alcance de este proyecto. Para mover la rueda los 360° empleando un servomotor de 180° se empleó un multiplicador mecánico. Sin embargo, al probar dicho mecanismo se comprobó que este elemento multiplicador empeoraba la precisión del movimiento, un aspecto fundamental en el diseño de la cámara, dado que es de suma importancia que los filtros queden perfectamente alineados con la óptica de la cámara y con el sensor. Por ello, en una segunda versión de la cámara, dicho servomotor fue sustituido por un motor paso a paso. Estos motores tienen completa libertad de movimiento, permitiendo girar la rueda de filtros ilimitadamente. El problema de los motores paso a paso es conocer la posición en la que se encuentra el motor. Principalmente, al inicializar la cámara, si no es posible conocer en qué posición se encuentra el motor, no es posible posicionarlo correctamente de manera fiable y automática. Por lo tanto, es necesario añadir un nuevo componente al sistema que facilite información acerca de la posición del motor, a modo de final de carrera.



**Figura 3.3:** Esquema del circuito electrónico con el láser y el detector como final de carrera

Para determinar de manera inequívoca la posición inicial del motor paso a paso se planteó un final de carrera basado en un láser y un detector. Al añadirle un orificio a la rueda de filtros, y colocar el láser y el detector a ambos lados de la rueda, es posible determinar en qué posición se encuentra la rueda, simplemente

girándola hasta que la señal digital conectada al detector se active, significando esto que el láser está atravesando el orificio de la rueda de filtros y por tanto, que el motor se encuentra en una posición conocida. Este mecanismo fue implementado y empleado satisfactoriamente durante todas las pruebas realizadas en el laboratorio. Sin embargo, cuando se probó dicho sistema en condiciones reales de campo, la luz del sol modificaba el funcionamiento del mecanismo de final de carrera, por lo que fue necesario sustituirlo por otro mecánico. Este último sistema consta de una solapa metálica conductora que, llegada la rueda a una determinada posición conocida, cierra un circuito activando una señal digital. Este mecanismo de final de carrera ofrece una mayor sencillez que el anterior, así como una mayor robustez frente a las condiciones de trabajo.



**Figura 3.4:** Esquema del circuito electrónico con final de carrera mecánico

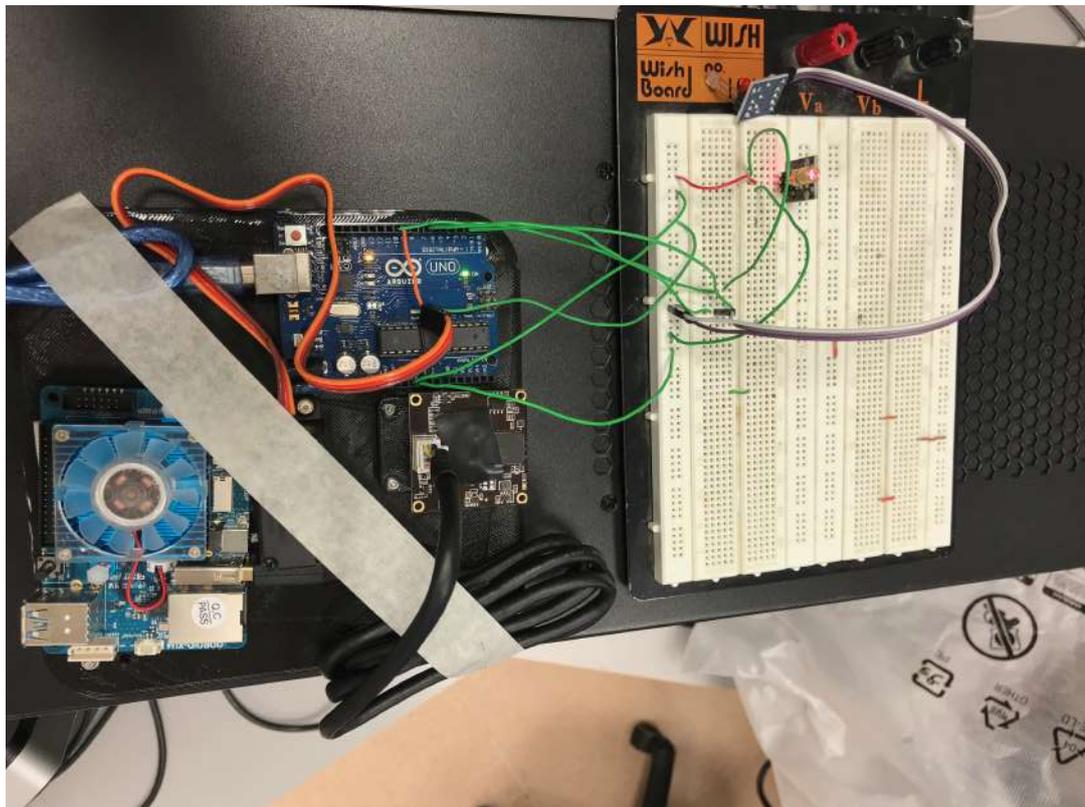
Por último, ha sido necesario diseñar una pieza que facilite el acople de la cámara tanto al dron, como a un trípode empleado para realizar pruebas.

### 3.2.3 Diseño Electrónico

Este apartado detalla en qué consiste el diseño de la cámara a nivel electrónico. Para realizar el diseño electrónico se ha tratado de seguir un planteamiento análogo al de la estructura de la cámara. Un diseño con elementos fácilmente intercambiables o

modificables y el menor número de dependencias posibles.

El elemento principal es el procesador, dado que será el encargado de gestionar todo el proceso de captura, el movimiento de la rueda o la comunicación con los procesos de vuelo del dron. La placa monoprocesador Odroid es la encargada de controlar todos estos aspectos. Se ha seleccionado la placa Odroid dado que es la que actualmente gestiona los procesos de control de vuelo del dron M600 en el proyecto PLATINO. Si bien el control de la cámara puede realizarse desde cualquier sistema con Linux, aprovechar la misma placa para controlar tanto el vuelo del dron como gestionar la funcionalidad de la cámara espectral facilita las comunicaciones, abaratando lógicamente también el coste del sistema.



**Figura 3.5:** Proceso de prototipado del circuito electrónico mediante una *protoboard*

Para facilitar el control del motor paso a paso se ha empleado la placa Arduino. Esto se debe a que las señales digitales que controlan el driver del motor paso a paso han de ser de 5V, mientras que los pines de salida de la placa Odroid son de 3,3V. Por tanto se requeriría un convertidor de algún tipo. Por otro lado, las librerías ya existentes para el control de una gran variedad de sensores y actuadores con

Arduino también suponen un aliciente para escoger dicha placa como controlador del motor paso a paso. Ambas placas se comunican a través de una comunicación serie, empleando un protocolo de comunicación sencillo basado en una colección de mensajes específicos que permiten el control de los dispositivos conectados al Arduino. El tener una placa Arduino incluida en la plataforma de adquisición supone cierta ventaja, ya que permite incluir dispositivos adicionales al sistema de forma relativamente sencilla si fuese necesario.

La placa Odroid, al igual que el Arduino, se alimenta directamente con 5V provenientes de una fuente de alimentación externa y completamente independiente del dron. En este Trabajo de Fin de Máster se ha empleado una batería de polímero de ion litio de tres celdas, con 11.5 V y 1500 mAh. Esta batería alimenta también al motor paso a paso. Por tanto, se emplea un conversor que asegura 5 V a su salida para tensiones de entrada de entre 9 y 25 V.

Por último, el sistema cuenta con un dispositivo trasceptor de red móvil UMTS. Se trata de un dispositivo que se conecta a la placa Odroid por USB y que contiene una tarjeta SIM, permitiendo las comunicaciones con la placa Odroid a través de la red de telefonía móvil. Este será el sistema que se utilice para comunicaciones con la cámara durante vuelos con el dron. Este dispositivo USB permite tomar fotografías de forma *manual*, aunque, por lo general, las capturas se harán de forma automática durante las misiones del dron.

### 3.2.4 Desarrollo del Software

En este apartado se detalla el proceso de desarrollo del software necesario para configurar y controlar la cámara espectral. Principalmente, el software desarrollado debe poder realizar las siguientes tareas: controlar correctamente el sensor, controlar correctamente la rueda de filtros y acoplarse correctamente en el resto del sistema de control de vuelo del dron.

Para el control del sensor se ha desarrollado el software en C++. Los sensores de diferentes fabricantes cuentan con distintas SDKs, por lo que parte del software desarrollado es propio de cada sensor, de modo que el software a utilizar varía en función del sensor que se vaya a emplear. Con el objetivo de que el diseño sea lo más modular posible, y que el código esté lo más desacoplado posible, gran parte del software es común para los diferentes sensores. El control de los sensores es particularmente importante. Hoy en día, los sensores vienen configurados por defecto para ajustar automáticamente los distintos valores que modifican el comportamiento del mismo para tratar de ayudar al usuario a tomar fotografías de mejor calidad de

forma sencilla. Sin embargo, para las aplicaciones en las que se pretende usar los sensores en este Trabajo de Fin de Máster, esto resulta un inconveniente, dado que modificar los tiempos de exposición, ganancia, etc. entre captura y captura puede desvirtuar o falsear completamente los resultados. Por ello, es importante que tras calcular el tiempo de exposición y la ganancia óptimos para cada filtro durante la calibración, estos sean los valores con los que se capturen todas las imágenes a través de ese determinado filtro.

Igual de importante es el control del motor paso a paso. El proceso de la cámara espectral que se ejecuta en la placa Odroid debe saber qué filtros se van a usar durante la misión de muestreo, en qué posición se encuentra la rueda de filtros en todo momento, con qué filtro y en qué momento se ha capturado cada fotografía, etc. Si bien el movimiento del motor es controlado exclusivamente por la placa Arduino, toda la *inteligencia* del sistema recae en la placa Odroid. Es decir, el programa desarrollado en código Arduino únicamente recibe mensajes por el puerto serie que le indican cuántas posiciones de la rueda de filtros debe moverse. El Arduino cuenta con los métodos de control del motor y del fin de carrera necesarios, para realizar estas acciones. Es el proceso principal, que se ejecuta en la placa Odroid, el que lleva el control de en qué posición se encuentra el motor (y la rueda) en todo momento, cuántas posición ha de moverse y en qué dirección debe hacerlo. A su vez, este proceso es el encargado de recibir las órdenes del sistema de control de vuelo, que le indica en qué momento inicializar la cámara, en qué momento comenzar a tomar fotografías y con qué filtros, y en qué momento detenerse.

Para el control del motor se ha utilizado la librería de Arduino `<CheapStepper.h>`, que ofrece todos los métodos necesarios para ajustar el número de pasos por vuelta, la velocidad del motor, mover el motor en ambas direcciones etc. El protocolo empleado en la comunicación con la placa Arduino consta de dos tipos de mensajes. En primer lugar, los mensajes que envía la placa Odroid a la placa Arduino, que son del tipo `ms1m2#`, donde los primeros tres caracteres, `ms1`, indican el objeto al cual va dirigida la orden, en este caso, *motor stepper 1*. Los siguientes dos caracteres, `m2`, indican la acción a realizar por dicho objeto. En este caso `m` indica *mover* y `1` el número de posiciones de la rueda de filtros que debe moverse. Por último, el carácter `#` indica el fin del mensaje. El programa de Arduino recibe estos mensajes por el puerto serie, los decodifica y ejecuta las órdenes consecuentemente. Cuando ha realizado una orden, la placa Arduino responde un mensaje del tipo `k#` si la orden se ha ejecutado correctamente, o del tipo `e#` en caso de que haya ocurrido algún error.

Por último, para la integración del sistema con los procesos que configuran las misiones y controlan el vuelo del dron, se ha hecho uso de los espacios de memoria compartida de los sistemas Linux (*shared memory*) y archivos de configuración *XML*. De este modo, al iniciarse el proceso de control de vuelo, se inicia también el

proceso de control de la cámara espectral desarrollado en este trabajo, el cual se ejecuta como un proceso independiente. En este proceso se configuran diferentes punteros a una memoria compartida por los distintos procesos ejecutados en el sistema, y se leen los ficheros de configuración donde se especifica cual debe ser el comportamiento de la cámara espectral en la misión. Al iniciarse, el proceso de control de la cámara espectral lee el fichero XML que cuenta con todos los parámetros necesarios para configurar la cámara, tales como qué filtros se van a usar en la misión, qué tiempo de exposición y ganancia debe fijar para cada filtro, etc. Una vez realizada la inicialización de la cámara, el proceso se queda en estado de espera, leyendo continuamente el puntero a la memoria compartida que le indica el comienzo de un proceso de captura. El vuelo del dron está configurado de forma que recorre longitudinalmente áreas rectangulares. Cada trayecto se considera un camino nuevo, y las imágenes capturadas de cada trayecto se almacenan en directorios diferentes. Cuando el dron termina un trayecto y comienza a girar para orientarse correctamente para realizar el trayecto de vuelta, la cámara no debe seguir tomando fotos, pero sí debe retomar la captura una vez se inicie un nuevo trayecto, almacenando dichas imágenes en su correspondiente carpeta (que ha de ser creada en caso de no existir previamente). Para ello, el proceso de control de la cámara, por medio de la memoria compartida, es capaz de leer cuándo se inicia un trayecto, cuando termina el trayecto, cuando se inicia un nuevo trayecto y cuando finaliza la misión debe apagarse la cámara.

### 3.3 Calibración

La calibración tiene como objetivo independizar los resultados obtenidos de la respuesta espectral del sistema de adquisición (sensor, óptica, filtros...) de las condiciones de iluminación. La calibración de la cámara espectral es un procedimiento imprescindible en todo proceso de captura. Esto es así, dado que es necesario para poder obtener imágenes de calidad, correctamente interpretables. Dentro de las mediciones que se realizan en la tecnología espectral, es posible diferenciar entre los procesos en los cuales se captura la energía *reflejada* por el objeto a medir, y el proceso en el cual se captura la energía *absorbida* por el objeto a medir. Por ejemplo, cuando se trabaja a escala microscópica, y se desea obtener la firma espectral de una célula, la técnica más útil y la más empleada es la de medir la absorción de la célula o del tejido en cuestión. Para ello, se coloca una fuente de luz bajo la muestra en el microscopio, y se mide qué cantidad de luz atraviesa la muestra. Por otro lado cuando se trabaja a escala macroscópica, como en aplicaciones de *teledetección*, se suele proceder calculando la cantidad de energía reflejada por el objeto a medir. En ambos casos, es importante representar la cantidad de energía capturada como un porcentaje relativo a la cantidad de luz incidente en la

escena fotografiada. De otro modo resultaría imposible interpretar correctamente los valores obtenidos debido a las diferencias en la respuesta espectral de los sistemas de adquisición y a las diferencias en las condiciones de iluminación. Por ello, antes de realizar un muestro espectral, es necesario realizar previamente una calibración espectral para así conocer los valores máximos y mínimos que se pueden capturar en las condiciones exactas en las que se va a realizar el proceso de muestreo.



**Figura 3.6:** Referencia de blanco empleada para la calibración

Para obtener los valores máximos que pueden ser capturados por la cámara en las diferentes longitudes de onda para unas condiciones de iluminación determinadas, se capturan imágenes de un material denominado *referencia de blanco* que tiene un índice de reflectancia muy alto. Se trata de un material capaz de reflejar casi por completo la luz que recibe, y con muy pocas variaciones a lo largo del espectro electromagnético. Muestreando la referencia de blanco, obtenemos los valores máximos que es capaz de capturar el sensor para cada longitud de onda en las condiciones de luz de ese momento. Para el cálculo de los valores mínimos que pueden ser capturados por el sensor, basta con medir qué valores existen en el sensor en completa ausencia de luz. Esto es tan sencillo como tapar el objetivo de la cámara y tomar una fotografía. Por lo general, los niveles de excitación del sensor en ausencia de luz se deben al ruido. Este ruido puede deberse a las imperfecciones del propio sensor o al *ruido térmico*, que varía con la temperatura a la que se encuentre el dispositivo. Una vez tomadas ambas referencias es posible escalar cualquier valor medido por el sensor entre ese máximo y mínimo, de modo que se transformen los valores absolutos a porcentajes de luz reflejada siguiendo la siguiente fórmula:

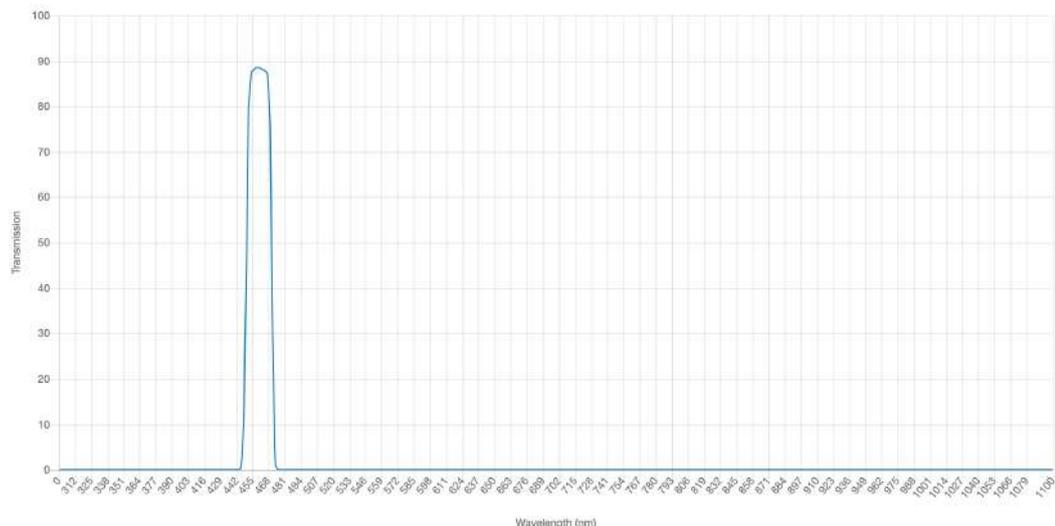
$$VC = \frac{VNC - BR}{WR - BR} \quad (3.1)$$

donde  $VC$  es el valor calibrado,  $VNC$  el valor sin calibrar,  $BR$  el valor de la referencia de negro y  $WR$  el valor de la referencia de blanco.

### 3.3.1 Particularidades de la Calibración

Uno de los objetivos de la calibración es el de asegurar un tiempo de exposición adecuado a la cámara que evite que se capturen las fotos sobreexpuestas o demasiado oscuras. Si no se realiza la calibración, es posible que las imágenes capturadas salgan saturadas en los días de mucho sol, perdiéndose información; o demasiado oscuras en los días de poca luminosidad, suponiendo también una pérdida de información. En el caso de la cámara con rueda de filtros diseñada en este Trabajo de Fin de Máster, esto supone un trabajo extra debido a las particularidades que añade cada filtro. Por lo general, los filtros a instalar en la rueda de filtros son de *paso banda*. Esto significa que cada filtro tiene un ancho de banda en el cual se permite el paso de la luz, variable y centrado en diferentes longitudes de onda del espectro.

En primer lugar, un filtro con un ancho de banda mayor, permitirá, irremediablemente, el paso de más cantidad de energía, de modo que el tiempo de exposición de la cámara debe disminuir cuando se capture con ese filtro para evitar que esa cantidad de energía sature la imagen. Por otro lado, un filtro con un paso de banda muy estrecho, permite el paso de muy poca energía, obteniéndose imágenes más oscuras, obligando a emplear tiempos de exposición más altos. Del mismo modo, la cantidad de luz que absorbe y transmite cada filtro, dependerá también de la *transmitancia* que tenga cada filtro. Esta propiedad se da en tanto por ciento, e indica qué porcentaje de la energía lumínica que recibe el filtro, en una longitud de onda específica, es capaz de atravesarlo. En la imagen 3.7 se observa la gráfica de transmitancia, en este caso del filtro 460BP20, que facilita el fabricante.



**Figura 3.7:** Transmitancia del filtro 460BP20

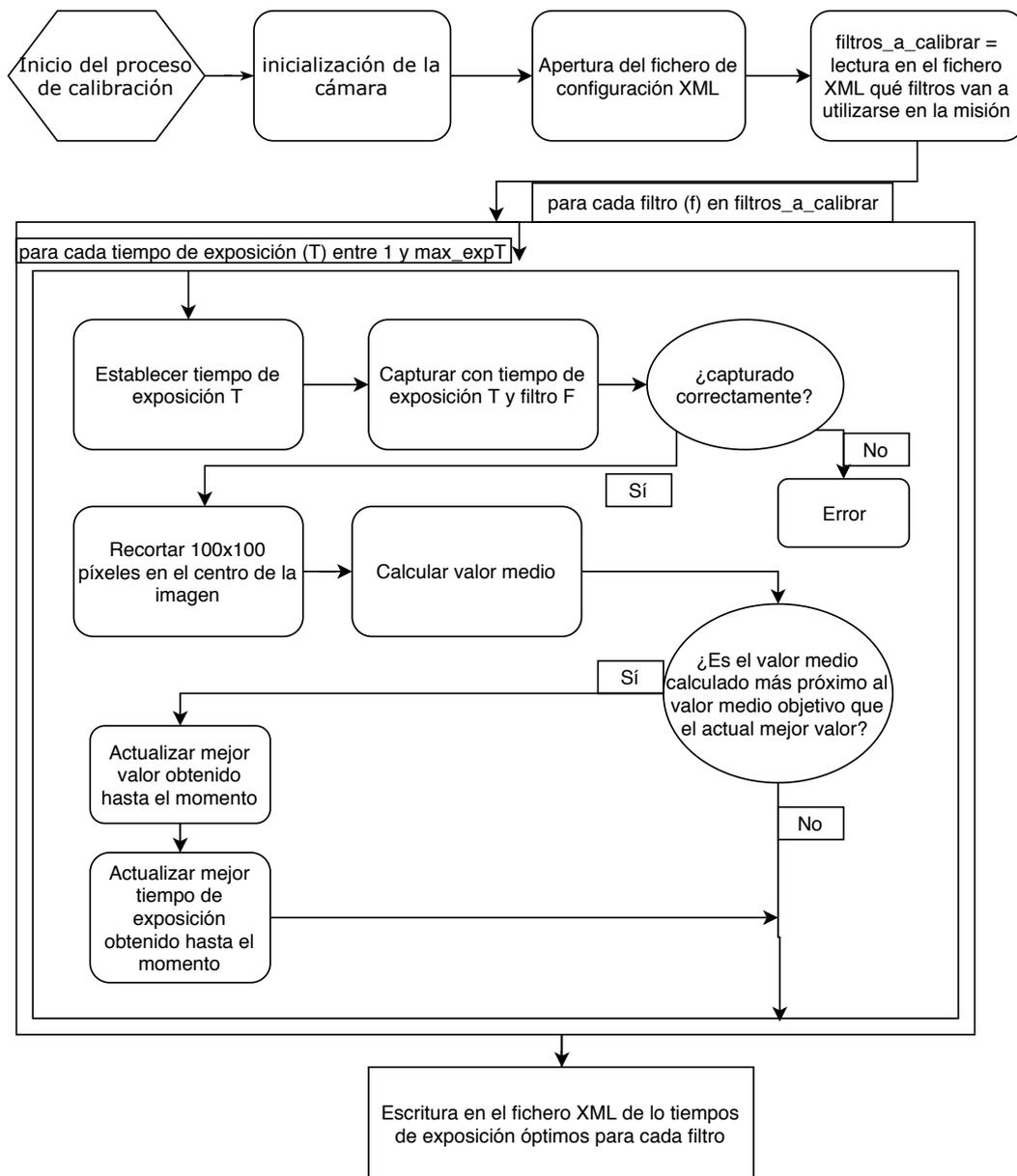
Por otro lado, como se observó en la imagen 1.4, la sensibilidad de los sensores varía a lo largo del espectro. Esto significa que si un filtro está centrado en una longitud

de onda en la cual el sensor empleado es menos sensible, la cantidad de luz que capturará será menor, y por tanto, habrá que aumentar el tiempo de exposición. Sin embargo, cuando el filtro paso banda está centrado en una longitud de onda en la que el sensor es muy sensible, es posible que los valores capturados sean muy altos; en ese caso sería necesario disminuir el tiempo de exposición para evitar pérdidas de información debido a imágenes saturadas.

Todo esto supone que cada filtro debe tener un tiempo de exposición diferente, que además varía con las condiciones ambientales en el momento en el que se va a realizar la captura. Por ello, dadas las particularidades de la cámara diseñada en este proyecto, se ha desarrollado un programa en C++ encargado de automatizar todo el proceso de calibración, facilitando así la utilización de la cámara. La metodología de calibración es sencilla. En primer lugar, el programa inicializa la cámara y comprueba que todas las conexiones se encuentran en un estado correcto. A continuación, se procede a calibrar la cámara con el primer filtro. Para ello, se realiza un barrido de los tiempos de exposición, del menor permitido por la cámara, hasta el mayor. Con cada tiempo de exposición se capturan diez imágenes, de las cuales se calcula el valor medio de luminosidad en la imagen en escala de grises. Este valor medio se compara con el valor medio objetivo, especificado previo a la calibración. Dado que para la calibración se capturan imágenes de la referencia de blanco, el valor medio objetivo debe ser cercano al valor máximo del formato de imagen que se emplea. A modo de ejemplo, si las imágenes se capturan con precisión de 8 bits, el valor máximo que puede almacenar un píxel al saturar será de 255. En este caso, se establecería un valor medio objetivo cercano a 200. Por tanto, si la referencia de blanco, que teóricamente refleja más energía que cualquier otro elemento, excita el sensor hasta un valor cercano al máximo pero sin llegar a saturarlo, nos aseguraremos que cualquier elemento que se capture posterior a la calibración, que tendrá un índice de reflectancia menor que el del blanco absoluto, no saturará la imagen. Lógicamente, los resultados obtenidos dependen directamente de la luz exterior existente en cada momento, que puede variar entre captura y captura, alterando los valores de la calibración o perjudicando los resultados obtenidos. Por ello, siempre se trabaja con un margen de valores y el valor máximo objetivo de la calibración no es el valor máximo permitido por el formato de almacenamiento de las imágenes. El objetivo del proceso de calibración desarrollado es encontrar el tiempo de exposición más alto que no sature la imagen tomada de la referencia de blanco. De esta forma, para el tiempo de exposición y ganancia fijados a un valor determinado para un filtro concreto, se asegura que cualquier elemento fotografiado tendrá un valor escalado entre 0 (el valor mínimo) y 200 (el valor máximo, reflejado por la referencia de blanco). Un problema de este procedimiento radica en la variación del incremento relativo que supone el ir aumentando el tiempo de exposición en el valor medio capturado por el sensor. Es decir, para valores altos de tiempo de exposición ( $\approx 300ms$ ) un aumento de 1ms supone un incremento en el valor medio muy reducido, con lo cual se consigue un ajuste del valor medio deseado muy

fino. Sin embargo, cuando el tiempo de exposición aumenta de 1ms a 2ms, se está duplicando dicho tiempo de exposición, traduciéndose esto en un aumento enorme en el valor medido por el sensor, dando resultado a un *ajuste grueso*. Esto supone que el valor medio calculado puede variar con un paso muy amplio, impidiendo alcanzar el valor objetivo. Por ello, la metodología propuesta calcula un factor obtenido al dividir el valor medio más cercano al valor medio objetivo entre el valor medio objetivo. Este factor permite corregir posteriormente las diferencias entre ambos valores, debido al ajuste grueso explicado previamente. Cuando los tiempos de exposición son relativamente elevados y se alcanza un *ajuste fino* del tiempo de exposición este factor toma valores muy cercanos a 1.

Este proceso de barrido en tiempo de exposición se repite para cada filtro. El campo de visión de la óptica de la cámara hace muy complicado que la totalidad de la imagen esté comprendida dentro de la referencia de blanco. Por ello, para evitar que los píxeles que no pertenecen a la referencia de blanco influyan en el cálculo del valor medio, la imagen se recorta a un área de cien por cien píxeles en el centro de la misma, calculándose el valor medio dentro de este área. Por tanto, se está suponiendo una sensibilidad idéntica en todas las células fotosensibles que componen el sensor, obviándose las variaciones en sensibilidad que existen a lo largo del sensor.



**Figura 3.8:** Diagrama de flujo del algoritmo de calibración

Dado que cada filtro necesita un tiempo de exposición diferente, los valores calculados durante la calibración deben ser almacenados para emplearse posteriormente durante la misión de muestreo a bordo del dron. Para ello se ha seguido con la metodología empleada por el IUMA en el resto del software de control del vuelo del dron en el proyecto PLATINO. Esto es, se ha creado un archivo XML mediante el cual se gestiona toda la información persistente relacionada con la cámara multispectral. El programa encargado de automatizar la calibración de la cámara, una vez calculados los tiempos de exposición óptimos para cada filtro, así como los factores de corrección adecuados, los escribe en el fichero de configuración XML de la cámara. De este modo, cuando la cámara se encuentre ejecutando una misión en el dron,

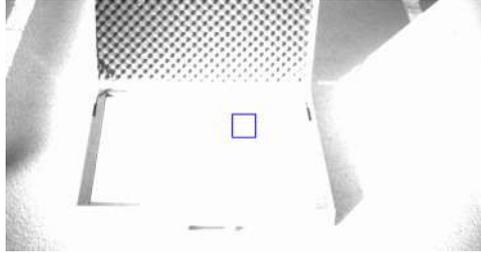
leerá dicho fichero y reajustará el tiempo de exposición siempre antes de capturar con el filtro deseado. Para la creación, escritura y manejo de ficheros XML se ha empleado la librería *pugixml* [22].



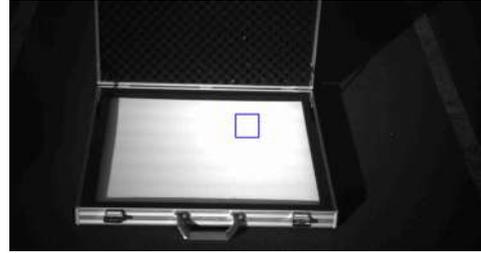
**Figura 3.9:** Cámara acoplada al trípode para realizar la calibración

Por tanto, antes de realizar un vuelo con el dron para capturar imágenes, siempre se realiza una calibración. Si bien el proceso es automático, es necesario colocar la cámara en un trípode desde el cual se capture la referencia de blanco (Figura 3.9). Por lo general, el transceptor USB conectado a la placa Odroid permite, mediante una conexión SSH, iniciar el proceso de calibración desde cualquier ordenador, así como comprobar que todo el proceso se ha realizado correctamente, consultar los valores almacenados en el XML, etc. Antes de iniciar el proceso de calibración automático es necesario comprobar que la cámara está, de hecho, centrada en la referencia de blanco. Para ello, el algoritmo de calibración dibuja un cuadrado sobre

la imagen destacando el área del cual va a obtener el valor medio que será utilizado en la calibración, y guarda dicha imagen con baja calidad (aplicando una tasa de compresión elevada) para que pueda ser transmitida y visualizada por el usuario sin consumir demasiados datos móviles. (Figura 3.10).



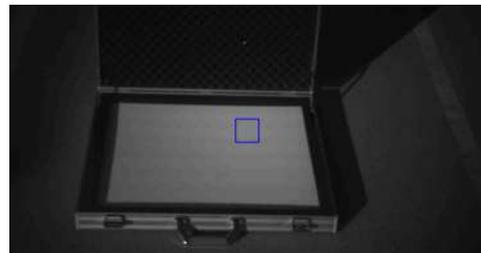
**Figura 3.10:** Imagen guía en el proceso de calibración obtenida sin emplear ningún filtro



**Figura 3.11:** Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 560nm



**Figura 3.12:** Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 670nm



**Figura 3.13:** Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 807.5nm

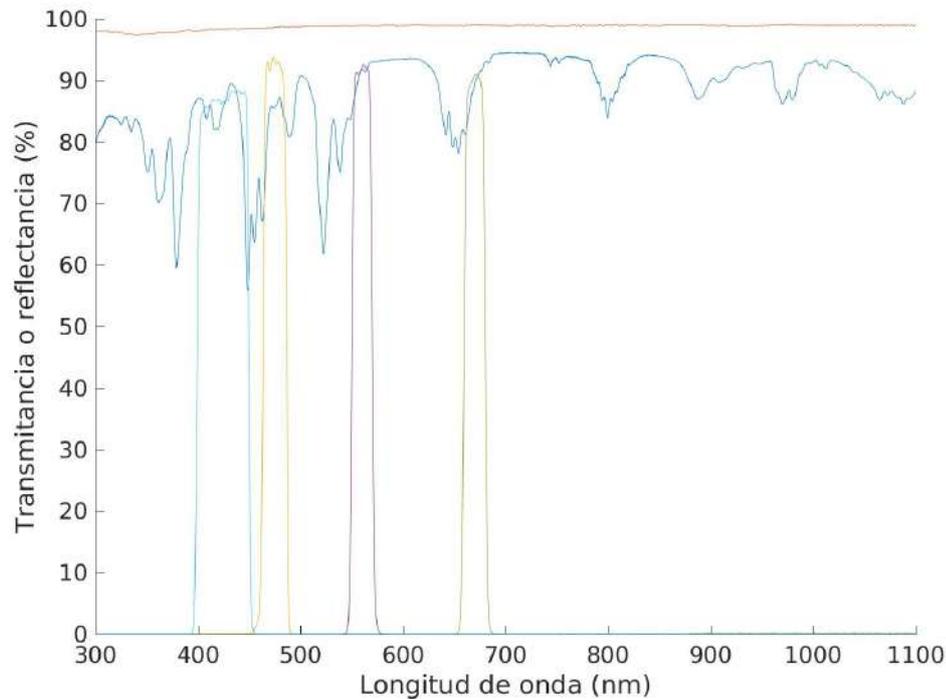
## 3.4 Caracterización

La caracterización es el proceso por el cual se cuantifica el desempeño de un sistema. Es decir, al caracterizar un sistema o una herramienta estamos valorando numéricamente cómo de bien realiza dicho sistema sus tareas. Esto es muy importante dado que nos aporta información sobre cómo de fiables son los resultados que obtenemos de dicho sistema.

Cuando se diseña y se desarrolla un sistema completamente propio, la caracterización adquiere una función doblemente importante. Por un lado, caracterizando los diferentes elementos que forman el sistema, podemos cuantificar su nivel de precisión y exactitud, permitiendo así comparar diferentes elementos y elegir el más conveniente en función de las especificaciones perseguidas en el diseño. Por otro lado, la caracterización del sistema completo permite cuantificar cómo de bueno ha sido el resultado final y el sistema en su conjunto.

### 3.4.1 Introducción

Una parte importante del trabajo realizado en este proyecto consiste en desarrollar una *metodología* de caracterización para cámaras espectrales. Como ya se ha explicado, hoy en día la forma de interpretar las cantidades de energía reflejada o absorbida por los diferentes elementos en las diferentes longitudes de onda es comparándolas con las cantidades máximas y mínimas que es capaz de capturar el sensor. Esto implica una serie de limitaciones cuando se trabaja con más de una cámara espectral, dado que cada una muestrea en función de un sistema de referencia local, dependiente de valores de referencia (el máximo y el mínimo que puede muestrear el sensor) individuales y propios de cada cámara y cada sensor. El proceso de caracterización pretende cuantificar cómo de precisa es una cámara espectral. De este modo, si se conocen las prestaciones de las diferentes cámaras espectrales con las que se trabaja, así como sus limitaciones, es posible interpretar correctamente los resultados obtenidos por estas. En el caso de la cámara espectral desarrollada en este trabajo, la caracterización toma un valor doble. Por un lado, al tratarse de una cámara de diseño y desarrollo propio, la caracterización permite conocer cómo de bien es el desempeño de dicha cámara, para poder valorar si los resultados del desarrollo son satisfactorios. Por otro lado, poder cuantificar la precisión de la cámara permite comparar el desempeño del sistema cuando se emplean diferentes elementos, como diferentes sensores o filtros. Esto va a permitir obtener la información que ayude a seleccionar qué elementos emplear en el sistema y cuales no, así como comparar cómo varía la eficacia de la cámara cuando se emplean sensores de diferentes precios, se captura en diferentes formatos de imagen, etc. Conocer si las diferencias de precio que existen en los sensores se traduce en un aumento significativo de la precisión de la cámara es información muy relevante, dado que uno de los objetivos principales de este trabajo es el de desarrollar una cámara espectral con el menor coste posible. La caracterización del sistema se ha realizado para cuatro sensores diferentes empleando a su vez cuatro filtros distintos.



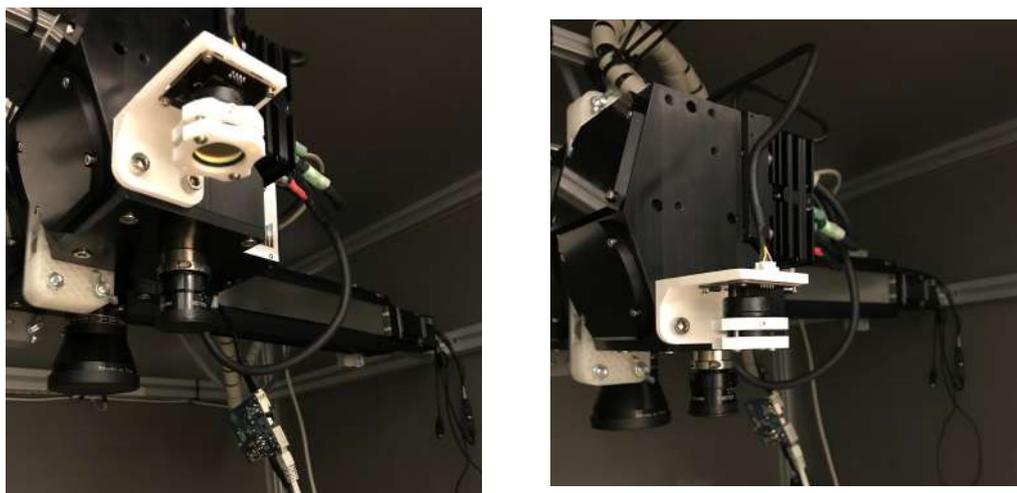
**Figura 3.14:** Firmas espectrales de la referencia de blanco, polímero y filtros caracterizados

### 3.4.2 Descripción del Proceso

Para caracterizar la cámara espectral se ha empleado un polímero del cual se tiene certificada su firma espectral. Comparando los valores obtenidos por la cámara al muestrear dicho polímero con los valores teóricos de su firma espectral se puede obtener la diferencia entre ambos valores, siendo esta el error cometido por la cámara.

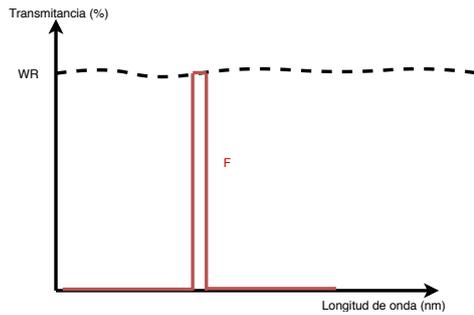
Para realizar dicha comparación es necesario obtener ambos valores, el teórico y el real obtenido por la cámara. Para obtener el valor real, se ha colocado la cámara espectral en el sistema de captura del laboratorio del IUMA, que cuenta con una lámpara halógena de 150W que emite radiación en un amplio rango del espectro electromagnético. En este cubículo se han capturado imágenes del polímero empleando los diferentes filtros que tiene la cámara. El valor medio de los píxeles que conforman el polímero en la imagen es el valor empleado para comparar con el valor teórico de reflectancia del polímero en cada longitud de onda estudiada.

Para calcular el valor teórico, hay que tener en cuenta cómo afecta el uso de cada filtro al valor muestreado y en qué medida modifica el valor de la firma espectral certificada. Cada filtro tiene diferentes características, siendo las más importantes la longitud de onda en que está centrado el filtro, el ancho de banda del filtro y la transmitancia del mismo.

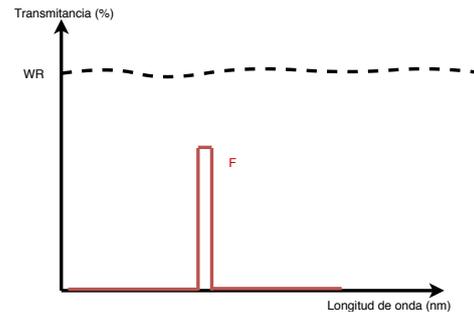


**Figura 3.15:** Sensor y filtro montado en el cajón para realizar el proceso de caracterización

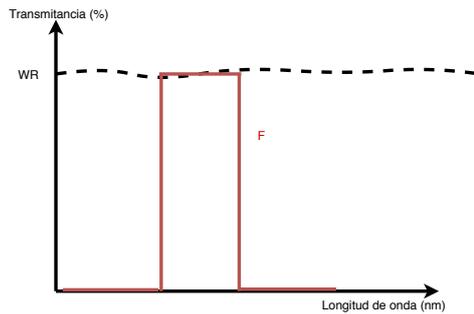
En primer lugar, supóngase un filtro ideal, con un ancho de banda infinitesimal, que permitiera el paso de una única longitud de onda y con una transmitancia ideal, de modo que el 100 % de la energía atravesara el filtro sin pérdidas. Este filtro ideal tendría una forma como la que se muestra en la figura 3.16. En este caso, el valor capturado por la cámara a través de dicho filtro debería ser idéntico al valor de la firma espectral del polímero para esa longitud de onda. En segundo lugar, supóngase un filtro con un ancho de banda ideal, pero una transmitancia no ideal, como el de la figura 3.17. En este caso, no podemos comparar directamente el valor de la firma espectral del polímero con el valor capturado, dado que el valor capturado ha sido modificado por el filtro, reduciendo dicho valor un porcentaje igual al de la transmitancia del filtro. Esto se debe a que un porcentaje de la luz no ha atravesado el filtro. Por tanto, habría que escalar, es decir, multiplicar el valor teórico de la firma espectral del polímero en esa longitud de onda por la transmitancia del filtro empleado, para obtener el valor que se debería haber capturado teóricamente. Hecho esto, es posible comparar dicho valor con el capturado realmente. En un tercer caso, un filtro puede tener la forma de la figura 3.18, es decir, una transmitancia ideal, pero un ancho de banda no ideal. En este caso, el filtro deja pasar más de una banda, sin embargo, el valor que captura la cámara es un único valor para cada píxel. Por ello, para poder compararlo, sería necesario calcular el valor medio de entre los valores que tiene la firma espectral certificada del polímero en el ancho de banda del filtro empleado. Por último, el caso de la figura 3.19, en el que el filtro tiene un ancho de banda no ideal y una transmitancia no ideal. Este caso es combinación de los anteriores, y por tanto, sería necesario calcular el valor medio de la firma espectral en el ancho de banda correspondiente y a su vez, escalar dicho valor según la transmitancia del filtro.



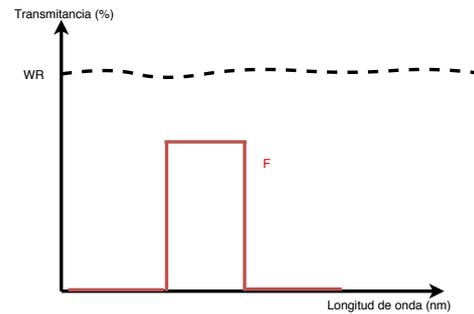
**Figura 3.16:** Transmitancia ideal, ancho de banda ideal



**Figura 3.17:** Transmitancia no ideal, ancho de banda ideal



**Figura 3.18:** Transmitancia ideal, ancho de banda no ideal

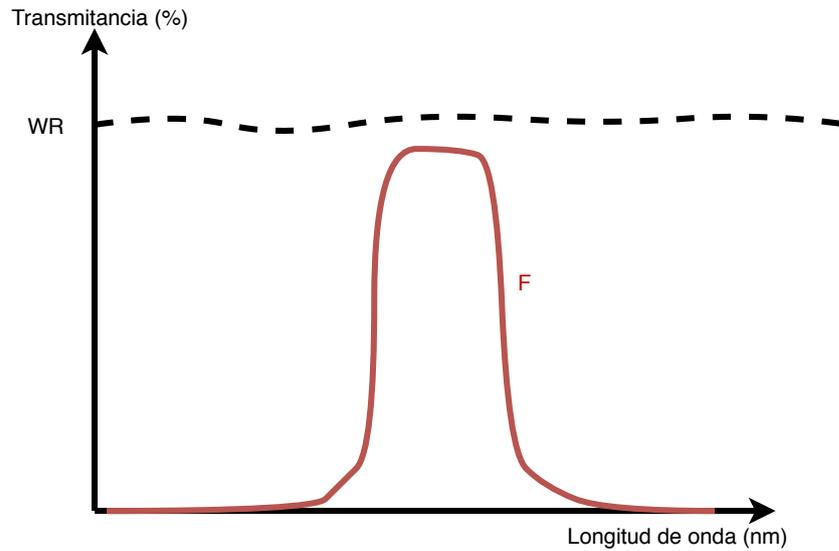


**Figura 3.19:** Transmitancia no ideal, ancho de banda no ideal

Los filtros reales son aún más complejos que este último caso. Tienen una forma similar a la que se observa en la figura 3.20. Por tanto, para comparar el valor real capturado por la cámara con el valor teórico que se espera al emplear dicho filtro, es necesario realizar una serie de cálculos. Una forma de abordar dicha problemática es la de suponer el filtro real como una sucesión de filtros como los del segundo caso (Figura 3.17). Esto es posible dado que, a pesar de la forma en la que se representan las firmas espectrales, y por numerosas que sean las bandas capturadas, no se trata de un valor continuo, sino de un vector de valores discretos. Es posible por tanto, tomar cada valor discreto de la forma del filtro real, que facilita el fabricante del filtro, como un filtro de ancho de banda ideal y transmitancia real. De este modo, si se multiplica el valor de la firma espectral en esa longitud de onda en concreto por el valor de la transmitancia de ese filtro en concreto, se obtendría el valor teórico planteado para ese filtro. Lógicamente, este proceso ha de repetirse a lo largo de la forma del filtro, realizándose un sumatorio que, de alguna manera, supone el cálculo del área de la firma del filtro. Este valor debe escalarse a su vez en función del máximo capaz de capturar empleando dicho filtro. Por ello, el sumatorio se divide entre dicho valor máximo, obtenido de multiplicar el sumatorio de los valores del filtro por los de la firma espectral de la referencia de blanco, como se observa en la ecuación 3.2.

$$VT = \frac{\sum_i F_i \cdot P_i}{\sum_i F_i \cdot WR_i} \quad (3.2)$$

donde  $i$  recorre las longitudes de onda del espectro electromagnético en el rango de interés,  $VT$  es el valor teórico,  $F_i$  el valor del filtro,  $P_i$  el valor del polímero y  $WR_i$  el valor de la referencia de blanco.



**Figura 3.20:** Forma aproximada de un filtro real

Calculado el valor teórico, este se resta al valor real capturado, obteniéndose un error.

En cuanto al valor capturado, se obtiene del valor medio de diez imágenes capturadas del polímero y calibradas con las referencias de blanco y negro. Esto ayuda a suavizar las irregularidades debidas al ruido del sensor. Este proceso se realiza a diferentes niveles de luz, para observar el comportamiento de la cámara en diferentes circunstancias. A su vez, el proceso se repite también colocando el filtro en las dos orientaciones posibles para detectar si se obtienen mejores resultados colocando el filtro de un modo u otro. Por otro lado, se ha caracterizado también guardando las fotografías empleando distintos formatos, algunos con compresión (.JPG) y otros sin compresión (.BMP, .BIN). Con cada una de estas condiciones, se capturan las imágenes del polímero, de la referencia de blanco y de la referencia de negro. Todos estos experimentos se repiten para cada filtro, lo cual significa aproximadamente un total de 500 imágenes ( $\approx 2,5Gb$ ). De este modo se caracterizaría un sensor. El proceso es el mismo para los otros tres sensores, tal y como se observa en el diagrama 3.21.

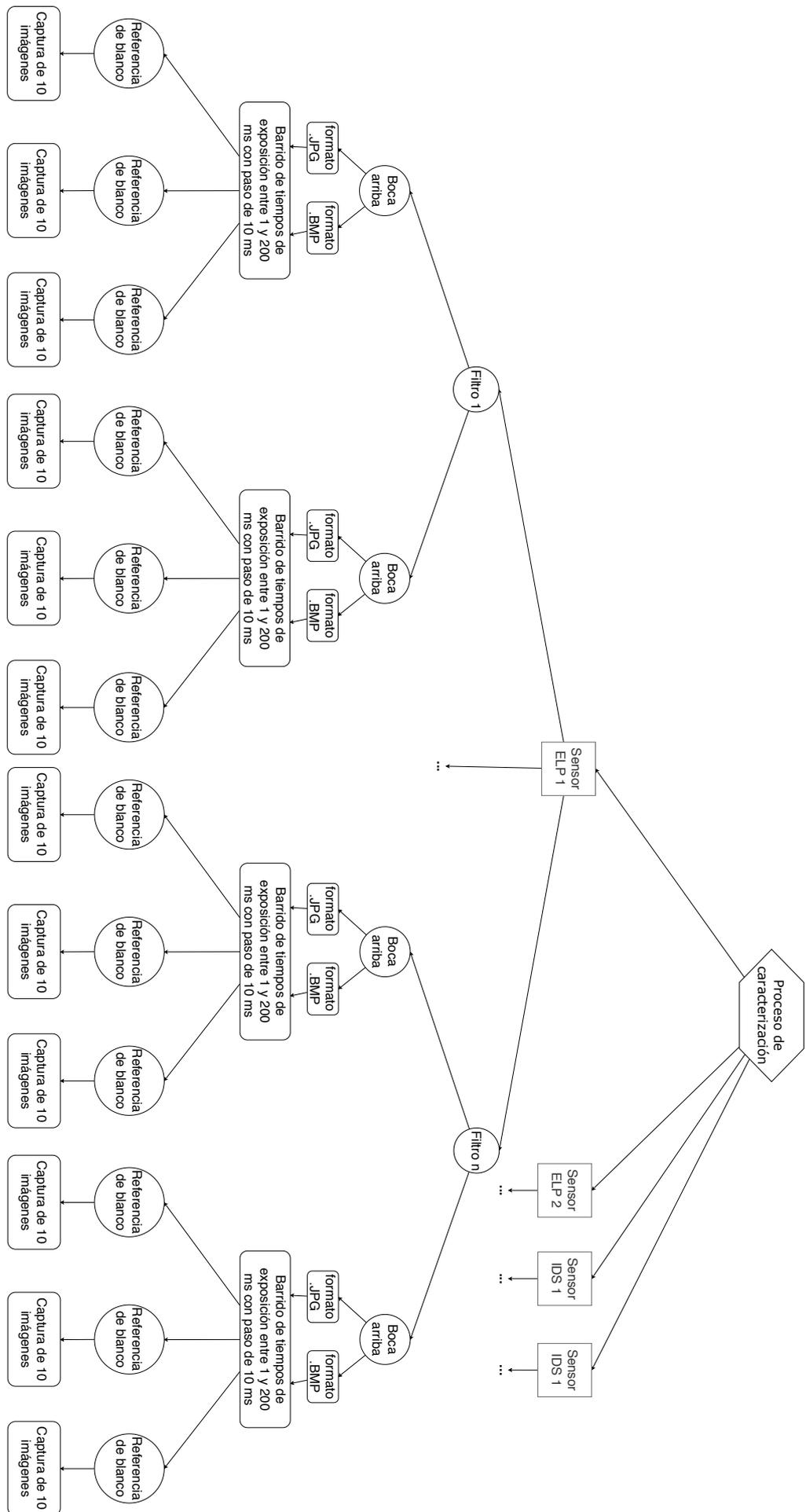


Figura 3.21: Diagrama de las muestras tomadas para el proceso de caracterización

El proceso de caracterización se ha automatizado mediante un programa de Matlab. En este programa ha de indicarse el sensor a caracterizar, dado que cada sensor captura imágenes de diferentes tamaño, así como el formato con el que se han guardado las imágenes a usar en el proceso de caracterización. Por último, es necesario recortar manualmente el área de la imagen en el cual se encuentra el polímero con firma espectral certificada. Realizado esto, el programa obtiene la información necesaria para calcular el valor teórico que se emplea en la caracterización. Por un lado se leen los vectores numéricos de las firmas espectrales del polímero y de la referencia de blanco, así como los vectores numéricos de las transmitancias de los filtros, de archivos Excel que facilitan los fabricantes. A continuación, se interpolan los vectores necesarios para ajustarlos a un mismo número de elementos, asegurando a su vez que sean coincidentes en las longitudes de onda de cada valor. Realizado este preprocesado, se calculan los valores teóricos, se comparan con los leídos de la imágenes capturadas y se calculan los distintos errores así como la desviación estándar para cada caso. Por último, para facilitar el entendimiento de los datos, los resultados obtenidos se muestran en diferentes gráficas.

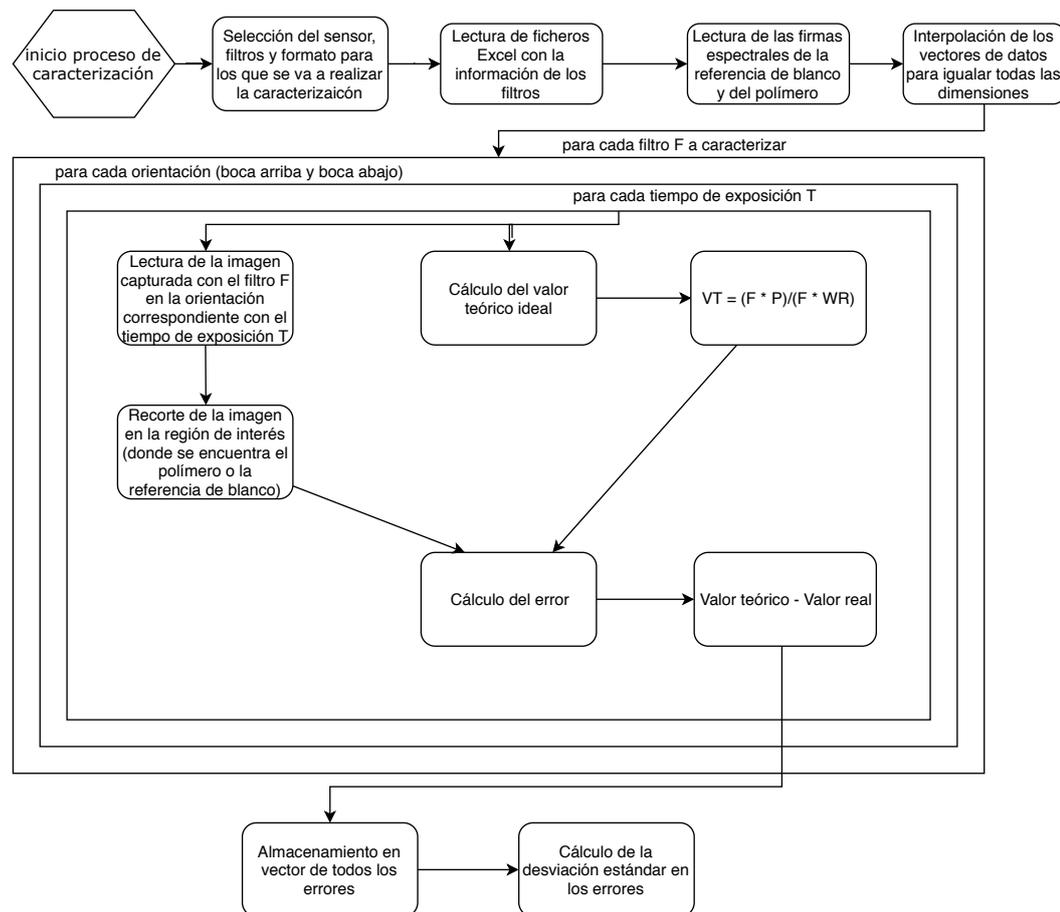


Figura 3.22: Diagrama de bloques del algoritmo de caracterización

Este método de caracterización cuantifica numéricamente cómo de fiable es la cámara espectral desarrollada. Además, dicha metodología puede ser aplicada a otras cámaras espectrales de similares características o bien adaptada para caracterizar cualquier otra cámara espectral.

# Resultados y Conclusiones

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en este proyecto. Del mismo modo, se explican las conclusiones extraídas y se analizan las posibles líneas de trabajo futuro. Por último, se desglosa el presupuesto necesario para desarrollar la cámara multispectral, y se añade una comparativa con las alternativas directas presentes actualmente en el mercado, con las que se pretende competir.

## 4.1 Explicación de los Resultados Obtenidos

En este apartado se diferencian entre muestran diferentes tipos de resultados. Por un lado, la cámara espectral desarrollada es en sí un resultado de este proyecto. Por lo tanto, el producto final con sus especificaciones es el primer resultado del trabajo realizado. En segundo lugar, la metodología de caracterización desarrollada es también un resultado, que además se puede emplear para caracterizar la cámara espectral desarrollada y comprobar así, por un lado, cómo de buena es dicha cámara, y por otro lado, qué sensores ofrecen mejores prestaciones. Por tanto, la caracterización de la cámara espectral y las conclusiones que se extraigan de esta, son otro resultado de importancia en este proyecto. Por último, dado que el objetivo final de la cámara es servir de sensor para medir índices de vegetación en agricultura, las imágenes tomadas por la cámara desarrollada, así como los índices de vegetación que puedan ser calculados a partir de estas imágenes, son quizá el resultado más importante dado que servirá como indicador sobre la utilidad real de este trabajo en el Proyecto PLATINO.

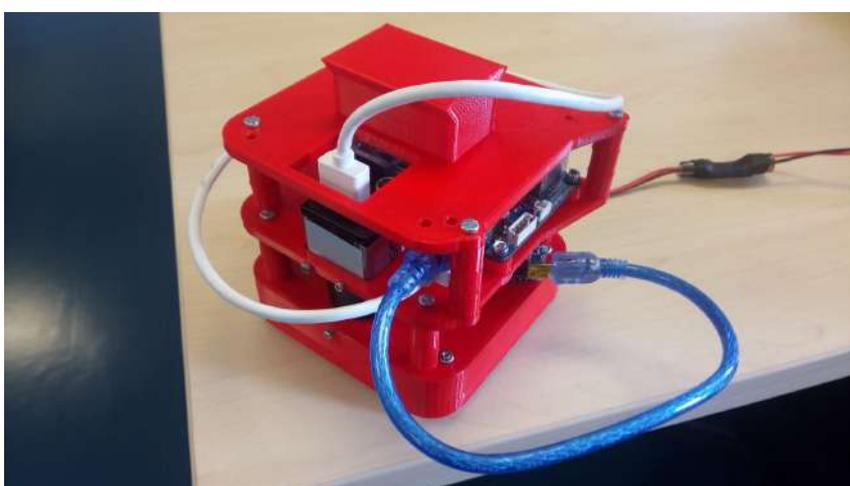
### 4.1.1 Cámara Espectral Desarrollada

Uno de los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster es el de desarrollar un producto que pueda competir con las alternativas existentes en el mercado en la actualidad en cuestión de prestaciones y precio. Si bien el hecho de desarrollar una cámara espectral propia ofrece otras ventajas, como la completa personalización y adaptación de sus características a las necesidades del IUMA, así como el completo control de todo el sistema, esta cámara ha de ser capaz de capturar imágenes que sean útiles para las aplicaciones en las que ha de ser empleada, así como tener un coste de desarrollo lo más reducido posible. Otro aspecto a tener en cuenta es el

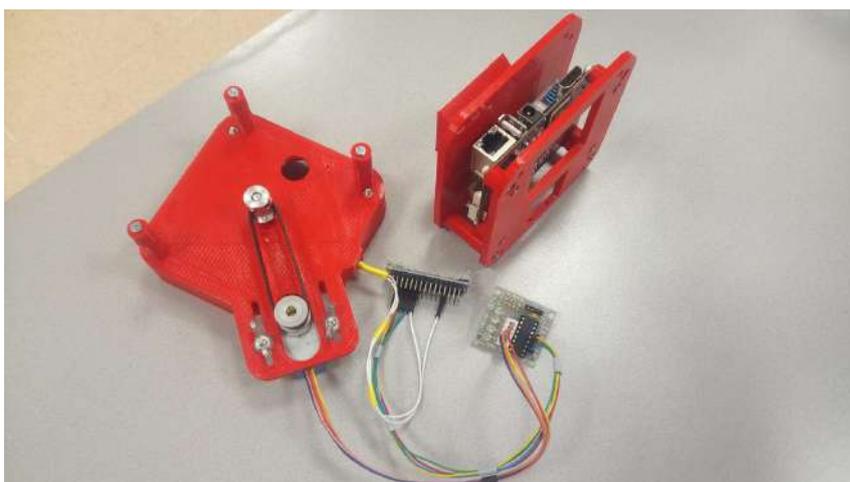
peso de la cámara y sus dimensiones. Si bien los límites en este aspecto varían en función del dron en el que la cámara vaya a ser embarcada, una reducción en el peso del dispositivo implica, independientemente del dron que se emplee, una reducción de la energía necesaria para elevarse y, por tanto, un aumento en la autonomía del dron. Las especificaciones de la cámara desarrollada en este proyecto se enumeran en la tabla 4.1

Dimensiones (cm)	8,5x10x10
Peso (gr)	300
Resolución espectral (bandas)	5
Resolución espacial (píxeles)	1280x1024

**Tabla 4.1:** Especificaciones de la cámara desarrollada en este proyecto



**Figura 4.1:** Diseño final de la cámara espectral desarrollada, en el que se incluye la Odroid XU4 como ordenador de abordo.



**Figura 4.2:** Estructura modular de la cámara espectral desarrollada

## 4.1.2 Resultados de la Caracterización

Como se explicó en el apartado 3.4.2, para realizar una correcta caracterización de la cámara, así como para determinar en qué circunstancias se obtienen los mejores resultados, ha sido necesario realizar un gran número de experimentos. Los resultados de la caracterización se obtienen en forma de error entre el resultado obtenido por la cámara al fotografiar un polímero cuya firma espectral es conocida, y el valor teórico que se debió haber obtenido. Para facilitar el entendimiento de los resultados, éstos se han dividido en diferentes *tests* en los que se comparan diversos aspectos de la cámara. Para el proceso de caracterización se han seleccionado 4 filtros (475AF20, 560BP20, 670BP20, 8075DF20). Sin embargo, el diseño final de la cámara consta de 5 filtros paso banda, incluyendo la banda 710nm (710AF40), más un filtro de infrarrojos para poder tomar imágenes RGB o de escala de grises de todo el rango visible del espectro. La preferencia por estos filtros en concreto se debe a que se pretende maximizar la cantidad de índices de vegetación que es posible calcular con el menor número de bandas posible. Las bandas seleccionadas cubren rangos espectrales específicos en el azul, verde, rojo e infrarrojo cercano.

### Comparativa entre Filtros Boca Arriba o Boca Abajo

En la tabla 4.2 puede observarse una comparativa entre los errores medios obtenidos con los filtros en una u otra orientación. Para ello, se han realizado las pruebas con el sensor *3360CP NIR*, de una de las cámaras IDS. Como puede observarse, la diferencia en los resultados no es abismal, si bien en todos los casos los resultados mejoran con una determinada orientación. Esto ya indica qué orientación es conveniente emplear en el resto de experimentos.

Filtro	Valor Calculado (reflectancia)	Resultado medio (reflectancia)		Error medio (reflectancia)		Desviación Estándar (reflectancia)	
		Cara A	Cara B	Cara A	Cara B	Cara A	Cara B
475AF20	84.15	84.80	85.84	0.63	1.73	0.67	0.97
560BP20	91,53	90.60	94.69	-0.11	3.02	0.70	0.90
670BP20	89,13	87.65	91.34	-1.59	2.32	0.64	0.34
8075DF20	88,82	89.72	93.51	0.90	4.69	0.85	0.84

**Tabla 4.2:** Comparativa en la orientación de los filtros con el sensor 3360CP NIR

## Comparativa entre formatos

En la tabla 4.3 se comparan los errores medios cuando se almacena la imagen en un formato con compresión (.jpg) o los datos binarios (raw) adquiridos por la cámara (.bin). Este experimento se ha realizado con el mismo sensor, el *3360CP NIR*. De nuevo, se observa que no hay prácticamente diferencia entre los errores con uno u otro formato. Sin embargo, la compresión supone una pérdida de información. Que la pérdida de información no se traduzca en un aumento del error medio se debe a que la compresión por definición elimina las altas frecuencias, *suavizando* la imagen y omitiendo las irregularidades que puedan existir en los píxeles que comprenden el polímero en las imágenes que se emplean en la caracterización. Por ello es importante entender los resultados obtenidos e interpretarlos correctamente dadas las características del experimento.

Filtro	Valor Calculado (reflectancia)	Formato	Resultado medio (reflectancia)	Error medio (reflectancia)	Desviación Estándar (reflectancia)
475AF20	84.15	.jpg	84.80	0.63	0.67
		.bin	85.08	0.93	0.66
560BP20	91,53	.jpg	90.60	-0.11	0.70
		.bin	90.69	-0.84	0.68
670BP20	89,13	.jpg	87.65	-1.59	0.64
		.bin	87.54	-1.59	0.64
8075DF20	88,82	.jpg	89.72	0.90	0.85
		.bin	90.29	1.47	0.57

**Tabla 4.3:** Comparativa del formato de almacenamiento con el sensor *3360CP NIR*

## Comparativa entre sensor con filtro de Bayer y sensor pancromático

Para comparar entre el uso de un sensor RGB (con filtro de Bayer) y un sensor pancromático, se realizan las mismas pruebas con el sensor IDS 3240LE. Los resultados aparecen en la tabla 4.4

Filtro	Valor Calculado (reflectancia)	Resultado medio (reflectancia)	Error medio (reflectancia)	Desviación Estándar (reflectancia)
475AF20	84.15	83.21	0.94	2.19
560BP20	91,53	91.31	0.22	0.94
670BP20	89,13	83.07	6.06	2.67
8075DF20	88,82	92.76	3.93	1.10

**Tabla 4.4:** Resultados del sensor IDS Pancromático

Como se observa, los errores medios obtenidos no difieren mucho de los obtenidos al emplear el sensor con filtro de Bayer, e incluso empeoran los resultados en determinados casos. Esto no implica que un sensor con filtro de Bayer sea mejor, dado que los sensores que se están comparando no tienen características idénticas, y, por lo tanto, los resultados pueden deberse a otros aspectos del sensor. Sin embargo, estos resultados sirven para comprobar que la utilización de un sensor RGB no supone una disminución relevante de la precisión de la cámara y es, por tanto, una alternativa a tener en cuenta dada la mayor disponibilidad y menor precio de estos sensores en comparación con los pancromáticos (de uso menos extendido).

### Comparativa entre sensores de alto precio y sensores de bajo precio

A continuación, se compara entre los resultados obtenidos con las cámaras IDS, fabricadas en Alemania, cuyos resultados aparecen en las tablas 4.2 y 4.4; y las cámaras marca ELP, fabricados en China, cuyos resultados aparecen en las tablas 4.5 y 4.6.

Filtro	Valor Calculado (reflectancia)	Resultado medio (reflectancia)	Error medio (reflectancia)	Desviación Estándar (reflectancia)
475AF20	84,15	83,67	-0,48	0,92
560BP20	91,53	97,23	5,70	1,57
670BP20	89,13	96,12	6,99	2,27
8075DF20	88,82	98,119	13,56	2,64

**Tabla 4.5:** Resultados del sensor IMX179

Filtro	Valor Calculado (reflectancia)	Resultado medio (reflectancia)	Error medio (reflectancia)	Desviación Estándar (reflectancia)
475AF20	84,15	84,76	0,61	1,15
560BP20	91,53	83,90	2,37	1,53
670BP20	89,13	95,11	5,98	2,09
8075DF20	88,82	93,86	5,04	1,85

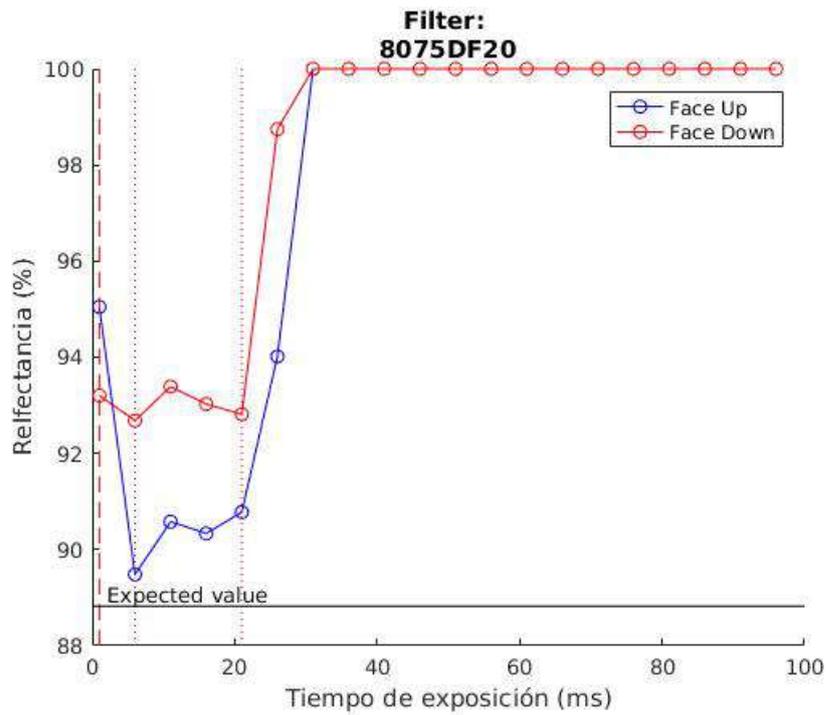
**Tabla 4.6:** Resultados del sensor AR0130

Como se puede observar en las tablas 4.5 y 4.6, los sensores de las cámaras ELP ofrecen peores resultados. Sin embargo, son una alternativa a tener en cuenta, dado su bajo coste económico. En especial, si se utilizan en cámaras multispectrales tipo *snapshot* con múltiples sensores. En este caso, sería recomendable llevar a cabo pruebas de caracterización adicionales para evaluar en detalle el funcionamiento del dispositivo.

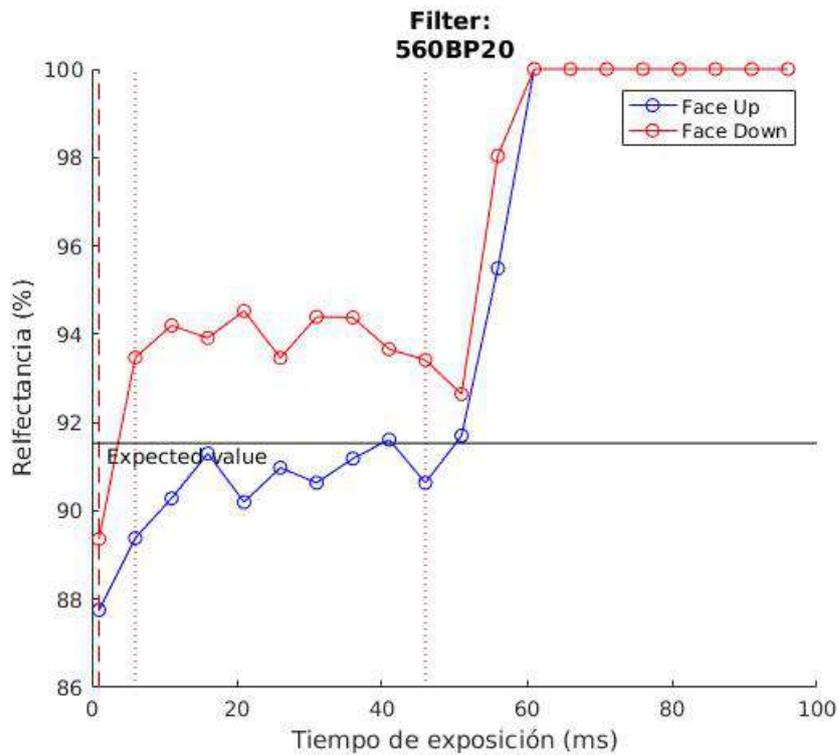
## Resultados Gráficos

El valor medio calculado que aparece en las tablas del apartado 4.1.2 se obtiene a partir de los errores para diferentes tiempos de exposición. Es posible que para determinados filtros, la cantidad de tiempos de exposición para los cuales se obtienen valores óptimos, es decir, imágenes que no sean ni muy oscuras ni sobresaturadas, sea menor que para otros filtros. Por ello, para calcular el valor medio, solo se tienen en cuenta los valores de tiempos de exposición para los cuales se obtiene imágenes dentro de un margen (evitando incluir imágenes saturadas o muy oscuras en los cálculos). Para determinados filtros, este valor medio se obtiene de un número menor de valores (4.3, 4.4) y para otros filtros, se cuenta con un mayor número de datos válidos (4.5, 4.6).

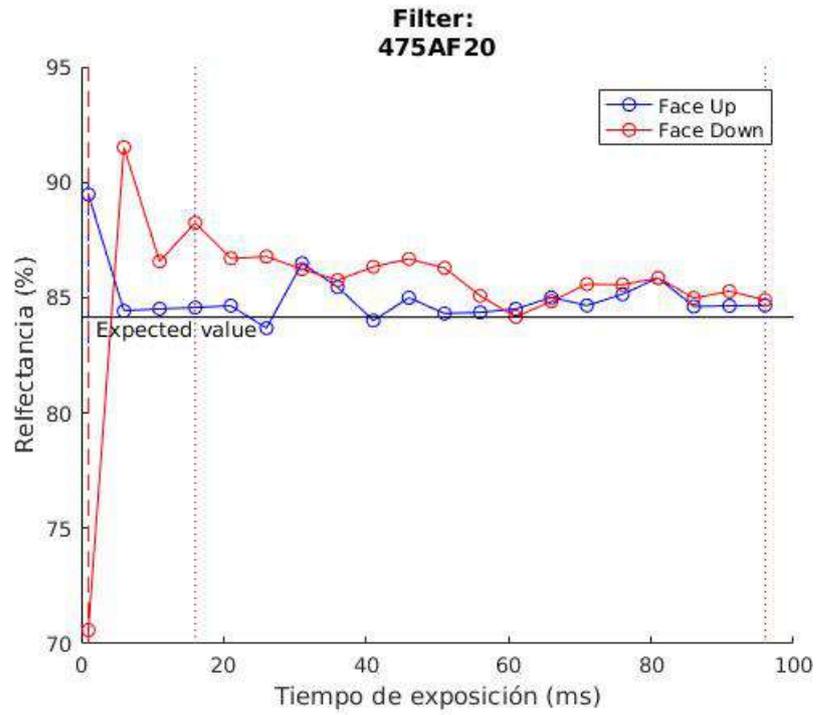
En las gráficas se ha dibujado el valor teórico calculado con una línea horizontal, sirviendo como referencia para determinar de forma visual la diferencia existente con los valores reales. A su vez, en la gráfica se observan unas líneas discontinuas verticales que acotan los valores útiles para el cálculo del error medio. Dos de estas líneas, las *punteadas*, limitan los valores útiles entre un máximo y un mínimo, en función de los valores extremos obtenidos al medir la referencia de blanco. Esto evita emplear valores sobresaturados o demasiado oscuros. Los límites se han establecido en un 10 % y un 90 % del rango de valores que puede medir el sensor (0-255 en los sensores empleados). Por último, existe una segunda limitación, relativa al *SNR*, la relación entre el valor medido y el ruido. Cuando esta relación es inferior al 20 %, se descartan los valores. Esto se debe a que para valores medidos cercanos a los valores obtenidos del ruido del sensor (referencia de negro), no es posible determinar si dichos valores se deben al material muestreado o al ruido propio del sensor. Por tanto, para que un valor sea tenido en cuenta en el cálculo del error medio, este ha de ser inferior al límite superior establecido, y superior a ambos límites inferiores establecidos.



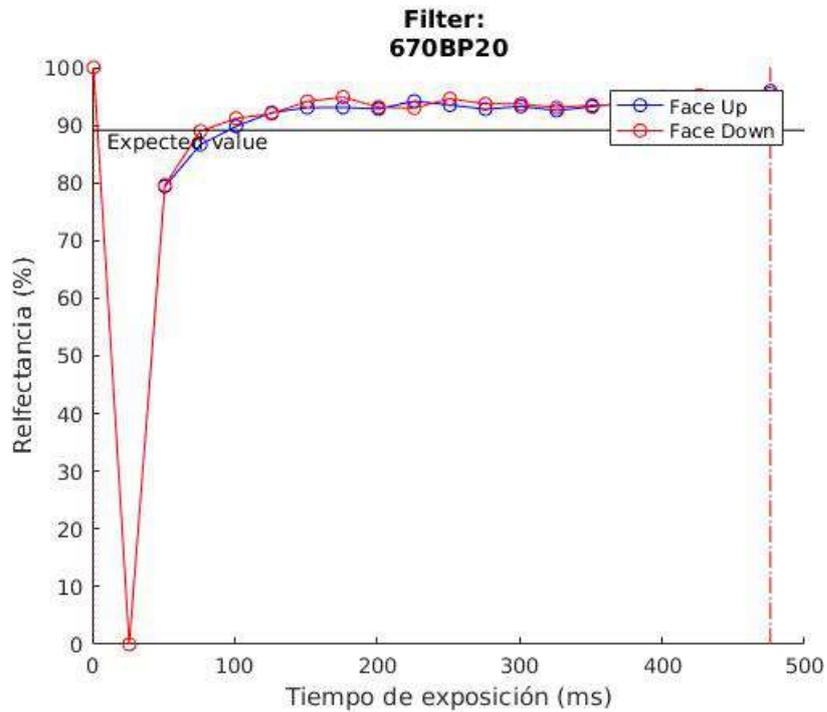
**Figura 4.3:** Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 8075DF20



**Figura 4.4:** Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 560BP20



**Figura 4.5:** Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 475AF20



**Figura 4.6:** Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor ELP y el filtro 670BP20

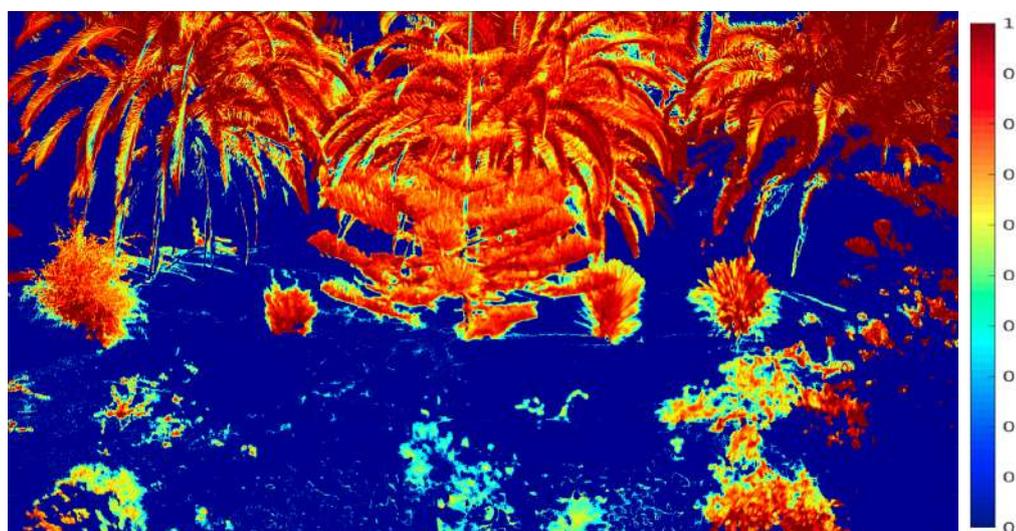
En la Figuras 4.3 y 4.4 se cuenta con cuatro y nueve valores dentro de rango aprovechable respectivamente, por lo que los resultados quedan condicionados por esta limitación. Sin embargo, en la Figuras 4.5 y 4.6 se cuenta con 17 y 18 valores dentro del rango óptimo para cada filtro, por lo que los resultados obtenidos son más fiables.

### 4.1.3 Imágenes e Índice NDVI

A continuación se añaden algunas imágenes tomadas por la cámara espectral desarrollada.



**Figura 4.7:** Imagen RGB compuesta a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo), 560BP20 (verde) y 475BP20 (azul).



**Figura 4.8:** Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR).

Como se puede observar, las imágenes RGB (4.7) formadas a partir de tres imágenes obtenidas por los filtros de rojo, verde y azul de la cámara, son de gran calidad. Empleando las imágenes capturadas mediante el filtro rojo y el NIR, es posible calcular el índice NDVI (1.1). A su vez, es habitual colorear la imagen según los

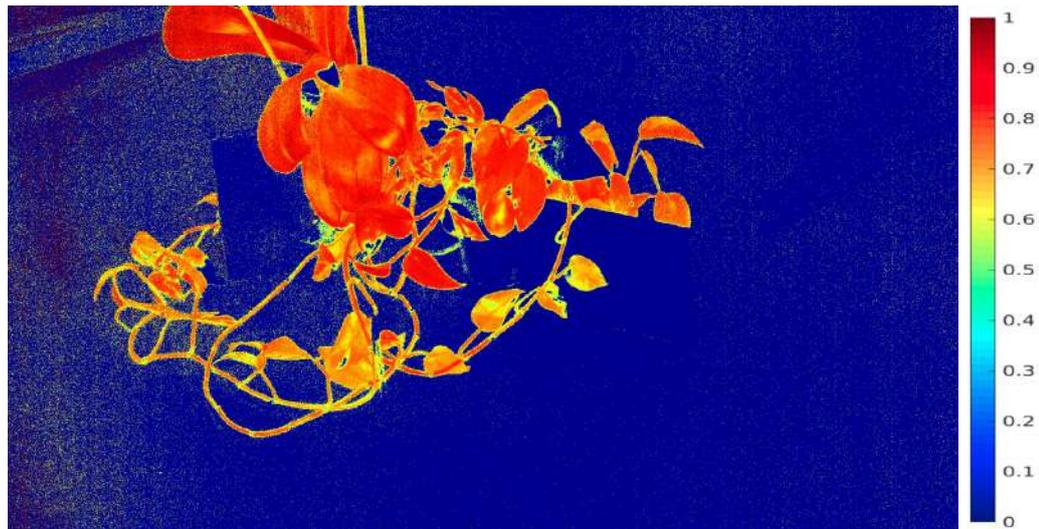
resultados del NDVI para cada píxel, obteniéndose un mapa de color como el que se muestra en la imagen 4.8.

Se observa como los valores de NDVI altos coinciden con la vegetación existente en la imagen, mientras que los valores de NDVI bajos coinciden con los elementos que no son vegetación, como el suelo. También se observa como algunas hojas de palmera que parecen más secas en la imagen RGB presentan valores NDVI menores, verificando, de forma cualitativa, el correcto funcionamiento de la cámara desarrollada.

La Figura 4.9 muestra una composición de laboratorio formada por diferentes elementos de color verde, dos tipos de plantas diferentes, y otros elementos verdes como material de oficina. Se aprecia como es complicado diferenciar los elementos dado que tienen un color similar. Sin embargo, en la Figura 4.10 se ha calculado el índice NDVI, pudiendo diferenciar fácilmente los elementos que forman parte de la vegetación en la composición (valores amarillos y rojos) de los elementos que no forman parte de la vegetación (valores azules). También puede observarse como las partes de la vegetación que se encuentran en peor estado toman valores NDVI más bajos, demostrando de forma cualitativa el correcto funcionamiento de la cámara espectral desarrollada.



**Figura 4.9:** Imagen RGB compuesta a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo), 560BP20 (verde) y 475BP20 (azul) tomada en el laboratorio.



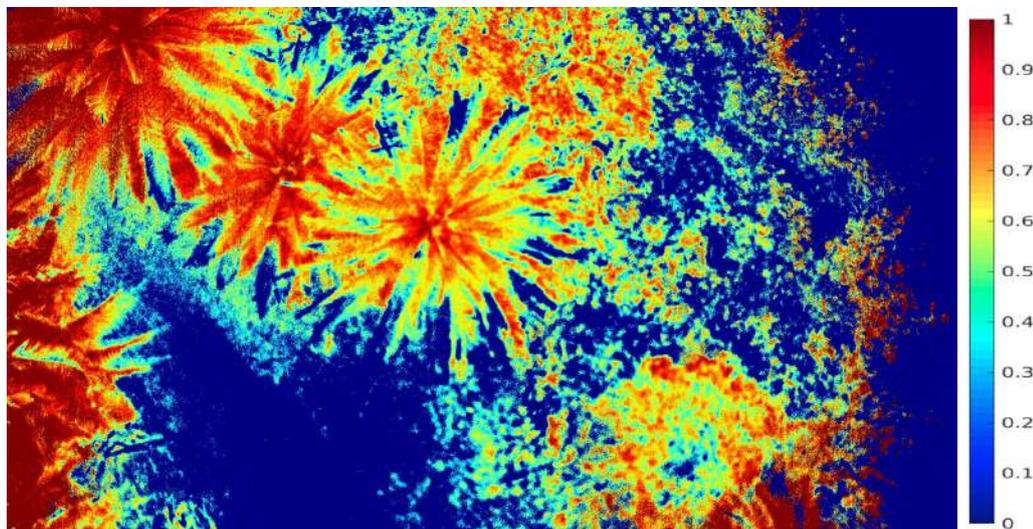
**Figura 4.10:** Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR) tomada en el laboratorio.

#### **Resultados de la misión de vuelo**

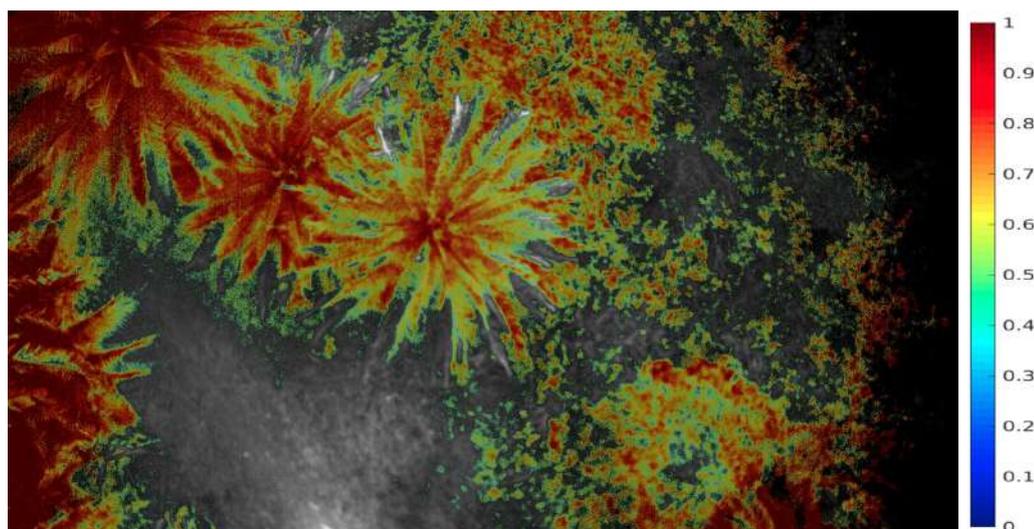
Parte de los resultados se han obtenido al realizar una prueba de vuelo real. Esta ha servido para comprobar de manera definitiva que todo el sistema funciona correctamente. La calibración de la cámara, la integración de la cámara en el sistema de control de vuelo del dron, la captura de imágenes, y el cálculo de índices NDVI empleando las imágenes adquiridas, han resultado positivos y, por tanto, se abre la posibilidad de emplear la cámara desarrollada en este proyecto en el sistema de agricultura de precisión planteado en el Proyecto PLATINO.



**Figura 4.11:** La cámara espectral desarrollada acoplada al dron M600.



**Figura 4.12:** Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR) capturada durante una misión de vuelo en el dron.



**Figura 4.13:** Imagen pancromática con la vegetación detectada por el índice NDVI superpuesta.

## 4.2 Análisis y Conclusiones Extraídas

Las conclusiones extraídas son múltiples y se enumeran divididas según los resultados obtenidos.

### 4.2.1 Conclusiones del producto final

- La cámara desarrollada es válida para aplicaciones de agricultura de precisión, así como para cualquier otra aplicación de teledetección.
- Se ha probado satisfactoriamente su funcionamiento en una misión real de vuelo con el dron M600, confirmando su correcto desempeño.
- La cámara desarrollada cumple con las limitaciones de peso y volumen para funcionar correctamente en un dron.
- Se ha optimizado el sistema para facilitar su uso en aplicaciones de campo.

### 4.2.2 Conclusiones de la caracterización

- Se ha desarrollado un proceso de caracterización que permite cuantificar de forma fiable cómo de buena es una cámara espectral.

- Se ha desarrollado correctamente una forma de calcular el efecto que tienen los diferentes filtros sobre el valor obtenido en determinadas bandas del espectro electromagnético.
- Se ha concluido que las cámaras de la marca IDS, si bien son más costosas económicamente, ofrecen mejores resultados, y, por tanto, son más fiables y las que se debe implementar en el sistema.
- Si bien las cámaras de la marca ELP no ofrecen tan buenos resultados, tampoco su desempeño es malo y vale la pena considerar la utilización de estos sensores. En particular, en aquellos diseños alternativos tipo *snapshot* que hagan uso de varios sensores simultáneamente.
- Los resultados mejoran cuando los filtros son colocados con una orientación determinada aunque la diferencia con los resultados obtenidos con la orientación opuesta no es determinante. Lógicamente se optará por colocarlos de la forma en que se minimicen los errores.
- El formato en el que se almacenan las imágenes no influye de forma determinante en la calidad de las mismas, debido a que únicamente se eliminan las irregularidades, suavizando los píxeles a partir de los cuales se calcula el valor medio. A pesar de esto, optar por formatos sin compresión (o compresión sin pérdidas) ofrece resultados más fiables y por ello debe evitarse la compresión con pérdidas en la medida en que sea posible.

### 4.2.3 Conclusiones de las Imágenes Tomadas por la Cámara y de los Índices NDVI Calculados a Partir de Estas

- Las imágenes tomadas mediante la cámara son aprovechables para aplicaciones de teledetección.
- Es posible emplear las imágenes capturadas con dicha cámara para calcular el índice NDVI, obteniéndose resultados de calidad.
- Se ha observado una posible complicación en caso de capturar objetos que se encuentran en movimiento. En estos casos sería más recomendable una cámara tipo *snapshot*.
- Sería necesario realizar más misiones de vuelo, con el objetivo de capturar nuevas imágenes con las que concluir de forma más precisa el funcionamiento de la cámara.

- El cambio a otro grupo de filtros permite el cálculo de otros índices de vegetación.

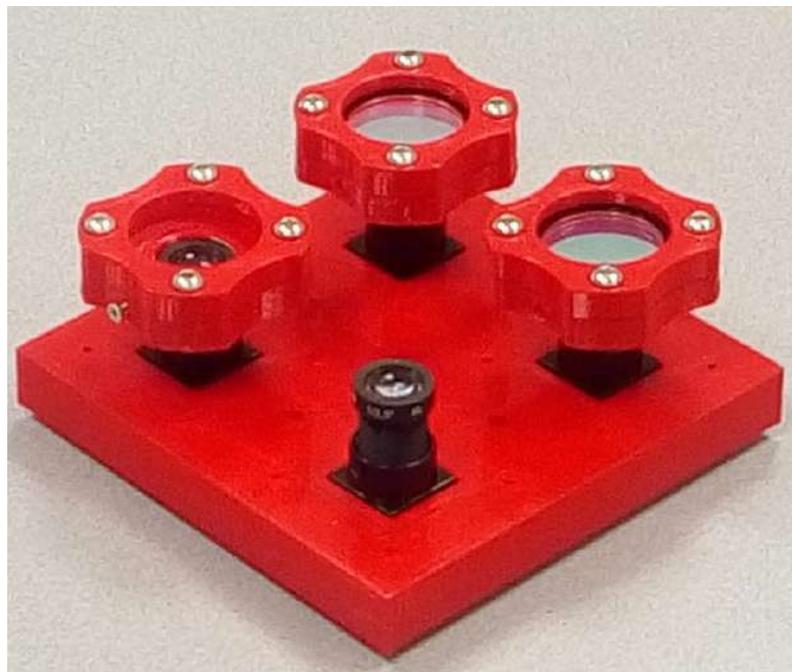
## 4.3 Trabajo Futuro

Algunas de las posibles líneas de trabajo futuro relacionadas con este proyecto son las siguientes:

- Profundizar en el proceso de caracterización, empleando otros materiales de referencia con firma espectral conocida para aumentar la significación estadística de los resultados.
- Estudiar la relación entre la óptica empleada por la cámara y los resultados de la caracterización.
- Estudiar el efecto de la óptica empleada en vuelos reales en el proceso posterior de registro de las imágenes.
- Llevar a cabo más misiones de vuelo y emplear las imágenes adquiridas para calcular otros índices de vegetación, además del NDVI.
- Explorar la posibilidad de aumentar el tamaño de la rueda de filtros, pudiendo así aumentar la resolución espectral de la cámara (figura 4.14).
- Explorar la posibilidad de incorporar más sensores, convirtiendo la cámara en una tipo *snapshot* (figura 4.15).
- Explorar la posibilidad de incorporar una segunda rueda de filtros, con un motor independiente, de modo que se multiplique la cantidad de bandas que se puede capturar sin necesidad de aumentar el tamaño de la rueda de filtros.



**Figura 4.14:** Diseño alternativo planteado en este proyecto que emplea una rueda mayor capaz de capturar 12 bandas.



**Figura 4.15:** Diseño alternativo planteado en este proyecto que cuenta con cuatro sensores (tipo snpashot).

## 4.4 Presupuesto

En este apartado se desglosa el presupuesto empleado en este proyecto, orientado al presupuesto necesario para costear únicamente el producto final resultado del trabajo realizado, es decir, la cámara multiespectral desarrollada. Los costes de esta cámara provienen del coste del sensor empleado, los filtros que se utilizan, la electrónica necesaria, el motor paso a paso y la estructura misma de la cámara.

Artículo	Precio (€)
Sensor 3240LE	600
Filtros	981
Odroid	150
Arduino NANO	40
Motor Paso a Paso	4
Batería	15
Cableado	2
Estructura	4
Total	1796

**Tabla 4.7:** Desglose del presupuesto

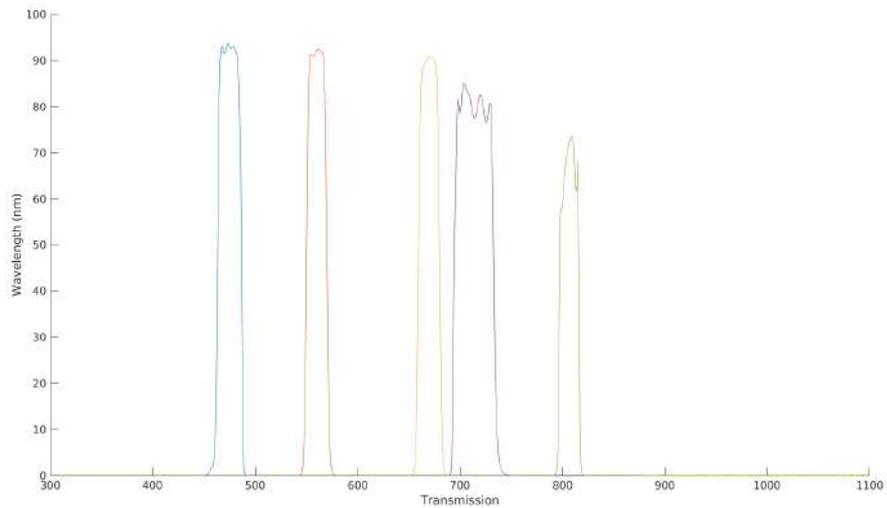
## 4.5 Comparativa con las alternativas presentes en el mercado

Dado que uno de los objetivos de este proyecto es el de abaratar los costes de implantación de un sistema de agricultura de precisión como el propuesto por el Proyecto PLATINO, la comparativa de la cámara desarrollada con las alternativas existentes actualmente en el mercado resulta prácticamente obligatoria. En este apartado se pretende comparar la cámara desarrollada con la MicaSense Rededge-MX [27], la Sentera Double 4K [37] y la Specim FX10 [39].

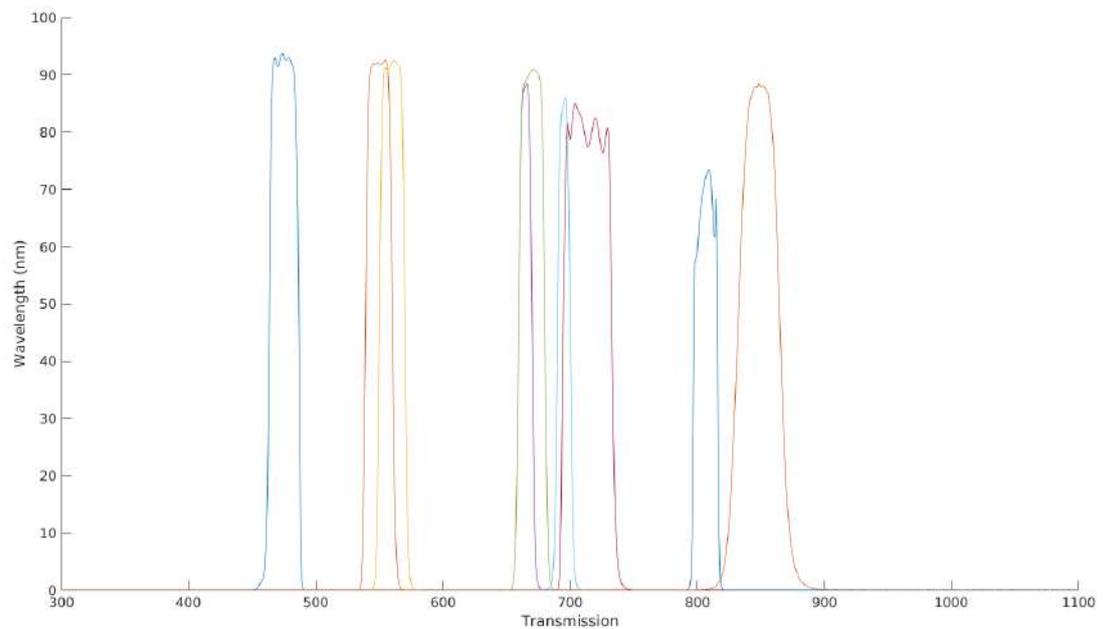
Tanto la MicaSense Rededge-MX como la Sentera Double 4K son cámaras multiespectrales capaces de capturar 5 bandas, empleando siempre más de un sensor. Tienen características similares a las de la cámara desarrollada en este proyecto y de ahí la comparación. Por otro lado, la comparativa con la Specim FX-10 se debe a que se trata de la cámara (hiperespectral, en este caso) con la que cuenta actualmente el IUMA para realizar muestreos espectrales desde un dron, y por tanto se cuenta con la cámara en el laboratorio, facilitando una comparativa.

Producto	Resolución Espectral	Precio (€)
MicaSense Rededge-MX	azul, verde, rojo, red edge, NIR (figura 4.18)	4866
Sentera Double 4K	azul, verde, rojo, red edge, NIR (figura 4.19)	2830
Specim FX-10	224 bandas entre 400 y 1000 nm	14000
Cámara desarrollada	azul, verde, rojo, red edge, NIR (modificables) (4.16)	1796

**Tabla 4.8:** Comparativa de cámaras



**Figura 4.16:** Respuesta Espectral de la cámara de desarrollo propio, con los filtros seleccionados



**Figura 4.17:** Respuesta Espectral de la cámara de desarrollo propio, con todos los filtros con los que cuenta el IUMA actualmente

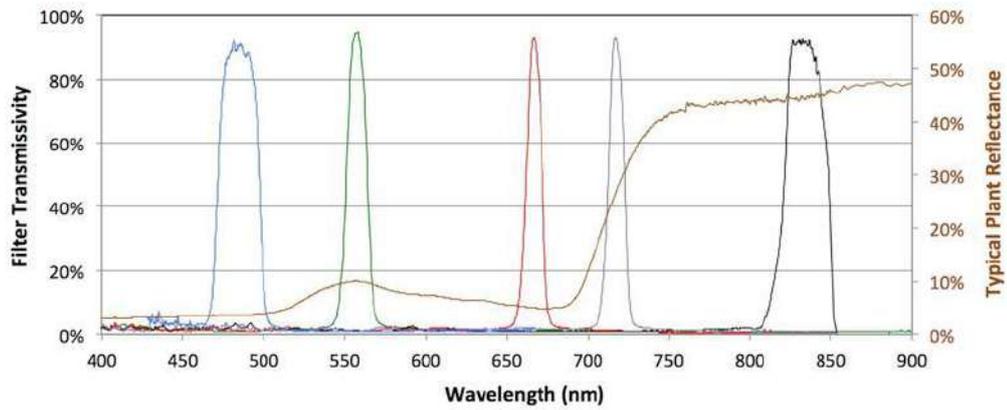


Figura 4.18: Respuesta Espectral de la cámara MicaSense Rededge-MX

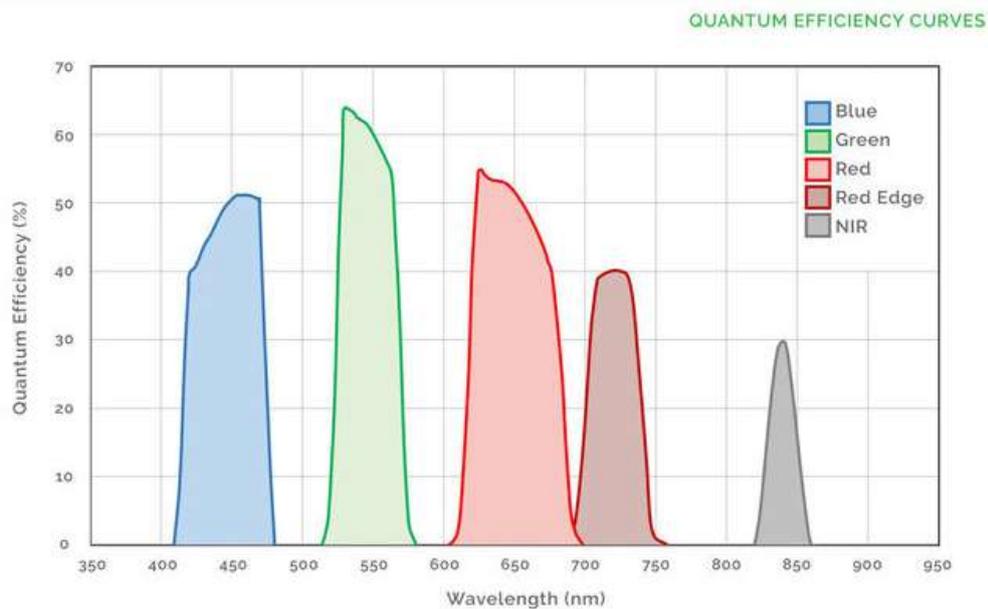


Figura 4.19: Respuesta Espectral de la cámara Sentra Double 4K

### Ventajas de la cámara desarrollada

Como se ha visto en el apartado 4.5, la cámara desarrollada en este proyecto tiene una resolución espectral muy semejante a la ofrecida por la MicaSense Rededge-MX y la Sentra Double 4K, mejorando incluso en algunos aspectos sus características. Además, el coste de fabricación del prototipo ha sido menor que el precio de venta de mercado de dichas cámaras. Sin embargo, las ventajas de la cámara desarrollada en este trabajo no acaban ahí. Uno de los aspectos diferenciadores es la modularidad de la cámara desarrollada. Esta cámara permite modificar fácilmente las bandas capturadas, pudiendo adaptarlas a la aplicación que se requiera, cuantas veces se

quiera, sin mayor dificultad. Esto es imposible en las alternativas antes mencionadas, dado que se tratan de sistemas cerrados, con una única aplicación.

Por otro lado, otro aspecto a tener en cuenta es la poca flexibilidad que ofrecen las alternativas en cuanto al tratamiento de las imágenes capturadas. Ambas cámaras, la MicaSense y la Sentera, permiten únicamente almacenar las imágenes en una tarjeta SD de máximo 32Gb. En cambio, la cámara desarrollada en este proyecto permite una completa flexibilidad en este aspecto, pudiendo almacenar las imágenes en cualquier dispositivo, así como añadir espacio de almacenamiento extra en caso de ser necesario. Por otro lado, la modularidad del producto desarrollado permite, en un futuro, modificar el sistema, pudiendo cambiar la placa monoprocesador Odroid por otra de más potencia, añadir GPUs o FPGAs, permitiendo incluso el procesado de las imágenes, así como la comunicación con tierra en tiempo real. Esto permitiría, entre otras muchas cosas, contar con mapas de índices de vegetación en tierra en tiempo real mientras ocurre el vuelo, algo imposible de obtener empleando las cámaras arriba mencionadas.

En definitiva, el trabajo realizado supone un conjunto de ventajas inexistentes hasta ahora en el mercado y que amplían las posibilidades relacionadas con el Proyecto PLATINO, abaratando a su vez los costes de los sistemas de agricultura de precisión basados en teledetección. La reducción del coste de esta clase de sistemas pretende facilitar la obtención de los mismos por parte de los agricultores, dado que los costes de los sistemas actuales pueden ser imposibles de asumir en un gran número de casos.

## Bibliografía

- [2]Hamed Akbari, Luma Halig, David M Schuster y col. „Hyperspectral imaging and quantitative analysis for prostate cancer detection“. En: *Journal of biomedical optics* 17.7 (2012), pág. 076005 (vid. pág. 5).
- [5]Hartmut H Aumann, Moustafa T Chahine, Catherine Gautier y col. „AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems“. En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41.2 (2003), págs. 253-264 (vid. pág. 5).
- [6]Toby N Carlson y David A Ripley. „On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index“. En: *Remote sensing of Environment* 62.3 (1997), págs. 241-252 (vid. pág. 7).
- [8]Wei Di, Lei Zhang, David Zhang y Quan Pan. „Studies on hyperspectral face recognition in visible spectrum with feature band selection“. En: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* 40.6 (2010), págs. 1354-1361 (vid. pág. 5).
- [11]James E Fowler. „Compressive pushbroom and whiskbroom sensing for hyperspectral remote-sensing imaging“. En: *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE. 2014, págs. 684-688 (vid. págs. 11, 12).
- [12]Jon Yngve Hardeberg, Francis JM Schmitt y Hans Brettel. „Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter“. En: *Optical engineering* 41.10 (2002), págs. 2532-2549 (vid. pág. 13).
- [14]SE Harris y RW Wallace. „Acousto-optic tunable filter“. En: *Josa* 59.6 (1969), págs. 744-747 (vid. pág. 13).
- [16]Fiona Hilton, Raymond Armante, Thomas August y col. „Hyperspectral Earth observation from IASI: Five years of accomplishments“. En: *bulletin of the american meteorological Society* 93.3 (2012), págs. 347-370 (vid. pág. 5).
- [21]Carl F Jordan. „Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor“. En: *Ecology* 50.4 (1969), págs. 663-666 (vid. pág. 3).
- [24]Thomas M Lillesand, Ralph W Kiefer y JW Chipman. „Remote sensing and image interpretation. John Willey & Sons“. En: *New York* 724 (2000) (vid. págs. 11, 12).
- [25]Philipp Lottes, Raghav Khanna, Johannes Pfeifer, Roland Siegwart y Cyrill Stachniss. „UAV-based crop and weed classification for smart farming“. En: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2017, págs. 3024-3031 (vid. pág. 4).

- [26] Craig D Mackay. „Charge-coupled devices in astronomy“. En: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 24.1 (1986), págs. 255-283 (vid. pág. 8).
- [28] David J Mulla. „Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps“. En: *Biosystems engineering* 114.4 (2013), págs. 358-371 (vid. pág. 15).
- [33] Hsuan Ren y Chein-I Chang. „Automatic spectral target recognition in hyperspectral imagery“. En: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 39.4 (2003), págs. 1232-1249 (vid. pág. 5).
- [43] John V Stafford. „Implementing precision agriculture in the 21st century“. En: *Journal of Agricultural Engineering Research* 76.3 (2000), págs. 267-275 (vid. pág. 2).
- [47] Naiqian Zhang, Maohua Wang y Ning Wang. „Precision agriculture—a worldwide overview“. En: *Computers and electronics in agriculture* 36.2-3 (2002), págs. 113-132 (vid. pág. 2).
- [48] Jiajun Zhu, David I Ferguson, Dmitri A Dolgov y Jonathan Baldwin Dowdall. *Characterizing optically reflective features via hyper-spectral sensor*. US Patent 9,234,618. Ene. de 2016 (vid. pág. 5).

## Recursos Web

- [1] National Aeronautics y Space Administration (NASA). *Remote Sensors*. URL: <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors> (visitado 21 de mayo de 2019) (vid. pág. 15).
- [3] Arduino. *Arduino Nano*. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-nano> (visitado 25 de mayo de 2019) (vid. pág. 24).
- [4] Arduino. *Arduino Uno Rev3*. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (visitado 25 de mayo de 2019) (vid. pág. 24).
- [7] CMOSIS. *CMOS Imaging Sensors*. URL: <https://ams.com/cmso-imaging-sensors> (visitado 28 de mayo de 2019) (vid. pág. 25).
- [9] DJI. *Matrice 600*. URL: <https://www.dji.com/es/matrice600> (visitado 7 de jun. de 2019) (vid. pág. 24).
- [10] ELP. *10 Years Surveillance Systems and USB Cameras Designer and Manufacturer*. URL: <http://www.elpcctv.com/> (visitado 28 de mayo de 2019) (vid. pág. 25).
- [13] Hardkernel. *Odroid-XU4*. URL: <https://www.hardkernel.com/shop/odroid-xu4-special-price/> (visitado 25 de mayo de 2019) (vid. pág. 23).
- [15] Verena Henrich. *Index DataBase - A database for remote sensing indices*. 2011. URL: <https://www.indexdatabase.de/db/r.php> (visitado 24 de mayo de 2019) (vid. pág. 6).
- [17] IDS. *Imaging Development Systems*. URL: <https://es.ids-imaging.com/home.html> (visitado 28 de mayo de 2019) (vid. pág. 25).
- [18] Infaimon. *uEye 3240LE*. URL: <https://www.infaimon.com/producto/ueye-3240le/> (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. pág. 25).

- [19]Infaimon. *uEye 3360CP NIR*. URL: <https://www.infaimon.com/producto/ueye-3360cp-nir/> (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. pág. 25).
- [20]Texas Instruments. *ULN2003A*. URL: <http://www.ti.com/lit/gpn/uln2003ai> (visitado 7 de jun. de 2019) (vid. pág. 24).
- [22]Arseny Kapoulkine. *pugixml - Light-weight, simple and fast XML parser for C++ with XPath support*. URL: <https://pugixml.org/> (visitado 4 de abr. de 2018) (vid. pág. 39).
- [23]Kiatronics. *28BYJ-48 – 5V Stepper Motor*. URL: <https://www.prometec.net/motor-28byj-48/> (visitado 7 de jun. de 2019) (vid. pág. 24).
- [27]MicaSense. *RedEdge-MX MicaSense*. URL: <https://www.micasense.com/rededge-mx> (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. págs. 18, 66).
- [29]Nvidia. *Jetson TK1 development board*. URL: <https://la.nvidia.com/object/jetson-tk1-embedded-dev-kit-la.html> (visitado 25 de mayo de 2019) (vid. pág. 24).
- [30]Nvidia. *Jetson TX2 development board*. URL: <https://www.nvidia.com/es-es/autonomous-machines/embedded-systems-dev-kits-modules> (visitado 25 de mayo de 2019) (vid. pág. 24).
- [31]Omega Optical. *Omega Filters*. URL: <https://www.omegafilters.com/> (visitado 28 de mayo de 2019) (vid. pág. 24).
- [32]Mini Physics. *The Electromagnetic Spectrum*. URL: [https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum\\_25.html](https://www.miniphysics.com/electromagnetic-spectrum_25.html) (visitado 24 de mayo de 2019) (vid. pág. 5).
- [34]Michael Richmond. *CCDs, CMOS, and KIDS*. URL: [http://spiff.rit.edu/classes/ast613/lectures/ccds\\_kids/ccds\\_kids.html](http://spiff.rit.edu/classes/ast613/lectures/ccds_kids/ccds_kids.html) (visitado 24 de mayo de 2019) (vid. pág. 10).
- [35]ON Semiconductor. *1/3-inch CMOS Digital Image Sensor*. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AR0130CS-D.PDF> (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. pág. 25).
- [36]ON Semiconductors. *Semiconductors and Integrated Circuit Devices*. URL: <https://www.onsemi.com/> (visitado 28 de mayo de 2019) (vid. pág. 25).
- [37]Sentera. *The Sentera Double 4K*. URL: <https://sentera.com/product/dji-phantom-4-double-4k-upgrade-only/> (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. pág. 66).
- [38]Sony. *Diagonal 5.7mm CMOS Image Sensor with Square Pixel of Colro Caneras*. URL: [https://i.publiclab.org/system/images/photos/000/018/198/original/ProductBrief\\_IMX179\\_20140910.pdf](https://i.publiclab.org/system/images/photos/000/018/198/original/ProductBrief_IMX179_20140910.pdf) (visitado 13 de jun. de 2019) (vid. pág. 25).
- [39]Specim. *SPECIM FX10 High-speed, accurate and efficient camera specifically designed for industrial environments*. URL: <http://www.specim.fi/specim-fx10/> (visitado 21 de jun. de 2019) (vid. pág. 66).
- [40]SphereOptics. *SphereOptics*. URL: <https://sphereoptics.de/en/> (visitado 21 de jun. de 2019) (vid. pág. 26).
- [41]SphereOptics. *Zenith Polymer® Reflectance Standards*. URL: <https://sphereoptics.de/en/product/zenith-polymer-reflectance-standards/> (visitado 21 de jun. de 2019) (vid. pág. 26).
- [42]SphereOptics. *Zenith Polymer® Spectralon® Wavelength Standards*. URL: <https://sphereoptics.de/en/product/zenith-polymer-spectralon-wavelength-standards/> (visitado 21 de jun. de 2019) (vid. pág. 26).

- [44]Dassault Systemes. *SolidWorks 2019*. URL: <https://www.solidworks.com/es> (visitado 7 de jun. de 2019) (vid. pág. 23).
- [45]Ultimaker. *Ultimaker 3 Extended*. URL: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3> (visitado 24 de mayo de 2019) (vid. pág. 22).
- [46]Wikipedia. *Windows bitmap*. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Windows\\_bitmap](https://es.wikipedia.org/wiki/Windows_bitmap) (visitado 28 de mayo de 2019).

# Índice de figuras

1.1	Diagrama del espectro electromagnético [32] . . . . .	5
1.2	Diagrama sobre la firma espectral de diferentes elementos. . . . .	6
1.3	Diagrama de la arquitectura CCD . . . . .	9
1.4	Comparativa de sensibilidad entre diferentes tipos de sensores CCD y CMOS [34] . . . . .	10
1.5	Arquitectura de una óptica tipo whiskbroom[11] . . . . .	12
1.6	Arquitectura de una óptica tipo pushbroom[11] . . . . .	12
1.7	Arquitectura de una cámara snapshot . . . . .	13
1.8	Esquema de un sistema para aumentar la sensibilidad espectral . . . .	14
3.1	Impresora 3D Ultimaker 3 . . . . .	23
3.2	Modelo 3D de la estructura modular de la cámara . . . . .	27
3.3	Esquema del circuito electrónico con el láser y el detector como final de carrera . . . . .	28
3.4	Esquema del circuito electrónico con final de carrera mecánico . . . . .	29
3.5	Proceso de prototipado del circuito electrónico mediante una <i>protoboard</i>	30
3.6	Referencia de blanco empleada para la calibración . . . . .	34
3.7	Transmitancia del filtro 460BP20 . . . . .	35
3.8	Diagrama de flujo del algoritmo de calibración . . . . .	38
3.9	Cámara acoplada al trípode para realizar la calibración . . . . .	39
3.10	Imagen guía en el proceso de calibración obtenida sin emplear ningún filtro . . . . .	40
3.11	Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 560nm . . . . .	40
3.12	Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 670nm . . . . .	40
3.13	Imagen guía en el proceso de calibración obtenida mediante el filtro de 807.5nm . . . . .	40
3.14	Firmas espectrales de la referencia de blanco, polímero y filtros caracterizados . . . . .	42
3.15	Sensor y filtro montado en el cajón para realizar el proceso de caracterización . . . . .	43
3.16	Transmitancia ideal, ancho de banda ideal . . . . .	44
3.17	Transmitancia no ideal, ancho de banda ideal . . . . .	44

3.18	Transmitancia ideal, ancho de banda no ideal . . . . .	44
3.19	Transmitancia no ideal, ancho de banda no ideal . . . . .	44
3.20	Forma aproximada de un filtro real . . . . .	45
3.21	Diagrama de las muestras tomadas para el proceso de caracterización .	46
3.22	Diagrama de bloques del algoritmo de caracterización . . . . .	47
4.1	Diseño final de la cámara espectral desarrollada, en el que se incluye la Odroid XU4 como ordenador de abordo. . . . .	50
4.2	Estructura modular de la cámara espectral desarrollada . . . . .	50
4.3	Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 8075DF20 . . . . .	55
4.4	Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 560BP20 . . . . .	55
4.5	Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor IDS (RGB) y el filtro 475AF20 . . . . .	56
4.6	Representación de los valores de reflectancia con los que se calcula el error medio para el sensor ELP y el filtro 670BP20 . . . . .	56
4.7	Imagen RGB compuesta a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo), 560BP20 (verde) y 475BP20 (azul). . . . .	58
4.8	Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR). . . . .	58
4.9	Imagen RGB compuesta a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo), 560BP20 (verde) y 475BP20 (azul) tomada en el laboratorio. . . . .	59
4.10	Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR) tomada en el laboratorio. . . . .	60
4.11	La cámara espectral desarrollada acoplada al dron M600. . . . .	61
4.12	Imagen coloreada según los valores del índice NDVI calculado a partir de las imágenes capturadas con los filtros 670BP20 (rojo) y 807.5BF20 (NIR) capturada durante una misión de vuelo en el dron. . . . .	61
4.13	Imagen pancromática con la vegetación detectada por el índice NDVI superpuesta. . . . .	62
4.14	Diseño alternativo planteado en este proyecto que emplea una rueda mayor capaz de capturar 12 bandas. . . . .	65
4.15	Diseño alternativo planteado en este proyecto que cuenta con cuatro sensores (tipo snpashot). . . . .	65
4.16	Respuesta Espectral de la cámara de desarrollo propio, con los filtros seleccionados . . . . .	67
4.17	Respuesta Espectral de la cámara de desarrollo propio, con todos los filtros con los que cuenta el IUMA actualmente . . . . .	67

4.18	Respuesta Espectral de la cámara MicaSense Rededge-MX . . . . .	68
4.19	Respuesta Espectral de la cámara Sentera Double 4K . . . . .	68

## Índice de cuadros

3.1	Especificaciones de la impresora 3D Ultimaker 3 Extended . . . . .	23
3.2	Especificaciones del dron M600 de DJI . . . . .	24
3.3	Filtros empleados en el proyecto . . . . .	25
3.4	Tabla comparativa de los sensores empleados . . . . .	25
4.1	Especificaciones de la cámara desarrollada en este proyecto . . . . .	50
4.2	Comparativa en la orientación de los filtros con el sensor 3360CP NIR .	51
4.3	Comparativa del formato de almacenamiento con el sensor <i>3360CP NIR</i>	52
4.4	Resultados del sensor IDS Pancromático . . . . .	52
4.5	Resultados del sensor IMX179 . . . . .	53
4.6	Resultados del sensor AR0130 . . . . .	53
4.7	Desglose del presupuesto . . . . .	66
4.8	Comparativa de cámaras . . . . .	67

