

CARACTERIZACIÓN EN EL ESPECTRO VISIBLE E INFRARROJO DE CULTIVOS AGRÍCOLAS DESDE UN VEHÍCULO AÉREO MULTIRROTOR



Julián Andrés Bolaños Ortega

Trabajo de grado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Director: Ing. Liseth Viviana Campo
Co Director: PhD. Juan Carlos Corrales Muñoz
Co Director: PhD(c). Edgar Leonairo Pencue Fierro

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telemática
Popayán, 2017

Julián Andrés Bolaños Ortega

**CARACTERIZACIÓN EN EL ESPECTRO VISIBLE E INFRARROJO DE CULTIVOS
AGRÍCOLAS DESDE UN VEHÍCULO AÉREO MULTIRROTOR**

Trabajo de grado presentado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del
Título de

Ingeniero en:
Electrónica y Telecomunicaciones

Director:
Liseth Viviana Campo Arcos
MSc(C) En Ingeniería Telemática

Co-Director:
Juan Carlos Corrales Muñoz
PhD.

Edgar Leonairo Pencue Fierro
PhD.

Popayán
2017

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por todo lo que me ha permitido experimentar a lo largo de mi vida, agradezco a mis padres Dora Alicia y Marco Alejandrino por todo su apoyo, cariño y guía incondicional que me han brindado sin el cual muchas de las cosas que hoy vivo no serían posibles. A mis hermanos que siempre están ahí para apoyarme y ayudarme en todo lo que necesito. A Paola por todo su amor y apoyo durante todo el proceso de mi carrera. A mi bebé que desde que llegó a mi vida ha sido mi motor y el sentido de todo lo que hago. A mi Directora la Ingeniera Liseth Campo por su paciencia, guía y apoyo durante todo el proceso de desarrollo este trabajo de grado. A mis Co-Directores, al departamento de Telemática, a todos los docentes que hicieron parte de mi formación, a la Decanatura de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, a sus administrativos y a todos aquellos que de alguna u otra forma pusieron de su tiempo y su apoyo para finalmente consolidar este invaluable trabajo de grado.

Julián A. Bolaños O.

Resumen estructurado

La salud de las plantas es un aspecto importante en el sector de la agricultura, de ello depende la calidad y la cantidad de la producción, normalmente, se hace un monitoreo de los cultivos de forma visual basado en la experiencia de los agricultores, sin embargo, existen factores más objetivos para llevar a cabo este monitoreo, los cuales no pueden ser percibidos por el agricultor, por ello en este trabajo de grado se tiene como propósito identificar características en el espectro visible e infrarrojo del estado de las plantas mediante imágenes capturadas desde un vehículo aéreo multirrotor.

Esta caracterización se realiza buscando parámetros en los cultivos que permitan determinar o tener una idea del estado de la salud de las plantas, de donde se desprende que el parámetro adecuado para llevar a cabo esta tarea es el NDVI el cual es calculado y mapeado en un mapa de color para su fácil interpretación.

Como objetivo adicional se define la capacidad de brindar resultados al usuario de manera intuitiva, para ello, se implementa un prototipo software que consta de dos partes, la primera es una aplicación móvil que gracias a su entorno facilita el registro y control de la información de los procesos llevados a cabo, mientras que la segunda parte es una aplicación web que se encarga de la recepción y procesamiento de fotografías, además de la entrega de resultados al agricultor para su aprovechamiento.

Con el fin de evaluar el desempeño del prototipo y del método para la caracterización de cultivos agrícolas se realiza una prueba en un entorno real en donde se implementan las estrategias para la obtención de un mosaico a partir de diferentes imágenes correspondientes al mismo cultivo realizados utilizando herramientas de uso libre, para posteriormente, mediante el prototipo poder llevar a cabo la recolección y procesamiento de la información y entrega de resultados.

De los resultados, es importante destacar que se logró el cálculo de un NDVI que está entre los rangos definidos en la literatura, esto se realiza mediante una cámara comercial de bajo costo y el uso de herramientas de procesamiento de código abierto. Además se consigue la integración con tecnologías de nube que permiten mayor modularidad y manejo descentralizado de la información.

Palabras clave: Aeronave tipo Multirrotor, NDVI, Monitoreo de cultivos agrícolas, Caracterización de cultivos.

Structured Abstract

Plant health is an important aspect of the agriculture sector, the quality and quantity of production depends of this factor, commonly, a visual monitoring of the crops is done based on the experience of the farmers, however, there are more objective factors to carry out this monitoring, which can not be perceived by the farmer. Therefore, in this work of degree is intended to identify characteristics in the visible and infrared spectrum of the state of plants through images captured from an unmanned aircraft.

This characterization is performed by searching of parameters in the crops that allow to determine or have an idea of the health status of the plants from which it follows that the appropriate parameter to carry out this task is the NDVI which is calculated and mapped in a Color map for easy interpretation.

As an additional objective, it defines the ability to deliver results to the user in an intuitive way, for it, a software prototype is implemented that consists of two parts, The first is a mobile application that thanks to its environment facilitates the registration and control of the information of the processes that are executed. While the second part is a web application that is responsible for the reception and processing of photographs, in addition to the delivery of results to the farmer for their use.

In order to evaluate the performance of the prototype and the method for the characterization of agricultural crops, a test is carried out in a real environment where the strategies for obtaining a mosaic from different images corresponding to the same crop using tolos are implemented, for later, through the prototype to be able to carry out the collection and processing of the information and delivery of results.

From the results, it is important to note that the calculation of an NDVI that is between the ranges defined in the literature, this is done through a low cost commercial camera and the use of open source processing tools. In addition, integration is achieved with cloud technologies that allow greater modularity and decentralized management of information.

Keywords: NDVI, Monitoring of agricultural crops, Crop characterization.

Contenido

Agradecimientos	i
Resumen estructurado	iii
Structured Abstract	v
Contenido	vii
Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos	3
1.4. Aportes investigativos y académicos	3
1.5. Contenido	3
Capítulo 2	5
2.1. Agricultura de precisión	5
2.2. Percepción Remota	6
2.3. Fotogrametría con Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs)	6
2.4. Reflectancia Espectral	7
2.5. Índices de vegetación	7
2.6. Fotografías aéreas	9
2.6.1. Tipos de fotografías aéreas	9
2.6.2. Parámetros y propiedades de las fotografías aéreas	10
Capítulo 3	15
3.1. Captura de fotografías aéreas	15
3.1.1. Parámetros para la captura de fotografías	15
3.1.2. Sistema encargado en la recolección de fotografías	16
3.1.3. Limitaciones del sistema para la captura de información	20

3.2. Método para la captura de fotografías aéreas	21
3.2.1. Planificación del proceso de captura	21
3.2.2. Ejecución del proceso de captura de fotografías	25
3.2.3. Procesamiento de la información post captura	33
Capítulo 4	37
4.1. Monitoreo de cultivos agrícolas	37
4.2. Obtención del índice de vegetación NDVI para el monitoreo de cultivos agrícolas	39
4.2.1. Fotografía digital.....	39
4.2.2. NDVI a partir de las capturas con la cámara Raspberry Pi NoIR...	41
4.2.3. Funcionamiento de la cámara Raspberry Pi NoIR	42
4.3. Estudio del procesamiento digital de imágenes	51
Capítulo 5	67
Arquitectura y modelado del sistema Web-Móvil	67
5.1. Modelado del negocio	67
5.2. Requisitos del sistema.....	69
5.3. Descripción de la arquitectura del sistema	71
5.4.1. Dispositivos y herramientas	74
5.4.2. Sistema de gestión de información o bases de datos.....	74
5.4.3. Prototipo móvil.....	75
5.4.4. Prototipo Web	81
5.5. Puesta en Marcha de la solución	86
Capítulo 6	89
6.1. Especificación de pruebas	89
6.2. Estrategia de las pruebas	89
6.3. Gestión de planificación de las pruebas	91
6.3.1. Planificación de las pruebas.....	91
6.3.2. Control y seguimiento	92
6.4. Gestión de ejecución de las pruebas	93
6.4.1. Reconocimiento del cultivo a monitorear.	93
6.4.2. Planificación de las capturas.....	94
6.4.3. Ingreso de información al sistema.....	94

6.4.4. Realización de pruebas, pre-procesamiento y registro de datos de las pruebas	99
6.4.5. Carga de fotografías:.....	102
6.4.6. Módulo de procesamiento de la información.....	103
6.5. Generación de resultados de las pruebas	107
6.5.1. Análisis de resultados.....	112
Capítulo 7.....	117
7.1. Conclusiones.....	117
7.2. Trabajos Futuros	118
Bibliografía.....	119

Lista de Figuras

Figura 1 Ciclo de la agricultura de precisión [7].....	6
Figura 2 Espectro electromagnético [17].....	8
Figura 3 Cámara Raspberry Pi Noir [26].....	11
Figura 4 Cámara Raspberry Pi RGB [26].....	11
Figura 5 Representación gráfica del funcionamiento del sensor [19] [18].	16
Figura 6 Herramientas Utilizadas	18
Figura 7 Preparación de la aeronave	18
Figura 8 Adaptación a la plataforma aérea	18
Figura 9 Herramienta Adaptación Ar Drone 2.0	19
Figura 10 Preparación de Parrot AR Drone 2.0	19
Figura 11 Ensamblaje en Parrot AR Drone 2.0	20
Figura 12 Método para la captura de fotografías aéreas	21
Figura 13 Planificación de vuelo propuesto [40].....	22
Figura 14 Diagrama de planificación de la misión	26
Figura 15 Definición de área	27
Figura 16 Desarrollo del AutoGrid	28
Figura 17 Waypoints resultantes	28
Figura 18 Estructura archivo de Waypoints	29
Figura 19 Archivo transformado a CSV	30
Figura 20 Resultado de importar los Waypoints CSV	30
Figura 21 Vista preliminar de la captura	31
Figura 22 Diagrama de flujo archivo de captura ejecutable	32
Figura 23 Ejemplo de desenfoque de la cámara	33
Figura 24 Ejemplo OpenDroneMap	34
Figura 25 Ejemplo con Image Composite Editor.....	35
Figura 26 Reflectancia de las plantas [46] [49].....	38
Figura 27 Reflectancia en función de la longitud de onda [23].	38
Figura 28 Estructura tradicional de un sensor de cámara digital [54].	40
Figura 29 Curva de transmisión típica de un sensor de cámara digital [56].	41
Figura 30 Producto de la cámara Raspberry Pi Noir	42
Figura 31 Curva de transferencia Rosco Lux #2007 [60].	43
Figura 32 Fotografía a partir de Raspberry Pi Noir con filtro Rosco #2007	43
Figura 33 Mapa de colores Infragram	44
Figura 34 Resultados NDVI utilizando Infragram sin filtro #2007	44
Figura 35 Resultado NDVI con filtro Rosco #2007	45
Figura 36 Adaptación Raspberry Pi	45
Figura 37 Resultados de la captura sobre cultivos de arroz	46

Figura 38 Resultados NDVI a partir de las imágenes resultantes	46
Figura 39 Resultados de variar Awb	47
Figura 40 Mosaico café desde Phantom 3 Standard	48
Figura 41 Acercamiento a las plantas de café	48
Figura 42 Curvas de transferencia de los filtros 27 y 19 [60].	49
Figura 43 Primera captura con filtro Rosco 19.	49
Figura 44 Pruebas filtro Rosco 19 y resultados	50
Figura 45 Prueba filtro Rosco 19 en el aire	50
Figura 46 Proceso de análisis de imagen	51
Figura 47 Proceso de obtención de la imagen	52
Figura 48 Proceso separación de bandas	52
Figura 49 Procesamiento de bandas	53
Figura 50 Imagen RGB con filtro #19	54
Figura 51 Banda azul resultante	54
Figura 52 Bandas rojo y verde resultante	54
Figura 53 Imagen RGB con filtro 2007	55
Figura 54 Banda roja resultante	55
Figura 55 Bandas verde y azul resultante	55
Figura 56 Imagen Original (RGB)	56
Figura 57 Bandas imagen RGB (Roja, Verde y Azul Respectivamente)	56
Figura 58 Imagen Original NoIR Filtro #2007	57
Figura 59 Bandas Imagen NoIR Filtro #2007(Roja, Verde y Azul)	57
Figura 60 Imagen Original Filtro Noir #19	57
Figura 61 Bandas Imagen NoIR Filtro #19(Roja, Verde y azul)	57
Figura 62 Captura mediante alineación de las cámaras	58
Figura 63 Bandas combinadas (Rojo, IR)	59
Figura 64 Imagen resultante de la combinación	59
Figura 65 Resultado NDVI con las bandas combinadas	59
Figura 66 Bandas combinadas (Azul, IR)	60
Figura 67 Resultado de la combinación de imágenes	60
Figura 68 Resultado NDVI Filtro con bandas combinadas #2009	60
Figura 69 Diagrama de flujo Aproximación de bandas	62
Figura 70 Banda Roja Real vs Banda Roja Aproximada	63
Figura 71 Banda Azul Real vs Banda Azul Aproximada	63
Figura 72 Proceso de cálculo de NDVI	64
Figura 73 Función mapeo de resultados	64
Figura 74 Mapa de colores	65
Figura 75 Modelo de casos de uso del negocio	68
Figura 76 Diagrama de objetos del negocio	69
Figura 77 Arquitectura Preliminar	72
Figura 78 Modelado de vistas 4+1 [72]	73
Figura 79 Diagrama relacional	75
Figura 80 Diagrama de funcionalidades HFA	76
Figura 81 Pantalla principal	77
Figura 82 Vistas para agregar proceso	77

Figura 83 Vista de un proceso	78
Figura 84 Plantilla proceso de captura	79
Figura 85 Dependencias de Azure Servicio Móvil	81
Figura 86 Pantalla principal Procesos	82
Figura 87 Vista individual proceso	82
Figura 88 Interfaz detalles de proceso	83
Figura 89 Interfaz subir fotografías	83
Figura 90 Gestor de archivos de vuelo	84
Figura 91 Área a cubrir [86].....	94
Figura 92 Carga de información al sistema	95
Figura 93 Agregar Phantom 3 Standard	95
Figura 94 Agregar Raspberry Pi al proceso	96
Figura 95 Resumen Creación del proceso	97
Figura 96 Información del proceso ya implementado	98
Figura 97 Planificación de la misión Phantom 3 Standard Litchi App	99
Figura 98 Resultados proceso de captura	100
Figura 99 Pruebas con Filtro rojo AWB 0.54,1	101
Figura 100 Pruebas con filtro rojo Awb 1,1	101
Figura 101 Mosaicos filtro azul Awb 1,1	102
Figura 102 Interfaz de carga de fotografías a las diferentes tareas	102
Figura 103 Programa para el procesamiento de imágenes	104
Figura 104 Diagrama de flujo método procesar imagen	104
Figura 105 Función cálculo de NDVI	105
Figura 106 Aplicación de ColorMap	106
Figura 107 Interfaz principal con los procesos terminados	107
Figura 108 Habilidad de Mostrar Resultados	107
Figura 109 Resultados por proceso	108
Figura 110 Resultados En PDF	109
Figura 111 Resultados NDVI Aplicación móvil	110
Figura 112 Resultados Filtro Rojo AWB 11	111
Figura 113 Resultados Filtro Rojo AWB 0.54,1	111
Figura 114 Resultados Filtro Azul AWB 11	112
Figura 115 Diagrama de flujo Clasificar NDVI	113

Lista de Tablas

Tabla 1 Índices de vegetación más comunes. [15], [4].....	8
Tabla 2 Comparación cámaras disponibles.....	12
Tabla 3 Comparación de software para fusión de imágenes.	35
Tabla 4 Descripción softwares de prueba.	36
Tabla 5 Lista de características del sistema.....	71
Tabla 6 Actividades de las pruebas.....	91
Tabla 7 Cronograma de las pruebas	92
Tabla 8 Verificación de riesgos	93
Tabla 9 Estrategias de mitigación de los riesgos identificados.	93
Tabla 10 Resultados Pruebas Filtro rojo awb 11	114
Tabla 11 Resultados Pruebas Filtro rojo Awb 0541	115
Tabla 12 Resultados Pruebas Filtro azul Awb 11	115

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La producción agrícola en diversos mercados alrededor del mundo se constituye como la base del sistema económico, siendo la principal fuente de ingresos y de trabajo para el 70% de la población que viven en zonas rurales a nivel mundial [1]. Gracias a la creciente demanda de los productos agrícolas, se han desarrollado nuevas aplicaciones y soluciones tecnológicas dirigidas a las prácticas agrícolas, una de las técnicas con mayor popularización por su efectividad es la agricultura de precisión, con dicha técnica se ha conseguido que el productor pueda analizar y medir las variaciones en sus lotes, maximizando el rendimiento de la producción agrícola y los recursos como la tierra y el agua, los cuales han presentado agotamiento y degradación con el pasar del tiempo.

La observación directa de las plantas no permite conocer objetivamente el estado de las mismas, de forma que se necesita emplear un sistema que sea capaz de reconocer diferentes bandas del espectro electromagnético que revelen la sanidad en los cultivos, y permitan monitorear el desarrollo de las plantas. Estos requisitos se pueden cubrir realizando una caracterización del cultivo mediante fotografías en el espectro visible e infrarrojo. En el mercado existen tecnologías dedicadas puntualmente a esta tarea, sin embargo, su alto costo no permite que sean de fácil acceso a los agricultores, estas situaciones motivan al desarrollo de tecnología de bajo costo con la capacidad de dar beneficios al agricultor, de forma que incentiven las actividades agrícolas [1] [2].

1.2. Planteamiento del problema

Colombia es un país rico en materias primas y goza de condiciones tropicales para llevar a cabo prácticas agrícolas, dichas condiciones permiten que se puedan cultivar toda clase de productos. De acuerdo a dicho contexto, se realizan estudios desde la ingeniería para lograr soluciones que mejoren la producción y la calidad de los productos, estas soluciones están orientadas hacia la agricultura de precisión, que se basa en el desarrollo de buenas prácticas agrícolas con el fin de optimizar la forma de cultivar. La Agricultura de precisión ha evolucionado en los últimos 10 años hasta llegar a implementar avances tecnológicos como los sistemas de información geográfica, los sistemas de posicionamiento global, sensores satelitales o terrestres, herramientas *software* de procesamiento de datos, entre otros; que ayudan al agricultor a conocer detalladamente las condiciones de los cultivos y a ejecutar acciones de contención, prevención y sostenimiento [3], [4]. Una de las etapas importantes en la agricultura de precisión es el procesamiento de la información, que es la base para la caracterización de los cultivos, es decir, el conocimiento de sus propiedades físicas y fisiológicas. Entre los métodos relevantes para la caracterización de cultivos se encuentra la fotogrametría aérea, que entrega como resultados destacados mosaicos georreferenciados, modelos digitales de terreno y de superficie e índices de vegetación que corresponden a combinaciones matemáticas entre los diferentes niveles espectrales que se encuentran en una fotografía [5]. Generalmente se hace análisis fotogramétrico sobre imágenes satelitales [4]; sin embargo esta tecnología presenta altos costos de implementación y baja resolución, generando interés por evaluar otras alternativas como el uso de aeronaves no tripuladas, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Aunque dichos vehículos aéreos pueden superar estas dificultades, tienen limitaciones en el tiempo de operación y la capacidad de carga; existen sensores que se adaptan a dichas condiciones, entre las opciones están, los sensores láser, sensores de calor, cámaras infrarrojas, cámaras multiespectrales, cámaras RGB (Espectro visible) y cámaras ultravioleta; de los cuales se destacan las cámaras de espectro visible e infrarrojo que a diferencia de las cámaras multiespectrales son más accesibles a los usuarios permitiendo calcular índices de vegetación fundamentales como NVDI (*Normalized Difference Vegetation Index*) que puede ser útil para determinar el estado vegetativo de las plantas [5]. Con una correcta caracterización de los cultivos, es posible interpretar los datos adquiridos en las prácticas de la agricultura de precisión, y así optimizar la aplicación de fertilizantes y llevar un control en espacio y tiempo eficientes. Sin embargo, de acuerdo a lo investigado, actualmente existe poca familiarización por parte del agricultor con los alcances y la información suministrada por la fotogrametría en agricultura de precisión, además que los resultados del proceso de caracterización no son lo suficientemente claros para ser aprovechados por los agricultores. Teniendo en cuenta lo anterior, existe la necesidad de avanzar en el estudio del uso de los UAV y de las ventajas que estos pueden generar con el fin de apoyar al agricultor. Por lo tanto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo monitorear el desarrollo de un cultivo agrícola mediante fotografías aéreas en el espectro visible e infrarrojo obtenidas desde un vehículo aéreo multirroto?

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Caracterizar un cultivo agrícola para el monitoreo del desarrollo de las plantas mediante fotografías aéreas en el espectro visible e infrarrojo obtenidas desde un vehículo aéreo multirroto.

1.3.2. Específicos

- Implementar un mecanismo para obtención de fotografías en el espectro visible o infrarrojo desde una plataforma aérea no tripulada tipo multirroto.
- Definir parámetros de caracterización para el monitoreo del desarrollo de las plantas teniendo en cuenta el alcance del vehículo aéreo no tripulado.
- Diseñar un prototipo para el proceso de caracterización y posterior despliegue de resultados dirigido a productores agrícolas.

1.4. Aportes investigativos y académicos

- Diseño de una estrategia de caracterización de cultivos considerando una cámara RGB e infrarroja adaptada a una tarjeta de procesamiento portada en un vehículo aéreo multirroto.
- Implementación de un prototipo para monitorización de cultivos mediante el análisis de fotografías aéreas con diseño centrado en el usuario para la interpretación adecuada de agricultores que no estén familiarizados con el proceso tecnológico.
- Integración de plataformas de nube, técnicas de procesamiento de imágenes, tecnologías móviles y de sistemas aéreos no tripulados que puedan apoyar la caracterización de cultivos

1.5. Contenido

La estructura del presente trabajo de grado se describe a continuación:

Capítulo 1: Se exponen las bases del presente trabajo de grado. Se presenta la motivación del tema del trabajo, el planteamiento detallado del problema y se definen los objetivos, aportes investigativos y todas las contribuciones del trabajo.

Capítulo 2: Se describe detalladamente una base conceptual que permita entrar en contexto en torno a los conceptos básicos que tienen que ver con la agricultura y las aeronaves no tripuladas.

Capítulo 3: Se presenta el diseño de un mecanismo que permita la obtención de fotografías en el espectro visible e infrarrojo. Se describe la cámara utilizada y sus características principales. Se describen la adaptación de dicha cámara a la aeronave no tripulada para que pueda cumplir con el mecanismo propuesto.

Capítulo 4: Se presenta un estudio de parámetros de caracterización que permitan llevar a cabo un monitoreo del desarrollo de las plantas.

Capítulo 5: Se presenta el diseño de la arquitectura e implementación del prototipo que permita la recolección y el despliegue de información dirigida a productores agrícolas.

Capítulo 6: En este capítulo se describen las pruebas realizadas para la evaluación del trabajo desarrollado. Se realiza la evaluación del prototipo así como también del proceso de caracterización en entornos de cultivos reales.

Capítulo 7: Se entregan las conclusiones obtenidas en el desarrollo del presente trabajo; Adicionalmente, se presentan trabajos futuros

.

Capítulo 2

Procesos agrícolas y aeronaves no tripuladas

En este capítulo se realiza una introducción a la base del conocimiento que se asocia a los procesos agrícolas y las aeronaves no tripuladas, tiene como objetivo introducir conceptos fundamentales para la comprensión de las tecnologías manejadas y una base teórica sobre el entorno de este trabajo de grado. Inicialmente se define la agricultura de precisión como el contexto en el cual se encuentra este trabajo de grado, seguidamente se describen las herramientas de la agricultura de precisión como lo es la percepción remota para finalmente concluir con las fotografías aéreas y las aeronaves no tripuladas.

2.1. Agricultura de precisión

Se entiende como agricultura de precisión (AP) todas aquellas técnicas empleadas con el fin de optimizar el rendimiento de los cultivos y la eficacia en la producción de los mismos [3]. La AP también conocida como gestión específica del sitio, utiliza avanzados métodos en fotogrametría para realizar la recolección y procesamiento de datos que provienen directamente del área o cultivo de interés. Estas técnicas son ideales para cultivos de alta producción debido a que se consideran como prácticas amigables con el medio ambiente, además es una herramienta para los agricultores y productores mediante la cual pueden monitorear posibles plagas o marchitamiento de sus cultivos, al tiempo que permite medir, analizar y manejar la variabilidad dentro de los cultivos, consiguiendo una correcta aplicación de insumos que repercuten en un beneficio económico y ecológico [6]. En la Figura 1 se representa cada una de las etapas de la agricultura de precisión, y se detalla que en la recolección de información se requiere de un mapa de rendimiento, el cual se consigue con la percepción remota, que es una de las herramientas más importantes de la agricultura de precisión [7] [8].

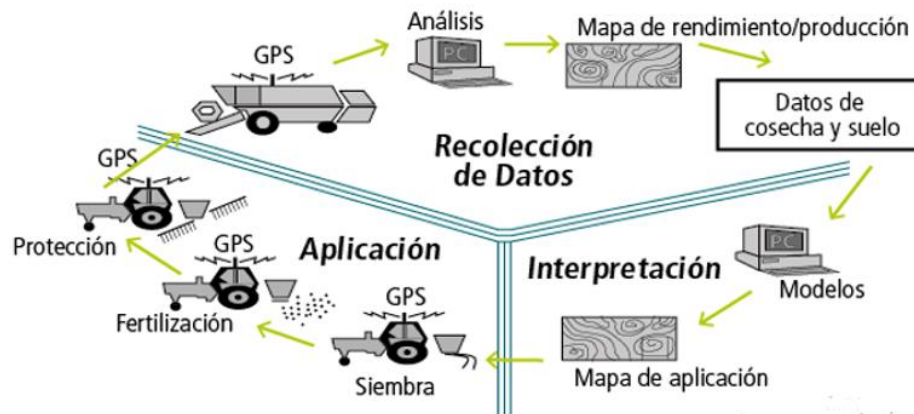


Figura 1 Ciclo de la agricultura de precisión [7].

2.2. Percepción Remota

Uno de los métodos de recolección de datos más utilizados para la AP es la percepción remota mediante la cual se obtiene información de la superficie de la tierra sin estar en contacto con ella, ya sean fotografías, valores de temperatura, humedad, luminosidad; así como también los datos obtenidos del estado del agua en el suelo que pueden ayudar a las labores de irrigación y mantenimiento [9] [10]. Los sensores pueden ser proximales, satelitales y aerotransportados, los sensores satelitales son comúnmente utilizados para percepción remota debido a que son ideales en la cobertura a gran escala de una determinada región, pero con la desventaja de ser dependiente de condiciones atmosféricas, y además, si se trata de un área pequeña los costos se elevan considerablemente. Existen sensores aerotransportados en los que se destacan las cámaras, scanner, radares e incluso sensores laser para la recolección de datos LiDAR; los sensores proximales miden variables para definir el comportamiento de los parámetros biofísicos del cultivo como temperatura, agua y nutrientes [11].

2.3. Fotogrametría con Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs)

La fotogrametría es una rama de la percepción remota y puede definirse como la técnica para obtener información fiable de los objetos del entorno mediante el análisis e interpretación de imágenes o patrones de radiación [3], desde hace muchos años se hace uso de sistemas UAV en muchos campos de la ciencia y para múltiples propósitos, hoy en día gracias a los avances tecnológicos y a la disminución de los costos se consigue llevar dichos sistemas a los cultivos agrícolas. Entre las principales ventajas del uso de aeronaves no tripuladas en la

AP se encuentran el costo de implementación, el alcance, la exactitud y la fiabilidad con la que se pueden efectuar varios estudios, en los que se puede realizar análisis de los índices de vegetación, monitoreo de enfermedades, control de plagas, estudio de la eficacia de insecticidas y abonos entre otras [12]; los UAV son equipados con distintos tipos de dispositivos dependiendo de la aplicación, para el caso de la fotogrametría se requiere de una cámara con especificaciones determinadas que permita realizar capturas en diferentes rangos del espectro como por ejemplo RGB(espectro visible), UV(espectro ultravioleta) o IR(espectro infrarrojo), con las cuales se pueden construir mosaicos digitales de superficie a escala real, además de mapeo en 2D Y 3D.

2.4. Reflectancia¹ Espectral

Una de las fuentes de radiación más importantes es el sol, las superficies absorben o reflejan esta radiación y eso depende de las longitudes de onda de la misma, o de las características de dichas superficies tales como su composición o rugosidad, por lo tanto esta información sirve para conocer diferentes aspectos importantes de las superficies a estudiar. [11] [13].

La vegetación saludable por ejemplo, absorbe casi todas las longitudes de onda que componen el espectro visible, esto se debe a la fotosíntesis, pero gracias a la estructura molecular de las hojas refleja por completo las longitudes en la banda del infrarrojo cercano. El agua pura refleja poca energía en todas las longitudes de onda, diferente del hielo y la nieve que poseen una alta reflectancia en todas las bandas, en el caso del suelo la energía reflejada depende si tiene presencia de materia orgánica, la textura y rugosidad, entre otros. [14] [13].

2.5. Índices de vegetación

Las bandas visibles e infrarrojas del espectro electromagnético están directamente relacionadas con diferentes factores fisiológicos de las plantas, como lo son el proceso de la fotosíntesis, humedad, clorofila, etc. Normalmente la reflectancia espectral en una planta varía de acuerdo a la longitud de onda y a su estado fisiológico, por lo tanto es posible realizar combinaciones matemáticas entre dichas bandas espectrales para resaltar la vegetación de su entorno, el resultado de este proceso se le denomina índice de vegetación y es útil para tener idea de los procesos fisiológicos de las plantas [5].

En la tabla 1 se presenta un resumen de los índices de vegetación más comunes, la nomenclatura utilizada será la siguiente $R_{\#}$, donde R corresponde al diminutivo de reflectancia y # corresponde a la banda específica en el espectro electromagnético dada en nanómetros (nm). [15], [4].

¹ Reflectancia se refiere la capacidad de un cuerpo de reflejar luz

En la Figura 2 se presenta una representación gráfica del espectro electromagnético tomada de [16].

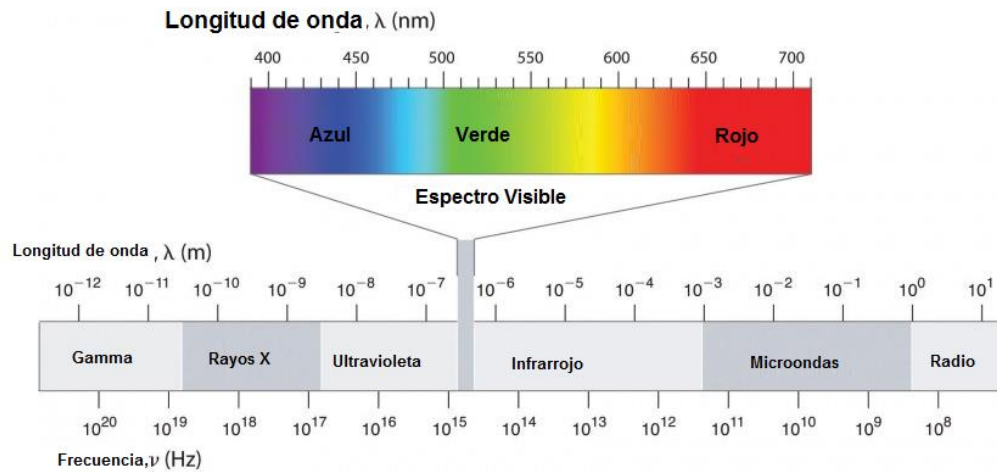


Figura 2 Espectro electromagnético [17]

Índice de vegetación	Descripción	Formula
NDVI	El Índice de vegetación de diferencia normalizada sirve para medir el crecimiento y calidad de la vegetación. Se calcula a partir de las bandas de infrarrojo cercano y el espectro visible.	$\frac{R_{850} - R_{680}}{R_{850} + R_{680}}$
SAVI	El índice de vegetación ajustado al suelo está diseñado para disminuir la alteración en el NDVI que se produce en zonas áridas.	$(1 + L) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + L}$
MSAVI	Índice de vegetación modificado ajustado al suelo	$\frac{2R_{800} + 1 - \sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - 8(R_{800} - R_{670})}}{2}$
OSAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo óptimo	$(1 + 0.16) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	$\frac{R_{850} - R_{550}}{R_{850} + R_{550}}$
ExG	Índice con exceso de verde	$\frac{2R_{590} - R_{680} - R_{515}}{R_{590} + R_{680} + R_{515}}$
ExGR	Exceso de verde menos exceso de rojo ExG-ExR	$\text{ExG} - \frac{-R_{590} + 1.4R_{680}}{R_{590} + R_{680} + R_{515}}$

Tabla 1 Índices de vegetación más comunes. [15], [4].

De los índices de vegetación anteriores se destaca el NDVI debido a que con este se resaltan aspectos como la salud de las plantas, así como también es posible

llevar a cabo un monitoreo del desarrollo de las plantas. Existen diferentes variaciones de este tales como el MSAVI y el SAVI que incluyen factores para corregir la incidencia del suelo. Se estudia más en detalle este tema en el capítulo 4

2.6. Fotografías aéreas

Una fotografía aérea se considera como la imagen de un terreno que es captada desde una plataforma aérea equipada con cámaras fotográficas que son destinadas para tal fin [18] [19]. Representan una buena fuente de información que permite llevar a cabo diferentes tipos de estudio como lo son: el levantamiento topográfico, búsqueda y rescate, etc. Se pueden encontrar diferentes tipos de fotografías aéreas así como también diferentes parámetros y características especiales que las componen y serán detallados a continuación:

2.6.1. Tipos de fotografías aéreas

Las fotografías aéreas se pueden clasificar ya sea por la inclinación de su eje óptico o el tipo de película utilizada para la captura de imágenes, se detalla cada una de ellas:

Clasificación por inclinación de su eje óptico: Según el ángulo de inclinación del eje óptico se tiene que las fotografías pueden ser verticales u oblicuas [20] [21].

- **Fotografías aéreas verticales:** son aquellas que se toman en dirección vertical a un plano base, existe una tolerancia comúnmente manejada de 1 a 3° de inclinación. En ellas se considera que la escala fotográfica es constante en todos los puntos de la imagen [21].
- **Fotografías aéreas Oblicuas:** Son aquellas en las cuales el eje óptico no es perpendicular al plano horizontal en el momento de la captura, este tipo de fotografías aéreas también se pueden clasificar en fotografías oblicuas con y sin horizonte, siendo las primeras denominadas fotografías oblicuas altas o panorámicas en las cuales el eje óptico tiene una desviación de 45 a 90° del eje horizontal, y las fotografías aéreas oblicuas bajas las cuales dicha desviación se encuentra entre los 3 y 45°. Las fotografías aéreas oblicuas conllevan una alta variación en su escala motivo por el cual su uso cotidiano es para fines turísticos o ilustrativos [19] [21].

Clasificación por el tipo de película empleada: Según el fin deseado para la fotografía se puede tener una película para la captura determinado y se clasifican en:

- **Fotografías en blanco y negro:** Estas fotografías tienen la característica de poseer diferentes tonalidades de gris, blanco y negro, se caracterizan por haber sido utilizadas durante mucho tiempo y también por poseer una alta resolución [22].
- **Fotografías en color:** Estas fotografías permiten capturar todos los colores para que puedan ser apreciados en forma similar en como lo hace la visión del ser humano. Poseen un costo más alto que las de blanco y negro pero permiten analizar muchos más de talles que estas mismas, son utilizadas en muchos campos de la ciencia así como también para fines turísticos [23] [24].
- **Fotografías en infrarrojo cercano:** Tienen la característica de poder capturar radiaciones en la banda infrarroja que reflejan ciertos objetos, la forma de exposición de estas fotografías se puede dar en forma de blanco y negro, en las cuales las zonas de mayor radiación serán más claras y viceversa, así como también fotografías en falso color, que son bastante comunes y útiles para estudiar la vegetación y los índices de vegetación [23] [24].
- **Fotografías térmicas:** Son fotografías que se obtienen de la radiación que producen las fuentes de temperatura, estas fotografías son de gran utilidad en el campo militar las cuales permiten diferenciar entre personas y animales [23] [24].

2.6.2. Parámetros y propiedades de las fotografías aéreas

Las fotografías aéreas poseen diferentes parámetros y propiedades que es importante estudiarlos para poder llevar a cabo un buen proceso de captura, se presenta una breve descripción de cada uno de los más importantes [19] [25],

- **Escala:** Esta propiedad es de gran importancia a la hora de estudiar una fotografía aérea, pues es la que permite determinar medidas en el mundo real, y está directamente relacionada con la altura a la cual se realiza la captura, lo ideal es que sea constante a lo largo de toda la fotografía. Tiene la característica de ser adimensional [19] [21].
- **Distancia Focal:** es una medida entre el eje punto central del sensor y el punto focal del lente, esta característica es útil para tener idea de la altura a la que se realizó la captura.
- **Resolución:** Esta propiedad es importante porque esta permite calcular el tamaño real de la imagen utilizando la escala de la fotografía y el tamaño del sensor [25]

2.6.3. Cámaras involucradas.

En este trabajo de grado se utilizan las cámaras de Raspberry Pi debido a que se cuenta con un sensor que no posee el filtro de corte infrarrojo, lo que evita que se altere la estructura original de la cámara.

- **Raspberry Pi Cámara NOIR:** es una herramienta complementaria de la tarjeta de desarrollo **Raspberry Pi** que permite realizar capturas de fotografías de forma automática, ya sea en lapsos de tiempo o en momentos específicos [26]. Esta cámara se caracteriza por no poseer el filtro bloqueador de infrarrojos permitiendo realizar capturas en la banda del infrarrojo cercano, haciéndola útil a la hora de analizar la sanidad vegetal [27]. Esto se analiza más detalladamente en el capítulo 4.



Figura 3 Cámara Raspberry Pi Noir [26].

- **Raspberry Pi Cámara RGB:** este módulo es similar a la cámara Raspberry Pi NoIR, pero se diferencia en poseer un filtro de bloqueo de la banda del infrarrojo cercano, que permite obtener información de los canales de la **banda visible** del espectro.



Figura 4 Cámara Raspberry Pi RGB [26]

En la tabla 2 se presenta una comparativa entre las cámaras analizadas y sus principales características.

Nombre	Resolución	Descripción	Precio
Raspberry Pi Camera NOIR	5 Megapíxeles	Cámara RGB+NIR pertenecientes al kit de accesorios de Raspberry Pi	\$25 US
Raspberry Pi Camera	5 Megapíxeles	Cámara RGB perteneciente al kit de accesorios de Raspberry Pi	\$25 US

Tabla 2 Comparación cámaras disponibles.

El módulo de cámara Raspberry Pi está compuesto por una tarjeta de desarrollo y un sensor de 5 megapíxeles ubicado detrás de un lente de punto fijo. En conjunto, su masa es de 75 gramos y se alimenta con una fuente de 5 voltios a 1 amperio, la comunicación se realiza mediante WiFi. Las cámaras RGB y NoIR son operadas por el *software Raspistill* para la captura de fotografías o *Raspivid* para videos, que vienen preinstalados en la imagen definida por el fabricante [26]. El sistema operativo está basado en Linux el cual está disponible en la web del fabricante, este sistema se instala en una memoria SD de mínimo 8GB de espacio. En este trabajo de grado se emplea una memoria de 32GB para cubrir la demanda de almacenamiento de imágenes; además se emplea como **cámara principal** la **Raspberry PI NoIR** por sus características que permiten obtener información de la banda del infrarrojo cercano, que es la apropiada para estudiar la sanidad vegetal [27].

2.6.4. Plataforma aérea no tripulada:

La plataforma se caracteriza por ser la portadora del sensor o cámara, comúnmente se les conoce como VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) o por sus siglas en inglés UAV. Entre los diferentes tipos de plataforma se encuentran las de ala fija que se caracterizan por tener una mayor velocidad y eficiencia, adecuados para cubrir áreas extensas [28] [25] [29] [30]; por otra parte se encuentran las plataformas tipo ala rotatoria las cuales son utilizadas para trabajos de alta precisión gracias a que no dependen de la velocidad para mantenerse en el aire y pueden permanecer en un punto fijo. Sin duda alguna, cada uno de los tipos de plataforma está enfocada a diferentes ámbitos y entornos, por lo que se las considera complementarias. A lo largo de este trabajo de grado se manejarán las plataformas de ala rotatoria tipo multirrotor descritas a continuación, pues dichas aeronaves no tripuladas son aptas para realizar capturas en áreas pequeñas y manejan una precisión más elevada que los UAV de ala fija. En [31] se puede encontrar un resumen de sus características principales.

2.6.4.1. Ar Drone 2.0

Esta plataforma tipo cuadricóptero tiene un alcance de operación aproximada de 100 metros y un tiempo de vuelo de aproximadamente 10 minutos. Tiene la ventaja de que el *software* para operarla es de uso libre y multiplataforma. Posee una cámara frontal con resolución HD y para poder operarlo de forma autónoma es necesario utilizar el módulo GPS que es un accesorio opcional.

2.6.4.2. Phantom 3 Standard

Esta plataforma tipo cuadricóptero tiene un alcance de operación aproximado de 500 metros y una autonomía aproximada de 25 minutos de vuelo. La desventaja de esta plataforma es que requiere utilizar una aplicación de pago llamada Litchi² para operación con dispositivos móviles, que para efectos de este trabajo de grado fue adquirida de la tienda *PlayStore*. Esta aplicación permite crear misiones manualmente a partir de la función Waypoints³ y desplegarlas en la aeronave de acuerdo a la configuración deseada. Esta plataforma fue adquirida con el fin de facilitar el proceso de captura ya que según la literatura revisada esta plataforma presenta una autonomía más elevada así como también los estándares de calidad son más altos, también permite mayor facilidad para el montaje de la cámara y posee una estabilidad más calibrada, además la tecnología empleada por DJI phantom permite tener distancias de vuelo de hasta 1 kilómetro frente a los 100 metros del Parrot AR Drone [32].

² Se refiere a la aplicación de pago especializada en gestionar vuelos autónomos para UAVs de la marca DJI, entre sus características se encuentran el seguimiento, la opción Waypoints, una aplicación web para ayuda a la programación, la ventaja es que permite realizar vuelos autónomos que la aplicación oficial de DJI no permite.

³ Se refiere a puntos geo referenciados por los cuales la aeronave pasará siguiendo una línea de vuelo.

Capítulo 3

Método para la captura de fotografías aéreas

Este capítulo tiene como finalidad establecer un método para la captura de fotografías aéreas mediante las plataformas disponibles para este trabajo de grado, inicialmente se estudian las características generales de las fotografías, las herramientas utilizadas para llevar a cabo un proceso de captura teniendo en cuenta sus limitaciones y sus ventajas, para posteriormente establecer las etapas del método a utilizar descrito de forma de tallada en cada una de sus fases, finalmente se concluye con la obtención de un mosaico no georreferenciado que será el producto del proceso de captura de fotografías.

3.1. Captura de fotografías aéreas

El proceso de captura de fotografías aéreas se realiza utilizando una plataforma aérea ya sea tripulada o no, y una cámara o sensor que se encarga de la recolección de la información. En dicho proceso intervienen todos los parámetros de sensor y las características de la aeronave a utilizar, se pueden utilizar diferentes tipos de cámara ya sean multiespectrales, hyperespectrales o RGB, portados en plataformas que pueden ser tipo ala rotatoria o de ala fija [33] [30]. Con estas herramientas se desea obtener una imagen que cuente con una alta resolución (cm/píxel). La resolución es inversamente proporcional a la altura de vuelo, pero directamente proporcional al área cubierta por una sola fotografía, gracias a esta ventaja los sistemas aéreos no tripulados pueden abarcar áreas extensas a una baja altitud, desempeñando un papel importante al permitir capturar múltiples fotografías que posteriormente se pueden combinar para formar un mosaico [34] [3] [28] [35] [36].

3.1.1. Parámetros para la captura de fotografías

Para llevar a cabo el proceso de recolección de información se deben conocer las circunstancias óptimas que respeten las limitaciones del sistema aéreo no tripulado, dichas circunstancias están determinadas por diferentes parámetros

físicos que intervienen en el proceso de captura, estos parámetros están influenciados y definidos por el alcance de las herramientas utilizadas, por lo que es necesario analizarlos y precisar límites para cada uno de ellos, con el fin de reconocer el rango de operación en el que se encuentran, y de esta forma conseguir optimización de recursos, [37] [19] [21] entre los más importantes están:

- Altura de vuelo
- Velocidad máxima de la aeronave
- Velocidad de captura de la cámara
- Área a cubrir
- Autonomía de vuelo

3.1.2. Sistema encargado en la recolección de fotografías

Un sistema aéreo no tripulado es integrado por uno o múltiples sensores, una plataforma aérea y una estación en tierra, en conjunto se encargan de la recolección de la información. En el desarrollo de este trabajo de grado el sensor hace referencia a la cámara digital que captura las fotografías, adaptada a la plataforma aérea para realizar la captura, la cual es controlada por una estación en tierra. Se describen a continuación cada uno de ellos.

3.1.2.1. El sensor o cámara:

Se caracteriza por poseer una distancia focal definida y un tamaño físico con una resolución en cantidad de píxeles, que define el área cubierta por cada fotografía en función de la altura. A continuación se representan gráficamente de dichas características [19] [18].

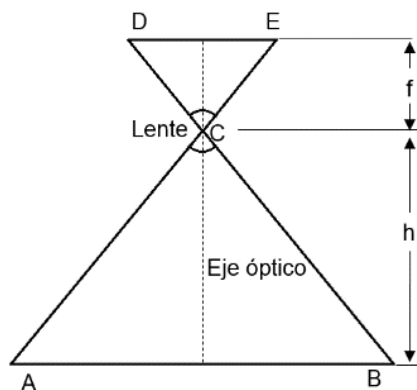


Figura 5 Representación gráfica del funcionamiento del sensor [19] [18].

Donde:

- d_{AB} = Distancia en el terreno en los puntos AB.
- d_{DE} = Distancia o tamaño físico de un lado del sensor.
- h = Altura de vuelo.
- f = Distancia focal.

De aquí se deduce la relación matemática correspondiente a la **escala de la fotografía** y es denotada por:

$$\frac{f}{h} = \frac{d_{DE}}{d_{AB}} = \varepsilon \quad (1)$$

En la Figura 5 se representa un caso ideal, en el cual el eje óptico es perfectamente perpendicular a la superficie terrestre [25] [38].

3.1.2.2. Adaptación de la cámara al sistema de la plataforma aérea

En la adaptación de la cámara se consideran factores como su fuente de alimentación, su peso y su volumen. Una de las ventajas del módulo de cámara Raspberry Pi, es su **peso** de alrededor de 75 gramos, permitiéndole que sea adaptable a las plataformas de vuelo sin sobrepasar su capacidad de carga. A continuación, se describe el proceso de adaptación a cada una de las plataformas manejadas a lo largo del proyecto.

- **Adaptación de la cámara a Phantom 3 Standard**

Para hacer posible la adaptación, fue removido el módulo de cámara original pre instalado en la aeronave, permitiendo la instalación del módulo de cámara Raspberry Pi sin exceder la capacidad de carga para la cual fue diseñada, de esta manera se consiguió agregar una batería encargada de alimentar exclusivamente a la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi B+. (Se presentan datos técnicos de la aeronave en el anexo B) la adaptación se llevó a cabo en 3 pasos descritos a continuación.

a) Establecimiento de las herramientas:

Las herramientas involucradas son, un banco de batería de 5 voltios, la aeronave Phantom 3 Standard, un cable USB, La Raspberry PI, el módulo de cámara y amarras que permiten sujetar entre si todas las herramientas.



Figura 6 Herramientas Utilizadas [Fuente propia]

b) Preparación de la aeronave:

La aeronave debe mantener la tarjeta madre del módulo de cámara original para que sea posible realizar la comunicación, para ello esta se aísla en la parte inferior de la aeronave.



Figura 7 Preparación de la aeronave [Fuente propia]

c) Ensamblaje final:

Se integra el cable USB, la tarjeta Raspberry Pi, la batería y el módulo de cámara, para ser adaptado a la aeronave. Además, se emplean amarras de forma que todo el conjunto de herramientas esté bien sujeto, y así se eviten movimientos de la cámara que produzcan distorsiones en las imágenes, manteniendo equilibrado el centro de masa.



Figura 8 Adaptación a la plataforma aérea [Fuente propia]

- **Adaptación de la cámara a Parrot AR Drone 2.0:**

La adaptación se lleva a cabo en 3 pasos descritos a continuación.

a) Establecimiento de las herramientas:

Entre las herramientas se encuentran un cable USB, la tarjeta Raspberry Pi, el módulo de cámara, el módulo de GPS para el Parrot Ar Drone y amarras que permiten sujetar entre si todas las herramientas.



Figura 9 Herramienta Adaptación Ar Drone 2.0 [Fuente propia]

b) Preparación de la aeronave:

La aeronave no podrá llevar consigo la protección de exteriores ni interiores que se integran con la misma, debido a que afecta la capacidad de carga, además deberá llevar un módulo GPS para habilitar la capacidad de realizar vuelos autónomos.



Figura 10 Preparación de Parrot AR Drone 2.0 [Fuente propia]

c) Adaptación final:

En la adaptación final se debe tener en cuenta el equilibrio del centro de masa de la aeronave, para ellos la tarjeta Raspberry Pi deberá ir en la parte superior de esta, debido a que en la parte inferior se presenta obstrucción a los sensores de posicionamiento. Gracias a que el módulo de la cámara posee un bus CSI (*Camera Serial Interface*) flexible, se consigue posicionar la cámara en la parte inferior de la aeronave.



Figura 11 Ensamblaje en Parrot AR Drone 2.0 [Fuente propia]

Una de las desventajas de la adaptación a esta aeronave es que se debe desmontar el módulo cada vez que sea necesario un cambio de batería.

3.1.2.3. Estación de tierra o control de tierra

Se encarga de llevar a cabo un control de la plataforma aérea, la comunicación se realiza mediante un medio inalámbrico ya sea WiFi, Bluetooth u otro conocido. Es posible encontrar diferentes clases de dispositivos que cuentan con tecnología de comunicación inalámbrica como teléfonos inteligentes o tabletas, computadoras portátiles o también radiocontroles para llevar a cabo el control de misiones manualmente. En este trabajo de grado se emplean todas las estaciones de tierra mencionados anteriormente, el uso de la misma dependerá del fin u objetivo de la misión además de la plataforma empleada.

3.1.3. Limitaciones del sistema para la captura de información

Existen diversas limitaciones que pueden afectar el proceso de obtención de información, estas son definidas por las especificaciones de las plataformas de vuelo y los sensores, así como también los elementos externos que puedan verse involucrados. A continuación, se presenta una breve descripción de las más comunes e importantes:

- **Autonomía de vuelo:** Limita el tiempo disponible que tiene la aeronave para realizar el proceso de captura, tiene incidencia directa en el área que se desea cubrir.
- **Capacidad de carga:** limita el peso máximo de los sensores a utilizar en un proceso de obtención de información, afecta la autonomía de vuelo y la estabilidad del sistema aéreo.

- **Velocidad de captura de fotografías:** indica la cantidad de fotografías capturadas en una unidad de tiempo, esto limita la velocidad máxima de vuelo de la aeronave, y tiene relación con el área a cubrir.

3.2. Método para la captura de fotografías aéreas

Teniendo en cuenta los parámetros, los componentes y las limitaciones estudiados anteriormente, se proponen 3 etapas fundamentales para el proceso de obtención de información las cuales se describen a continuación.

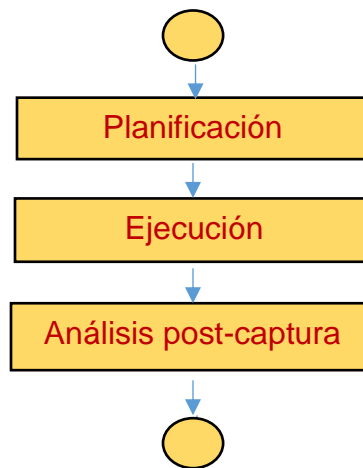


Figura 12 Método para la captura de fotografías aéreas [Fuente propia].

3.2.1. Planificación del proceso de captura

En la planificación se definen las características del área a cubrir, la plataforma y el sensor a utilizar, con el fin de establecer criterios de configuración para realizar la captura.

Para conseguir alta resolución de fotografía, se realizan múltiples tomas del terreno en diferentes lugares del mismo a una altura determinada. Las capturas deben tener dos tipos de superposición conocidos como lateral y longitudinal, denotados con las siglas v y u respectivamente, obteniendo cada punto del terreno en por lo menos dos fotografías asegurando la cobertura total del área objetivo [39], [19] [21].

3.2.1.1. Cálculo de parámetros del vuelo

Los parámetros de vuelo tienen su base en conceptos matemáticos, estos permiten tener una aproximación de las dimensiones físicas que determinan la configuración de cada vuelo, en ellos se tiene en cuenta las características del sensor y la plataforma. Las variables a establecer son:

- Altura de vuelo (h).
- Base en el aire (B) [19].
- Separación entre líneas de vuelo (A) [19].
- Velocidad de la aeronave

En la Figura 13 se representa gráficamente la planificación de vuelo propuesta.

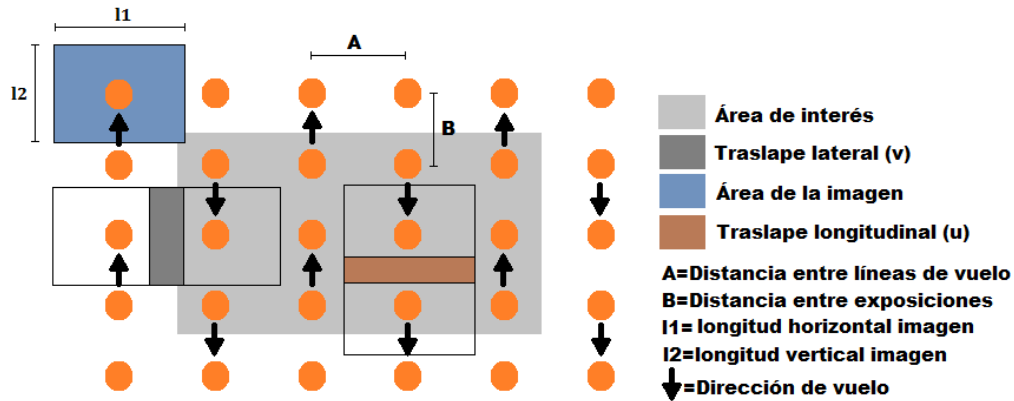


Figura 13 Planificación de vuelo propuesto [40].

A continuación se presenta un resumen del cálculo de los parámetros requeridos, fundamentados en **el concepto matemático expuesto en los trabajos** [19], [24], [41], [39], [21]

Base en el aire o distancia entre dos exposiciones (B)

$$B = l_2 * \left(1 - \frac{u}{100}\right) [m] \quad (2)$$

Distancia entre líneas de vuelo (A)

$$A = l_1 * \left(1 - \frac{v}{100}\right) [m] \quad (3)$$

Donde l_1 y l_2 se definen como las longitudes equivalentes en el terreno de acuerdo a cada lado de la fotografía.

Los parámetros conocidos son:

- Autonomía.
- Área a cubrir.
- Distancia focal (f).
- Traslape longitudinal (u) y lateral (v).
- Velocidad de captura de fotografías ($V_{captura}$).

- Longitudes verticales y horizontales del sensor (dHs y dVs).
- Resolución horizontal y vertical en píxeles de la cámara (rHc y rVc).

▪ Distancias equivalentes del terreno L1 y L2

Cálculo de las distancias reales de terreno equivalentes de acuerdo a la **escala** ε , definida en (1), y las longitudes del sensor denotadas con (dHs y dVs).

Distancia Horizontal real $l2$

$$l2 = (dVs) * \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)[m] \quad (4)$$

Reemplazado (1) en (4) se tiene,

$$l2 = (dVs) * \left(\frac{h}{f}\right)[m] \quad (5)$$

Igual mente para la distancia vertical ($l1$)

$$l1 = (dHs) * \left(\frac{h}{f}\right)[m] \quad (6)$$

▪ Velocidad de la aeronave

Para calcular la velocidad de la aeronave se tiene en cuenta **la altura y la velocidad de obturación**. Partiendo de los datos previamente analizados, se sabe que el ancho B en la línea de vuelo está dado por (2), y de acuerdo a la información del vuelo se tiene la altura (h) y el tiempo de obturación o tiempo entre capturas (t_0) que se expresa en términos de la velocidad de captura de la cámara como:

$$t_0 = \frac{1}{V_{captura}} [s] \quad (7)$$

Por tanto para que la aeronave haya recorrido una distancia de B en un tiempo de captura de t_0 se tiene

$$V_{aeronave} = \frac{B}{t_0} [m/s] \quad (8)$$

Se define entonces la relación de la velocidad de la aeronave, la distancia entre líneas de vuelo (A), y la distancia entre capturas consecutivas (B) con la altura del vuelo (h).

$$V_{aeronave} = \frac{L_2 \left(1 - \frac{u}{100}\right)}{t_0} = \frac{(dVs) * \left(\frac{h}{f}\right) \left(1 - \frac{u}{100}\right)}{t_0} [m/s] \quad (9)$$

$$A = (dHs) * \left(\frac{h}{f}\right) * \left(1 - \frac{v}{100}\right) [m] \quad (10)$$

$$B = (dVs) * \left(\frac{h}{f}\right) * \left(1 - \frac{u}{100}\right) [m] \quad (11)$$

Las relaciones (9), (10) y (11) dependen solo de la **altura del vuelo** la cual puede estar determinada por una resolución espacial (cm/píxel), o simplemente ser proporcionada según recomendaciones de cada prueba a realizar.

- **Resolución espacial en función de la altura**

El sensor tiene una resolución dada en píxeles, cada uno de ellos tiene dimensiones físicas expresadas generalmente en micrómetros, por consiguiente, a cada uno le corresponde una representación del terreno que depende de la altura. Por lo tanto se puede definir la resolución espacial como una relación entre la dimensión física del terreno y la cantidad de píxeles de la cámara.

Se tiene la fórmula general a partir de (1)

$$l = ds \frac{h}{f} [m] \quad (12)$$

Donde l responde a una longitud cualquiera en el terreno y ds a la longitud equivalente en el sensor, por lo tanto para el cálculo de un solo píxel se define la dimensión lp (longitud de píxel) en lugar de la distancia sensor (ds), transformando a (12) se obtiene:

$$h = \frac{f * l}{longpixel} [m] \quad (13)$$

Donde h se define como la altura necesaria para que la resolución sea de longitud de L por cada píxel.

En forma general se define la altura en función de la resolución como:

$$h = \frac{f * Resolución}{lp} [m] \quad (14)$$

De acuerdo al resultado de (14), se puede afirmar que existe suficiente información para obtener la altura de vuelo a partir de una resolución espacial dada.

Entonces se entiende a (14) como el complemento a las relaciones (9), (10) y (11). En el anexo A se tienen relaciones complementarias que brindan información adicional del vuelo pero no relevante.

3.2.1.2. Estudio previo del terreno a cubrir

En la ejecución del proceso de captura es importante reconocer el cultivo a monitorear, puesto que el sistema presenta limitaciones analizadas en la sección 3.1.3. En este estudio previo se debe identificar posibles obstáculos en el recorrido de la aeronave, tales como árboles, redes eléctricas, aves, entre otros, también es importante inspeccionar la longitud del terreno en torno a la capacidad de vuelo de la aeronave, la altura del cultivo y el tipo de cultivo. Esto determinará en forma particular la dinámica de la operación del vuelo.

3.2.2. Ejecución del proceso de captura de fotografías

Es importante que en cada proceso de captura fotográfica se reconozcan las **condiciones atmosféricas** favorables para el fin u objetivo de la misión, identificando una hora del día donde no se presente mayor nubosidad, precipitación de lluvias fuertes, o vendavales que restrinja el desempeño de los equipos. Además, es necesario mantener las condiciones de las pruebas realizadas en diferentes tiempos para que puedan ser **comparables** entre sí.

En cada misión es necesario realizar una inspección de las herramientas a utilizar, como el estado en general de la plataforma aérea, la señal del GPS, las hélices, el centro de masa, la capacidad de almacenamiento de memoria y el nivel de la batería tanto de la plataforma como del módulo sensor o cámara.

3.2.2.1. Creación y ejecución de la misión

Se procede a establecer la altura de vuelo según el estudio del terreno a cubrir y a partir de los valores resultantes de (9), (10) y (11) se definen los datos de separación entre líneas de vuelo, la velocidad de la aeronave y la distancia entre dos capturas consecutivas; estos valores son válidos **para cualquier plataforma** aérea utilizada, la diferencia estará definida por la **implementación** de cada una de ellas. En este trabajo de grado se estudia la implementación de dichos valores en las dos plataformas disponibles.

- **Planificación de la misión**

Se presenta un diagrama de flujo del proceso propuesto para la creación y ejecución de la misión utilizando las dos plataformas.

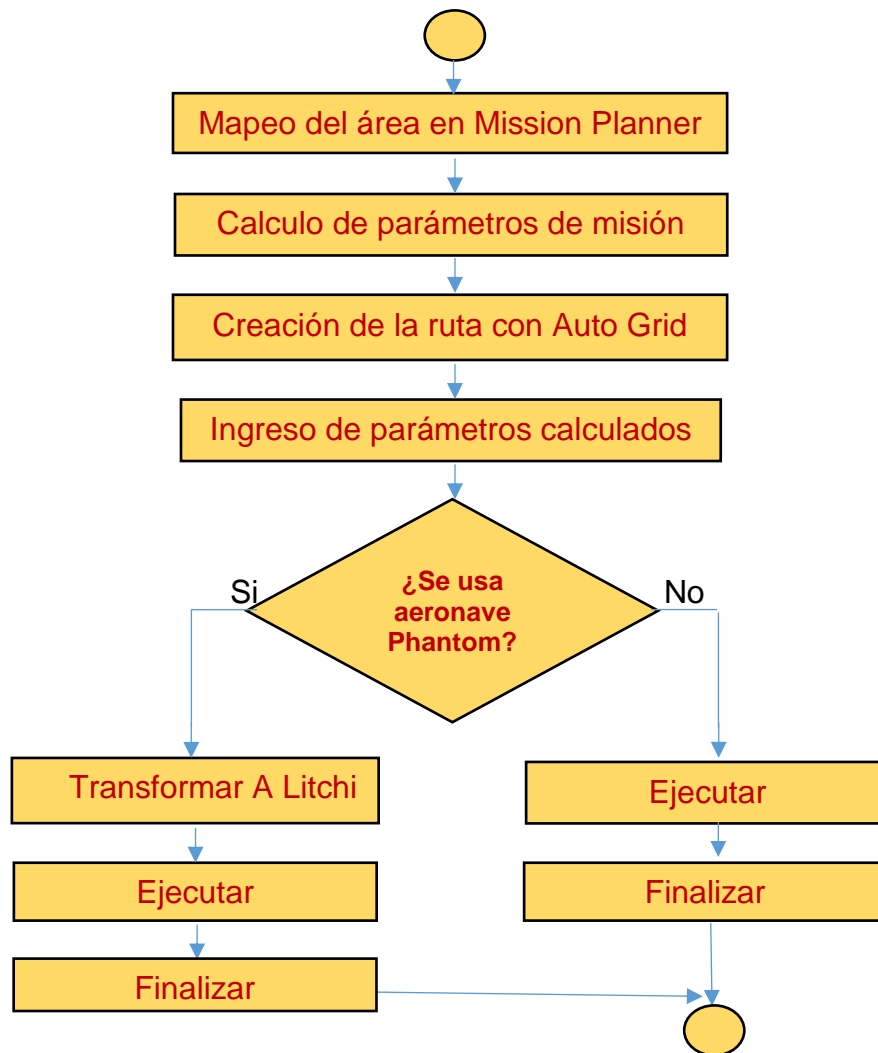


Figura 14 Diagrama de planificación de la misión [Fuente propia].

a) Mapeo del área en Mission Planner

Suponga que el lugar a cubrir es el **Campus Universitario**, por lo tanto se procede a demarcar el área utilizando los polígono, el objetivo de usar el *software* Mission Planner es lograr construir las rutas que realiza la aeronave a partir de los parámetros definidos.

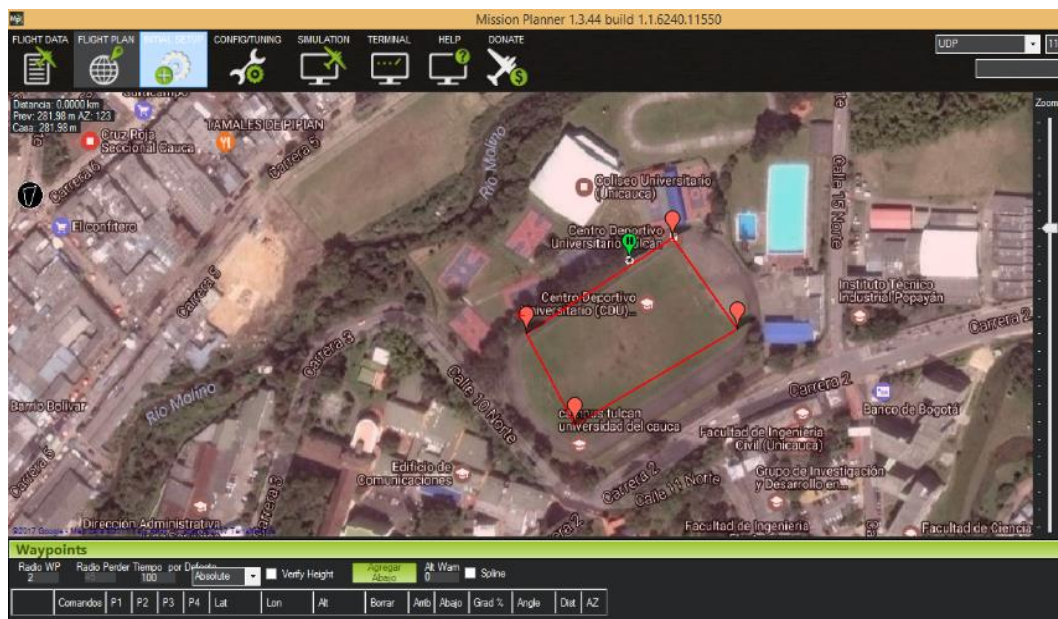


Figura 15 Definición de área [Fuente propia].

b) Cálculo de parámetros de la misión:

Mediante las fórmulas (9) (10) y (11) se obtiene los parámetros que serán utilizados en la prueba, en este caso se considera una altura de 70 metros, y un traslape longitudinal y lateral de 70%,

Los resultados son:

Ancho entre líneas de vuelo (A) = 21 metros

Distancia entre exposiciones consecutivas (B) = 16 metros

Velocidad máxima de la aeronave 16 metros por segundo.

c) Creación de la misión e ingreso de parámetros:

Se procede a crear la ruta utilizando la función SimpleGrid en donde se despliega una ventana la cual recibirá los parámetros anteriormente calculados, la Figura 16 se ilustra este paso.



Figura 16 Desarrollo del AutoGrid [Fuente propia].

El resultado final es una lista de Puntos Waypoint que es por donde pasará la aeronave. Esto se puede apreciar en la Figura 17



Figura 17 Waypoints resultantes [Fuente propia].

d) Implementación en la plataforma Respectiva

Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 14, dependiendo de la plataforma la implementación será diferente.

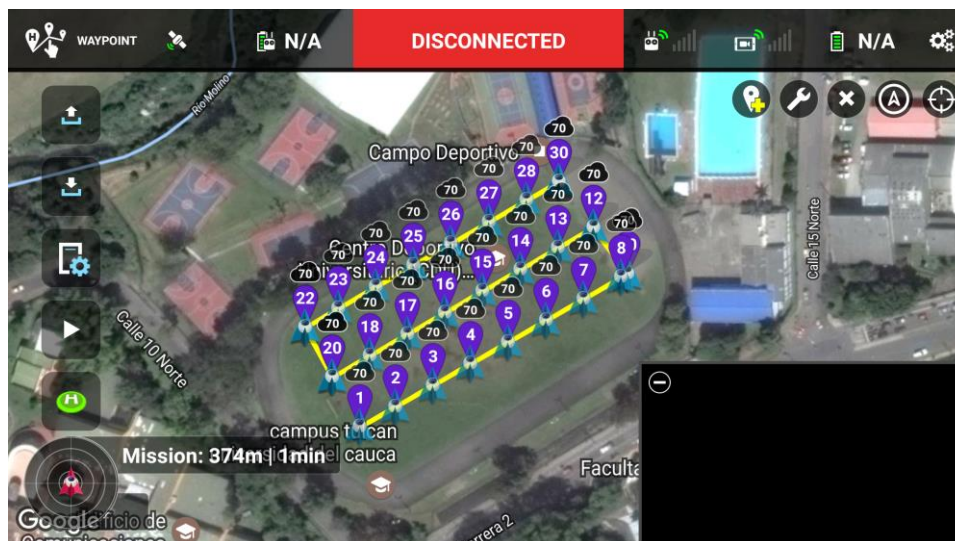


Figura 21 Vista preliminar de la captura [Fuente propia].

2) Implementación en parrot AR Drone 2.0

Parrot ARDrone, que es compatible con el software MissionPlanner utilizando el protocolo MavLink, solo bastará conectarlo al *software* y añadir a los Waypoint un punto TakeOff que servirá para despegar, y un punto Land que servirá para aterrizar.

Con esto finaliza la etapa de planificación de vuelo y su ejecución, y se da paso a la activación de la captura desde la cámara.

3.2.2.2. Activación de la captura

La activación de la captura depende de la cámara y su sistema de comunicación, en el caso de la cámara Raspberry Pi utilizada en este trabajo de grado, es posible ejecutar una captura automática cada cierto tiempo para esto, todos los comandos y configuraciones necesarias están empaquetados en un archivo ejecutable de consola “.sh”, su estructura se presenta en la Figura 22 en forma de diagrama de flujo [26].

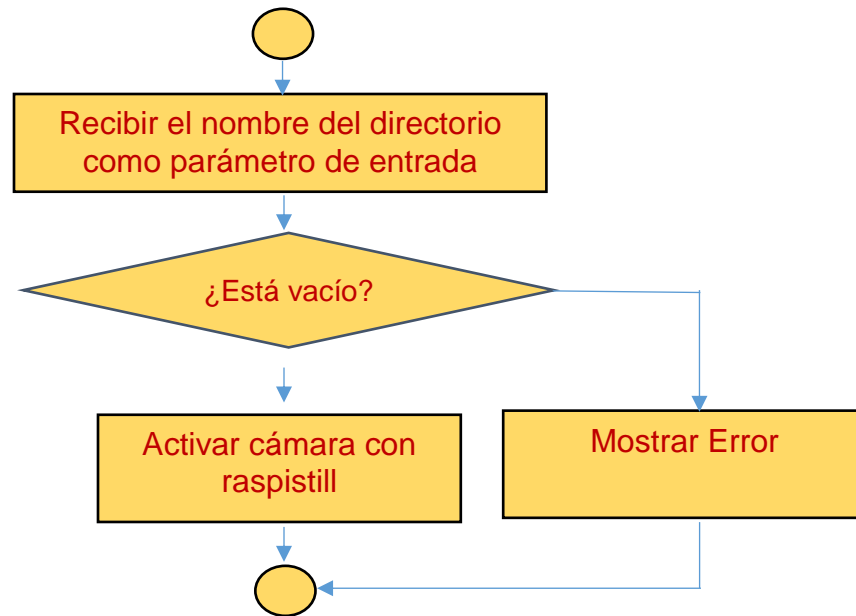


Figura 22 Diagrama de flujo archivo de captura ejecutable [Fuente propia].

Como se describe en el diagrama de flujo de captura ejecutable para conseguir un orden en la información capturada, es necesario que el archivo al ejecutarse reciba como parámetro el nombre de la carpeta, donde se guardaran las fotografías de la captura en formato “.jpg”, generadas a partir del *software* “*raspistill*”. La configuración básica para la captura de fotografías es “*raspistill -o nombreFoto%05b.jpg -tl 1000 -t 10000*”, capturando una foto cada segundo durante diez segundos y guardándola en la memoria del sistema con el nombre nombreFotoXXXX donde las x se reemplazan por un número entero de acuerdo al orden de cada foto.

La activación de la captura se realiza con el comando “./” seguido del nombre del archivo ejecutable, y como parámetro el nombre de las imágenes, utilizando cualquier medio de comunicación remoto que permita el acceso a la consola de comandos de la Raspberry Pi (ver anexo B), se deben otorgar permisos para la ejecución mediante el comando “chmod”.

Al finalizar el vuelo las imágenes quedan guardadas en la ruta predeterminada por el archivo ejecutable, desde donde pueden ser copiadas utilizando una memoria USB o mediante la red para posteriormente ser procesadas.

3.2.3. Procesamiento de la información post captura

En este paso se realiza una exploración de las fotografías en búsqueda de posibles errores de captura, para posteriormente combinarlas en un mosaico que puede estar georreferenciado o no, a continuación, se presenta una exploración de herramientas de uso libre que permiten realizar dicha tarea y los pasos para realizarla.

3.2.3.1. Exploración de imágenes individuales en busca de errores

Se puede facilitar el trabajo al *software* encargado de realizar la fusión de fotografías, para ello se debe hacer una inspección visual de los posibles errores en las fotografías como corrimientos o des enfoques. En la Figura 23 se presenta el problema más común que se trata del desenfoque causado por la vibración del a aeronave.

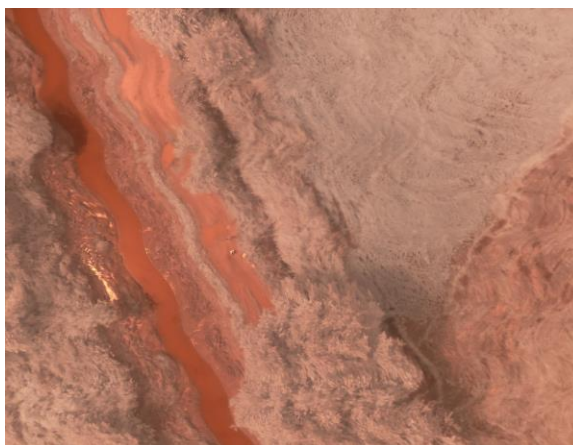


Figura 23 Ejemplo de desenfoque de la cámara [Fuente propia].

3.2.3.2. Exploración de *software* para unión de fotografías

En esta sección se realiza una exploración de *software* que realiza mosaicos a partir de imágenes obtenidas desde una aeronave no tripulada. A continuación una breve descripción de los mismos:

OpenDroneMap: Se compone por conjunto de herramientas de código abierto basadas en Linux que se unen para realizar una completa tarea de fotogrametría, entre los resultados obtenidos se destacan el modelo digital

de terreno (DTM) en 3D, el ortomosaico⁴ georreferenciado⁵, y las nubes de puntos.

Con este *software* se obtuvo buenos resultados, aunque por ser de licencia libre se le realizan actualizaciones cada día que afectan la estabilidad del mismo, es de resaltar que al iniciar el proceso de exploración los resultados no fueron buenos, en pruebas realizadas 1 año después con sus nuevas evoluciones y actualizaciones se consiguió mejores resultados. Este *software* trabaja solamente con sistema operativo Linux. En la Figura 24 se presenta una prueba con éxito del mismo.

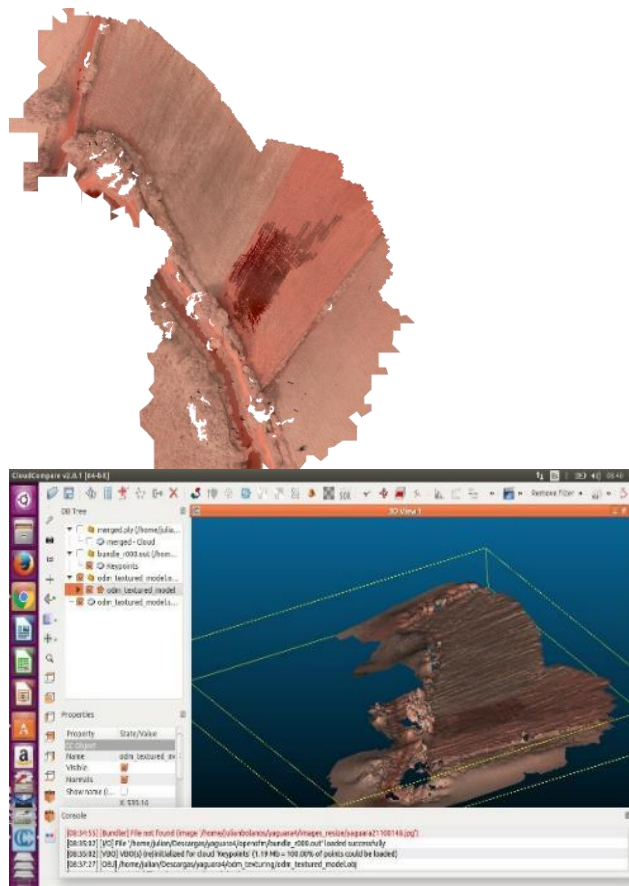


Figura 24 Ejemplo OpenDroneMap [Fuente propia].

Image Composite Editor: Es de licencia libre para uso no comercial desarrollado por Microsoft, realiza el fusión de imágenes sin llevar acabo ortorectificación, opera bajo el sistema operativo Windows, su versión más

⁴ Imagen producto del proceso de ortorectificación.

⁵ Cada punto tiene como referencia una coordenada geográfica.

estable es la 2.0. En la Figura 25 se presenta un ejemplo de la misma prueba anterior desarrollada con este *software*.

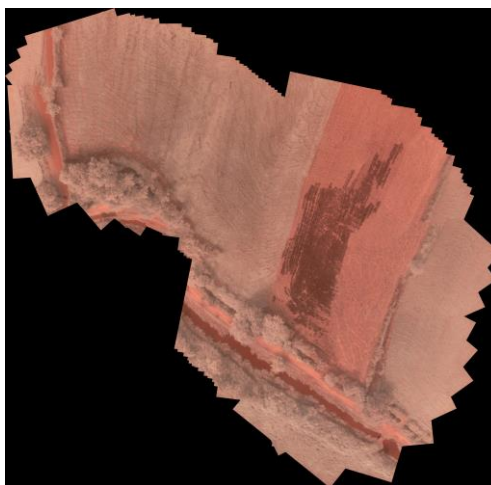


Figura 25 Ejemplo con Image Composite Editor.

Nombre	Modelo 3D	Mosaico	Georeferenciación
OpenDroneMap	Si	Si	Si
Image Composite Editor	No	Si	No

Tabla 3 Comparación de software para fusión de imágenes.

Al finalizar el proceso de exploración de *software*, se selecciona **Image Composite Editor** puesto que presenta mayor facilidad de aplicación para el usuario, además que, el tiempo requerido para realizar un fusión de imágenes es más corto con respecto al otro. Sin embargo es importante resaltar los resultados en mapeo 3D realizados por *OpenDroneMap* aunque **no sean de utilidad** práctica del presente trabajo de grado.

Es importante aclarar que se revisaron los programas Hiugin, VisualSFM, AgisoftPhotoScan pero no se consiguieron resultados, por lo que fueron excluidos debido a las razones presentadas en la .

Software	Motivo
Hiugin	El software es completo y compacto, realizó una búsqueda de puntos comunes entre las imágenes, sin embargo hubo dificultad a la hora de generar los mosaicos, obteniendo imágenes distorsionadas.

VisualSFM	El software llega hasta obtener la nube de puntos desde un conjunto de fotografías, sin embargo no se pudo configurar el componente CMVS y PMVS el cual es necesario para finalizar la tarea.
Agisoft Photo Scan	El software es similar a VisualSFM sin embargo es más robusto en su instalación, pero tiene el mismo problema que el anterior, además de quedarse bloqueado en múltiples oportunidades.

Tabla 4 Descripción softwares de prueba.

El producto final de este capítulo corresponde a un ortomosaico del terreno a cubrir similar al mostrado en la Figura 25 y corresponde al punto de partida para el análisis realizado en el capítulo 4.

Capítulo 4

Caracterización de cultivos para el monitoreo del desarrollo de las plantas.

Para llevar a cabo la caracterización de cultivos agrícolas se parte del producto obtenido en el capítulo 3. Para el caso de este trabajo de grado se cuenta con un mosaico no georreferenciado que puede ser de tipo RGB (colores reales) o NGB (falso color). En este capítulo se estudia los cultivos agrícolas mediante el uso de dichos mosaicos con el fin de llevar a cabo un monitoreo del desarrollo de las plantas. Inicialmente se estudia el comportamiento de la vegetación en torno a la reflectancia espectral que se puede encontrar en ellas, posteriormente, se estudian las características de los sensores que se utilizan en este trabajo de grado y la forma en como reciben la información de radiación para convertirla en imágenes, seguidamente se define el parámetro para la caracterización a utilizar que en este caso es el NDVI del que se estudian las generalidades y sus características principales, luego de esto, se describe la forma en cómo fue obtenido a partir de la cámara Raspberry Pi NoIR, estableciendo las configuraciones y elementos necesarios para realizar dicha tarea, finalmente se concluye con un método para el procesamiento de imágenes en el cual se describen los pasos propuestos en el procesamiento de los mosaicos no georeferenciados para obtener un mapa NDVI.

4.1. Monitoreo de cultivos agrícolas

A partir de [14] [13], se sabe que las plantas poseen una reflectancia espectral definida, y tal como se estudió en el capítulo 2, existen combinaciones matemáticas que se pueden realizar sobre una imagen multispectral originando índices de vegetación, el más utilizado e influyente es el NDVI o índice de vegetación de diferencia normalizada, que gracias a su versatilidad tiene múltiples usos en la agricultura, la ecología, entre otros. Según [43] [44] [45] el NDVI es adecuado para llevar a cabo un proceso de monitoreo de cultivos con el fin de determinar la calidad del crecimiento de las plantas, con esto es posible determinar afectaciones por plagas o enfermedades, o si existe un problema de estrés hídrico en las plantas. Según [29] [46] [47] [48] el NDVI es un índice que se encuentra normalizado, es

decir tiene infinitos valores que se encuentran entre -1 y 1, en donde las plantas vigorosas con buena salud reflejan toda la energía del sol en la banda del infrarrojo cercano, mientras que absorben alrededor del 90% en las bandas roja y azul, para el proceso de la fotosíntesis, reflejando parte de la banda del verde por lo que el ojo humano las percibe de ese color, lo que conduce a que tengan un NDVI elevado, mayor a 0.5, en cambio las plantas con algún tipo de anomalía o problema reflejan energía por igual en todas las bandas descritas, siendo equiparable el espectro visible con el del infrarrojo cercano, lo que conlleva a que posean un NDVI más bajo, entre 0.1 y 0.3 [47] [48], en la Figura 26 se encuentra una representación gráfica del proceso de reflectancia en las plantas, en donde se observa la proporción de energía reflejada por la planta en función de su estado.

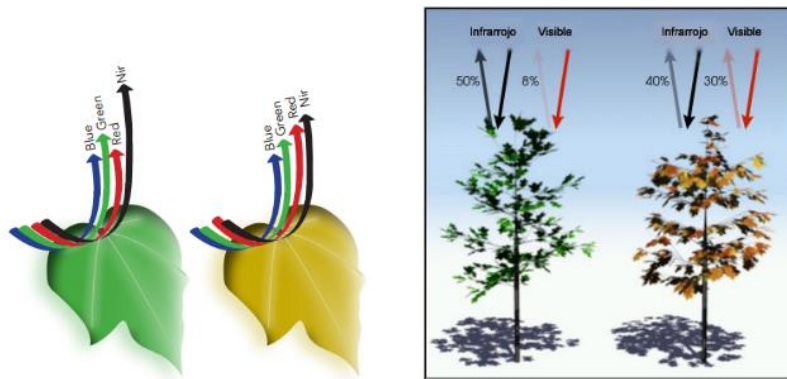


Figura 26 Reflectancia de las plantas [46] [49].

En la Figura 27 se encuentra la representación de la energía reflejada por las plantas y el suelo en función de la longitud de onda.

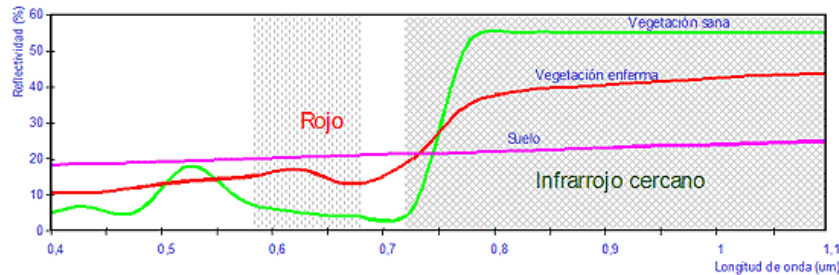


Figura 27 Reflectancia en función de la longitud de onda [23].

Con respecto a la Figura 27 es importante aclarar que la región de longitudes de onda del espectro visible va desde los 0.38 micrómetros que corresponden al violeta, hasta 0.78 micrómetros que corresponden al rojo [50].

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados, el NDVI es una herramienta útil al realizar un monitoreo del desarrollo de las plantas, pero tiene la

dificultad que las cámaras adecuadas para poder calcularlo son de difícil acceso al usuario, a estas cámaras especiales se les llama multiespectrales e hiperespectrales, y tienen la capacidad de entregar 6 o más bandas diferentes separadas entre sí [27]. En este trabajo de grado se concentran los esfuerzos en conseguir un NDVI confiable, a partir de la cámara Raspberry Pi Noir mencionada en el capítulo 3, pues existe información suficiente para concluir que es un indicador útil para realizar un monitoreo del desarrollo de las plantas.

4.2. Obtención del índice de vegetación NDVI para el monitoreo de cultivos agrícolas

Teniendo en cuenta la finalidad principal de este trabajo de grado que es lograr un monitoreo del desarrollo de las plantas en un cultivo, se estudia la información contenida en los mosaicos no georeferenciados con el fin de obtener un NDVI confiable. Para ello primero se realiza una revisión de la información contenida en una fotografía digital.

4.2.1. Fotografía digital

Una fotografía digital, es el producto de la captura de información en un instante determinado y equivale a la representación numérica de una escena. Pueden ser de tipo mapa de bits o vectoriales, en este trabajo de grado se trabajará solamente mapa de bits que son representados como matrices o arreglos bidimensionales en los cuales la unidad más pequeña se denomina píxel y representa muestreo discreto de la señal de luz continua [51] [38] [52] [53].

Cada píxel representa el valor de una magnitud física.

- Cantidad de luz en un punto de una escena.
- Valor de color.
- Nivel de radiación.

Dependiendo del tipo de imagen la información contenida en cada píxel puede variar de la siguiente manera,

- Imagen binaria: 1 píxel = 1 bit
0 negro; 1 blanco
- Imagen en escala de grises:
1 píxel = n bytes
256*n niveles de gris.
0 negro; n*255 blanco, n entero positivo.
- Imagen en color: 1 píxel = 3*n bytes
Cada píxel consta de 3 valores (RGB) codificados en n bytes para cada color, donde n es un entero positivo.

Este tipo de imagen se representa igual que la imagen a escala de grises, pero se diferencian en que en lugar de estar representadas por una sola matriz se representa con tres [53].

En forma general una imagen digital es capturada por un **sensor fotosensible** el cual se compone de una matriz de micro-celdas o píxeles, las cuales se encargan de transformar la intensidad de luz que incide sobre ellas en corriente eléctrica que a su vez será muestreada y digitalizada para formar la imagen digital [38]. En la Figura 28 se encuentra una representación gráfica de la estructura tradicional de un sensor de una cámara digital a color.

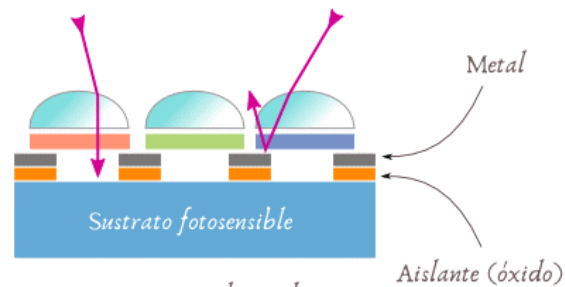


Figura 28 Estructura tradicional de un sensor de cámara digital [54].

La anterior imagen representa la estructura básica tradicional de una película fotosensible o sensor, el funcionamiento se basa en que como un fotodiodo no es sensible al color si no a la intensidad de luz, se utiliza en cada píxel un fotodiodo dedicado a cada color en los cuales deberá haber un filtro pasa-banda que permita el paso de un color determinado, el conjunto total de dichos filtros se denomina mosaico de Bayer, esto permite que a cada fotodetector de luz entre un solo color ya sea rojo, verde o azul [55] [51].

Los sensores, gracias los filtros de Bayer tienen una curva de transmisión parecida a la que se muestra en la Figura 29

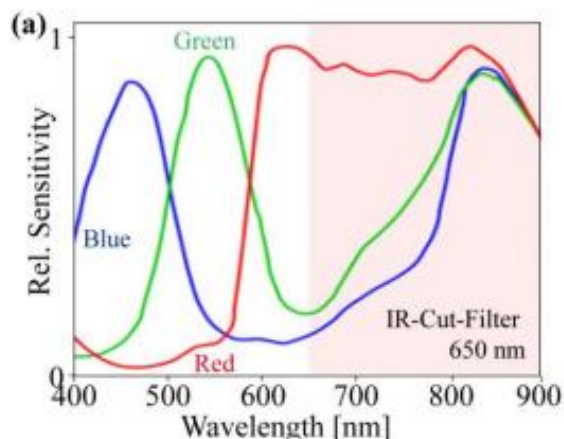


Figura 29 Curva de transmisión típica de un sensor de cámara digital [56].

Si se analiza las curvas de transmisión se puede notar que el filtro de Bayer permite el paso de las frecuencias en la región del infrarrojo cercano, por lo que para evitar distorsión en los colores de la imagen, normalmente se utiliza un filtro de corte infrarrojo para solucionar este problema [38] [51]. En el caso de este trabajo de grado, se cuenta con un módulo de cámara para Raspberry Pi donde el filtro de corte infrarrojo está ausente, por lo que será posible capturar en los tres canales de la cámara información de luz infrarroja.

4.2.2. NDVI a partir de las capturas con la cámara Raspberry Pi NoIR

En trabajos como [56] [57] [58] se encuentra que es posible llegar a una aproximación de los valores de NDVI utilizando una cámara comercial removiendo el filtro de corte infrarrojo y añadiendo un filtro que sea capaz de filtrar ya sea la banda roja o la banda azul del espectro visible aprovechando este espacio y de esta manera formar una imagen en falso color. La fórmula involucrada para el NDVI de forma general para este caso está representada en la ecuación (15)

$$NDVI = \frac{NIR - VISIBLE}{NIR + VISIBLE} \quad (15)$$

Donde la banda correspondiente al NIR corresponde a la que remueve el filtro especial empleado y la banda visible corresponde a la banda restante, es importante aclarar que para este proceso no se tiene en ningún momento en cuenta la banda del verde por lo que las posibles combinaciones encontradas son:

4.2.2.1. NDVI con filtro bloqueador de la banda Roja.

En este caso, como la banda roja del espectro es removida por el filtro especial, en esta se alojará la información del infrarrojo cercano, por lo que la ecuación (15) se transforma en:

$$NDVI = \frac{ROJO - AZUL}{ROJO + AZUL} \quad (16)$$

4.2.2.2. NDVI con filtro bloqueador de la banda azul.

En este caso, como la banda azul del espectro es removida por el filtro especial, en esta se alojará la información del infrarrojo cercano, por lo que la ecuación (15) se transforma en:

$$NDVI = \frac{AZUL - ROJO}{AZUL + ROJO} \quad (17)$$

A continuación se presenta el proceso investigativo transcurrido para lograr un resultado final concluyente con respecto al cálculo del NDVI.

4.2.3. Funcionamiento de la cámara Raspberry Pi NoIR

Se debe comprobar el funcionamiento de la cámara Raspberry Pi NoIR y como se puede apreciar en la Figura 30 la cámara **No** responde al comportamiento normal de una cámara RGB comercial.

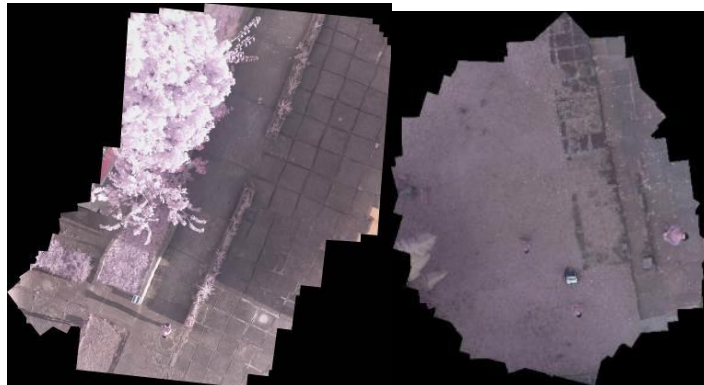


Figura 30 Producto de la cámara Raspbery Pi Noir montada en Parrot AR Drone 2.0 [Fuente propia].

En la Figura 30 se ve que las fotografías no corresponden a lo que se obtiene con una cámara RGB, la diferencia es mucho más marcada en las plantas debido a que según la teoría revisada anteriormente, estas reflejan con mucha más intensidad la luz infrarroja. Teniendo en cuenta que la cámara viene acompañada por un pequeño filtro azul de referencia Rosco #2007 que según

la documentación de la cámara disponible en [59] se encarga de **filtrar o quitar** la banda roja del espectro visible permitiendo albergar ahí solamente información de luz en el infrarrojo cercano. En la Figura 31 se presenta la curva de transferencia tomada de la página oficial del productor.

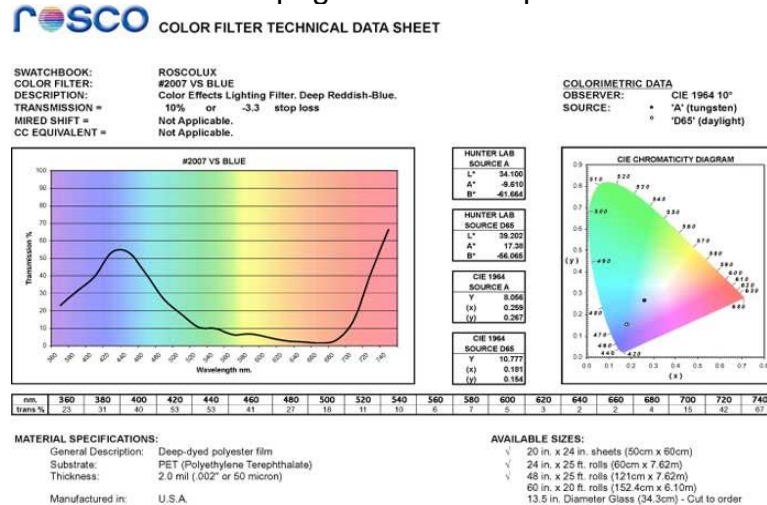


Figura 31 Curva de transferencia Rosco Lux #2007 [60].

Según la curva de transferencia del productor se puede apreciar que efectivamente este filtro **cumple** con las características mencionadas en la documentación de la cámara. Al implementarlo al frente del lente de la cámara se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 32



Figura 32 Fotografía a partir de Raspberry Pi Noir con filtro Rosco #2007 [Fuente propia].

En la Figura 32 se puede apreciar que el césped sobresale en la imagen y tiene una tonalidad diferente a las imágenes mostradas en la Figura 30 en lo que respecta a la información de la vegetación, por lo que a partir de lo investigado en [27], un sitio dedicado al estudio de soluciones de bajo costo

para la salud de las plantas, existen diferentes temas relacionados con el NDVI, uno de los temas tratados es el desarrollo de una herramienta Web denominada Infragram de uso libre para el cálculo del NDVI utilizando cámaras comerciales disponible en [61]. Los resultados de esta herramienta son una combinación de las bandas presentes en la imagen dependiendo del filtro a utilizar, en este, se seleccionan las bandas a combinar, dando como resultado una imagen mapeada con un color para cada valor de NDVI correspondiente que está entre -1 y 1, este proceso usa el mapa de color presentado en la Figura 33.



Figura 33 Mapa de colores Infragram [Fuente propia].

Inicialmente se procede a implementar esta herramienta utilizando la imagen de la Figura 30 que es el producto de la captura sin el filtro Rosco #2007, los resultados están en la Figura 34.

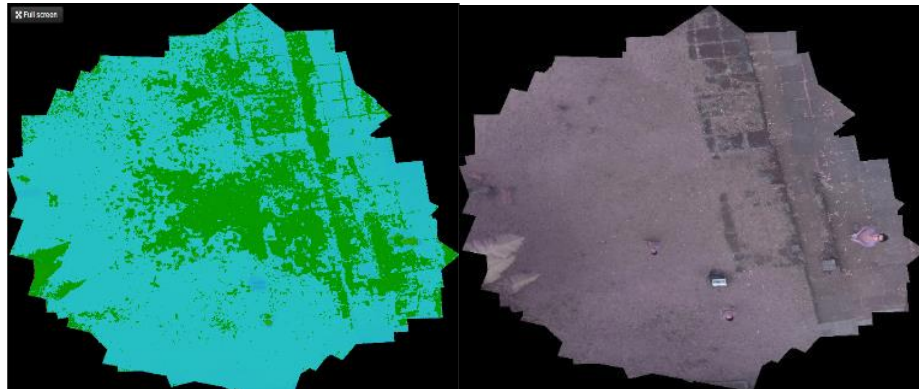


Figura 34 Resultados NDVI utilizando Infragram sin filtro #2007 [Fuente propia].

Al procesar las imágenes capturadas sin utilizar el filtro se puede apreciar que los resultados no corresponden a lo esperado, pues el césped tiene niveles inferiores a 0 en diferentes lugares, por lo tanto se procede a hacerlo con la fotografía obtenida con el filtro #2007, el resultado se presenta en la Figura 35.

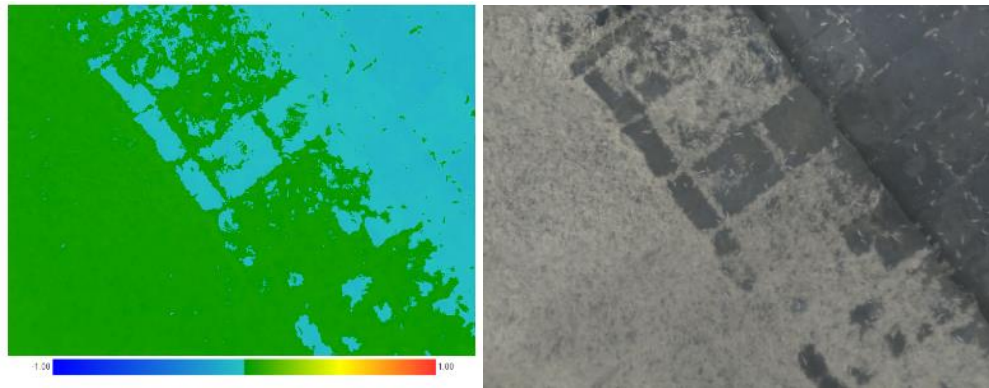


Figura 35 Resultado NDVI con filtro Rosco #2007 [Fuente propia].

Teniendo en cuenta este resultado se puede concluir que la vegetación **sobresale** con respecto al suelo, sin embargo los valores entre ellos no son importantes, pues están muy cercanos a 0, por lo que se realizaron nuevas pruebas en cultivos reales para profundizar en los resultados. El cultivo elegido fue un lote de **arroz** de alrededor 3 meses, los resultados inicialmente fueron similares a los obtenidos en la primera prueba, pero fue útil para tener idea de lo que estaba sucediendo, lo anterior se describe a continuación.

Como no se tuvo disponibilidad de ninguna plataforma aérea, se decide montar la cámara de forma temporal como se puede apreciar en la Figura 36.



Figura 36 Adaptación Raspberry Pi [Fuente propia].

Los resultados más relevantes se muestran en la Figura 37 donde inicialmente se muestra una captura inclinada al piso para posteriormente **eleva el ángulo** de captura teniendo en cuenta el horizonte.



Figura 37 Resultados de la captura sobre cultivos de arroz [Fuente propia].

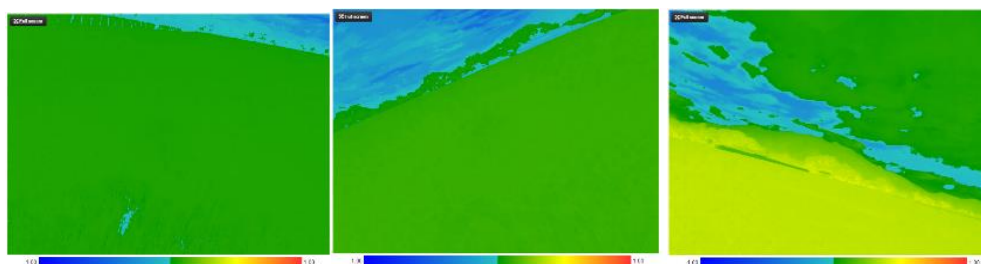


Figura 38 Resultados NDVI a partir de las imágenes resultantes [Fuente propia].

Como se puede apreciar en los resultados finales de NDVI en la Figura 38 y en las imágenes capturadas de la Figura 37, al momento de enfocar el **cielo azul** u horizonte, los niveles de color en las imágenes **empiezan a variar**, dando como resultado que la imagen de la tercera columna presenta un resultado más adecuado de acuerdo a lo esperado, valores alrededor de 0.5, por lo que al analizar detenidamente la documentación de la cámara se pudo establecer que en su configuración básica, la cámara hace un ajuste automático de las ganancias de las bandas azul y rojo de acuerdo al contraste y cantidades de color presentes en la imagen, a este proceso se le denomina **balance de blancos** y es una propiedad que tiene la cámara [27].

4.2.3.1. Balance de Blancos de la cámara

El proceso de balance de blancos automáticos afecta cada captura por separado, lo que impide que se pueda tener un ambiente de captura controlado para poder realizar comparación entre capturas, la solución a este inconveniente se encuentra en analizar las características y las opciones que se ofrecen en la configuración de la cámara a la hora de realizar las capturas, principalmente, se tienen dos parámetros que se deben configurar, el primero corresponde a **deshabilitar** el balance de blancos automático con el parámetro **“-awb off”** y el segundo corresponde a establecer las ganancias para los canales rojo y azul con el **parámetro “-awbg 1,1”** en donde se dejan las ganancias a un valor unitario o el deseado.

Se realizaron pruebas con el fin de establecer el valor adecuado para el análisis con plantas, esto consiste en variar las capturas con diferentes valores teniendo en cuenta que en la Figura 37 la imagen de la tercera columna tenía una mayor saturación de azul debido al horizonte, lo que llevó a que la cámara modificara la configuración dando una ganancia del rojo superior a la del azul, lo que permitió que hubiera la suficiente separación entre los niveles espectrales y se lograra un NDVI más aproximado a la realidad.

En [27] se encuentra una discusión en torno al estudio de los valores de balance de blancos los cuales establecen que los valores adecuados para manejar el monitoreo de la salud de las plantas son “0.88, 0.58” por lo que se incluye en las nuevas pruebas dichos valores [27].

En la Figura 39 se presentan diferentes pruebas variando los valores de balance de blancos. En este caso “1,0.51” “1,0.57” “1,0.62” “0.91, 0.7” “0.58, 0.88”

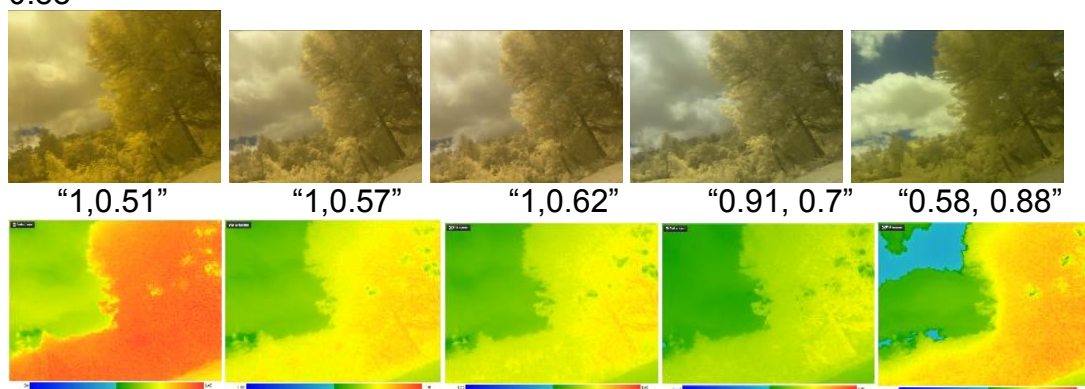


Figura 39 Resultados de variar Awb [Fuente propia].

Lo que indican las imágenes es que es que el valor en donde no se presenta saturación de NDVI es el “0.58, 0.88” pues existe un contraste entre el suelo y la vegetación por lo que se define como el más adecuado para la realización de las capturas.

A partir de estos resultados se procede a realizar pruebas en cultivos reales para poder validar de forma correcta los resultados, en la Figura 40 se presenta un mosaico formado a partir de las pruebas realizadas en un cultivo de café. Los valores utilizados son “0.58, 0.88”.

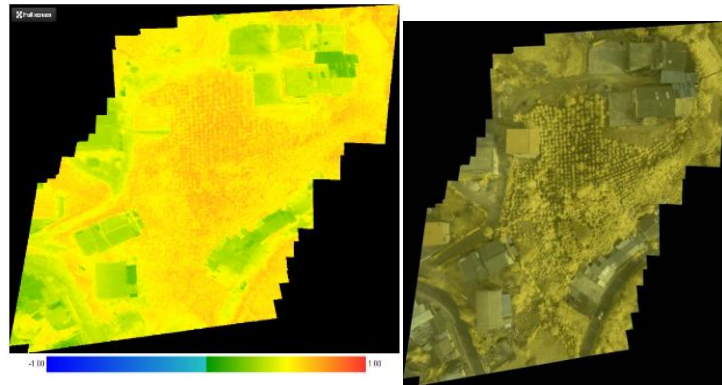


Figura 40 Mosaico café desde Phantom 3 Standard [Fuente propia].

En estos resultados se evidencia que existen buenos valores para la vegetación, sin embargo, estas pruebas presentan un problema y es que como se puede apreciar en la Figura 41, en una aproximación más cercana a las plantas de café en una foto individual, **los valores de NDVI que hacen parte de la corteza de las plantas son inferiores a los valores del suelo**, con lo que se puede afirmar finalmente que este método **no aporta** valores concluyentes para el estudio del NDVI.

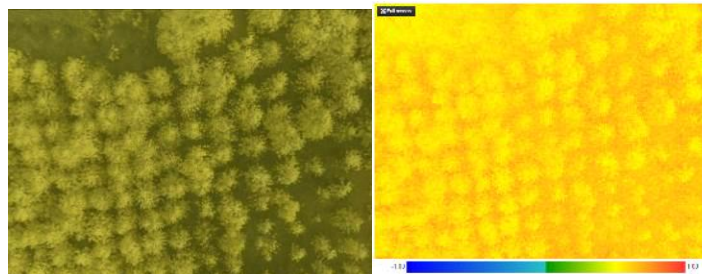


Figura 41 Acercamiento a las plantas de café [Fuente propia].

4.2.3.2. Búsqueda de nuevos filtros

Como los resultados anteriores no han sido concluyentes se decide profundizar al buscar nuevos filtros para remover la parte de la luz visible del espectro. En [61], se encuentra que existe la posibilidad de reemplazar el filtro #2007 que suprime la banda roja del espectro visible, por un filtro que se encargue de eliminar la banda azul del espectro visible, el filtro que se recomienda es el “*wratten 25A*” de Kodak, sin embargo, al buscarlo en las tiendas internacionales no fue posible encontrarlo, pues ya se muestra discontinuado, por lo tanto, investigando en el paquete de filtros ofrecidos por la empresa Rosco, se encuentra que los filtros #19 y #27 son candidatos para reemplazar el filtro propuesto gracias a su curva de transferencia que se presenta en la Figura 42

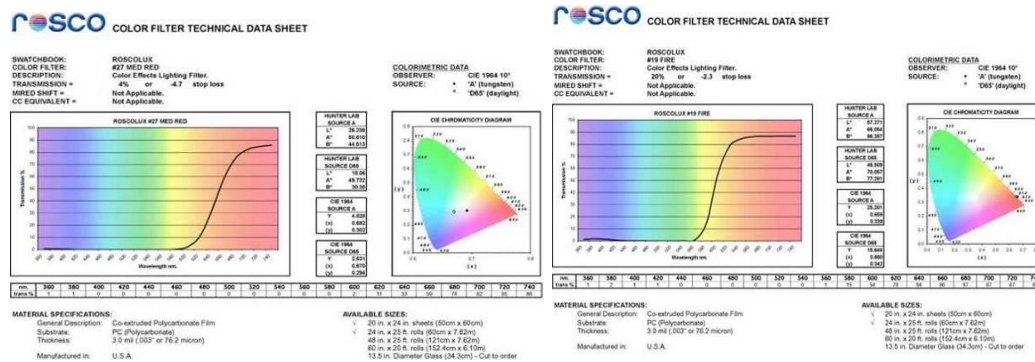


Figura 42 Curvas de transferencia de los filtros 27 y 19 [60].

En la búsqueda para obtener alguno de los anteriores filtros, se encuentra que en la única tienda posible para adquirirlos es Amazon, razón por la cual se realiza un pedido de un pliego de filtro #2007 y un pliego #19, el motivo de adquirir el #2007 se debe a que la pequeña cantidad suministrada con la cámara se encuentra bastante maltratada y desgastada, y por otra parte como no se encontró en Amazon el #27 la opción posible es la del filtro #19.

4.2.3.3. Incorporación del filtro Rosco #19

Contando con la disponibilidad del filtro Rosco #19 se procede a realizar las mismas pruebas efectuadas en el filtro #2007 para establecer **valores de ganancia** de balance de blancos que sirvan como referencia para obtener los mejores resultados utilizando dicho filtro. Inicialmente es importante tener en cuenta que según la curva de transferencia del filtro #19 mostrado en la Figura 42 este suprime todas las bandas del espectro visible azul, permitiendo el paso de las bandas encontradas en el espectro visible rojo, lo que quiere decir que ahora la información del infrarrojo cercano estará contenida en el canal azul, mientras que en la banda roja estará el rojo del espectro visible, más una porción del infrarrojo. Inicialmente se realiza una prueba inicializando las ganancias en 1 con el parámetro “-awbg 1,1”, para ver la saturación del NDVI resultante. Es importante aclarar que la herramienta hasta ahora utilizada también soporta el uso de dicho filtro [61]. Esto se presenta en la Figura 43

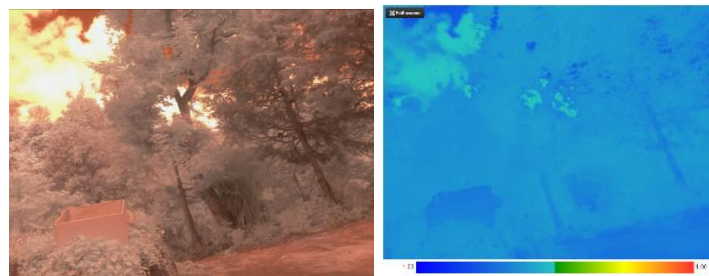


Figura 43 Primera captura con filtro Rosco 19.

Al analizar la captura se puede concluir como primera medida que el filtro cumple con las expectativas esperadas, las plantas tienen una tonalidad azul, pues es en esa banda donde ahora se encuentra la información NIR, sin embargo se puede apreciar que el resultado NDVI con estas ganancias posee una sobre saturación llevando a un valor negativo, con lo cual se realizan capturas variando la ganancia del rojo en forma descendente para verificar el comportamiento. Los resultados se presentan en la Figura 44.

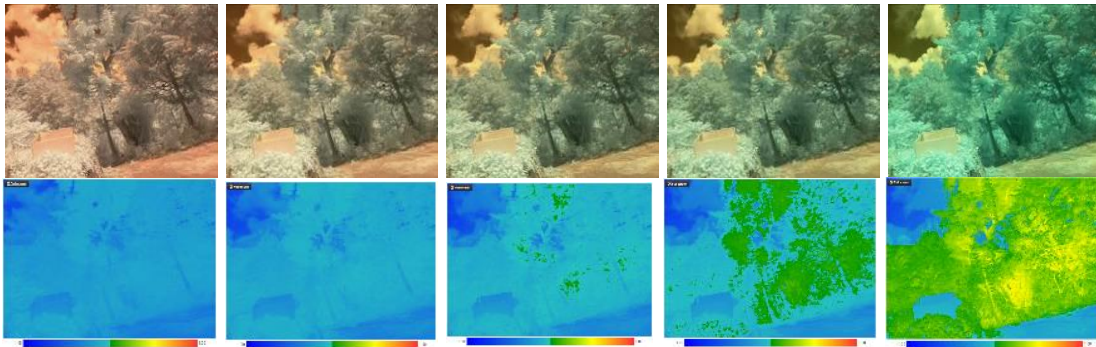


Figura 44 Pruebas filtro Rosco 19 y resultados [Fuente propia].

Teniendo en cuenta los anteriores resultados y como se cuenta en este caso con la plataforma Phantom 3 Standard se realizan nuevas pruebas aéreas utilizando los valores para la ganancia roja que oscilan entre “0.5 y 0.6”. Los resultados se presentan en la Figura 45.

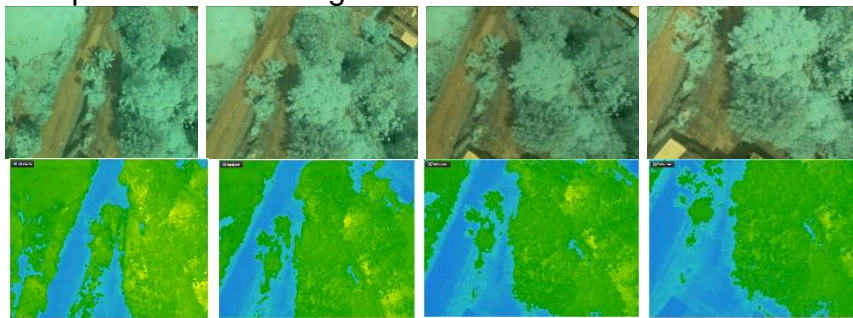


Figura 45 Prueba filtro Rosco 19 en el aire [Fuente propia].

Como se puede apreciar, todas las fotografías anteriores poseen una buena **diferenciación** entre el suelo y la vegetación, pero de nuevo sin un contraste importante con valores cercanos a cero, lo que conlleva a concluir que a pesar de que los resultados son buenos, se requiere un análisis y un procesamiento previo de las bandas antes de realizar el cálculo del NDVI, por lo tanto se procede a realizar el estudio del procesamiento de imágenes que permita manipulación de resultados y de las bandas a combinar.

4.3. Estudio del procesamiento digital de imágenes

Como la herramienta utilizada hasta el momento se basa en un servicio web en línea, lo cual **no brinda** seguridad en disponibilidad del mismo, ni tampoco permite la manipulación de los resultados, se decide estudiar un mecanismo para obtener los valores de NDVI de una forma controlada, por lo cual se realiza una revisión de lo que tiene que ver con el procesamiento digital de imágenes, para lograrlo se emplea la herramienta libre conocida como OpenCV, la cual permite el manejo de imágenes de una forma ágil y rápida, en la Figura 46 se presenta el diagrama propuesto para realizar una obtención de los valores de NDVI [53]. El lenguaje utilizado gracias a su versatilidad es Python y todas las implementaciones se realizan bajo un sistema operativo Linux.

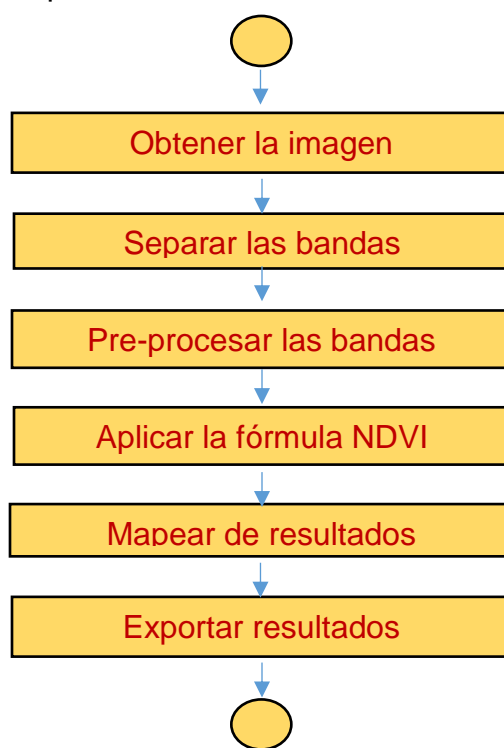


Figura 46 Proceso de análisis de imagen [Fuente propia].

4.3.1. Obtención de la imagen: Al obtener la información de una imagen, normalmente es representada en tres matrices correspondientes a los canales que componen dicha imagen. En lenguaje Python son representados como un vector compuesto por 3 sub vectores bi-dimensionales [53]. Esta tarea es realizada por la librería OpenCV al cargar la imagen y asignarla a una variable específica [53].

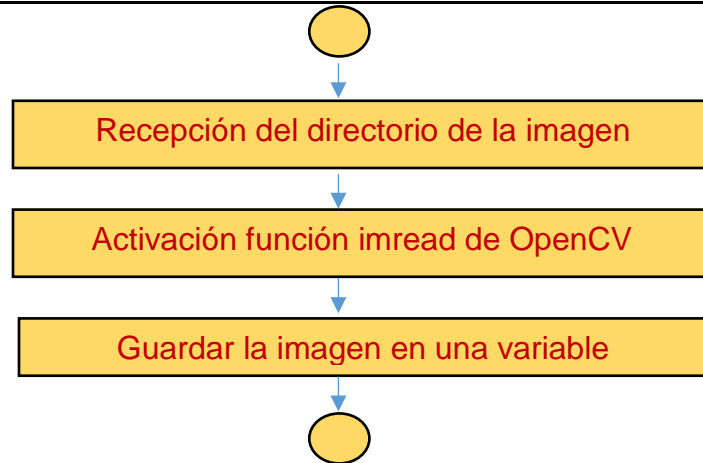


Figura 47 Proceso de obtención de la imagen [Fuente propia].

En la Figura 47 se presenta el proceso por el cual se obtiene la imagen a partir de un archivo de entrada, este proceso devuelve una variable que se compone de tres matrices en las cuales se encuentran las bandas que componen la imagen.

4.3.2. Separación de bandas: Este proceso consiste en obtener por separado los tres canales de la imagen en tres variables diferentes, la función “*Split*” de OpenCV recibe la variable de la imagen obtenida en el paso anterior y la guarda en tres vectores diferentes que corresponden a las bandas Azul, Verde y Rojo. Este proceso se presenta en la Figura 48.

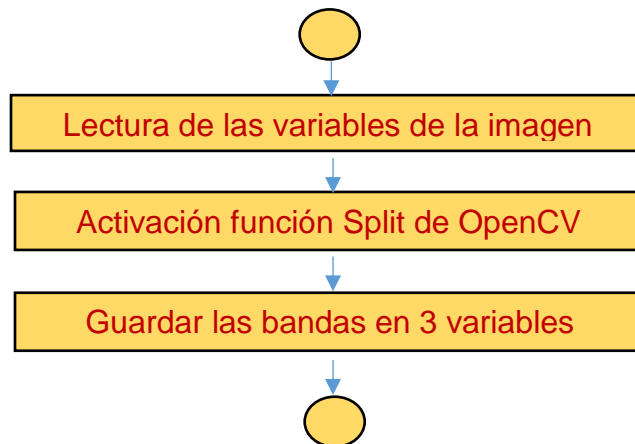


Figura 48 Proceso separación de bandas [Fuente propia].

4.3.3. Procesamiento de las bandas: En este proceso se realiza un análisis y manipulación de las bandas para profundizar en el proceso de obtención de resultados.

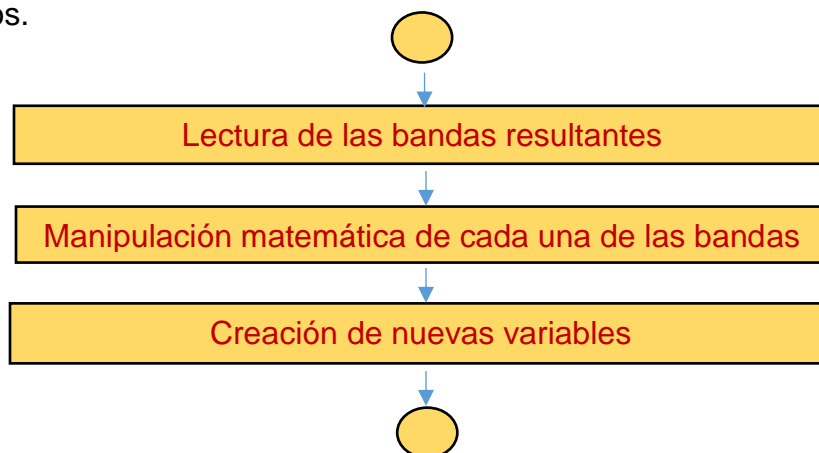


Figura 49 Procesamiento de bandas [Fuente propia].

Este proceso se realiza con el fin de mejorar el proceso de preparación de las imágenes para el cálculo del NDVI. Debido a que se cuenta con una cámara RGB normal idéntica a la cámara Raspberry Pi Noir con la única diferencia que esta sí posee el filtro IR que es ausente en la otra, se propone la realización de las siguientes pruebas en un ambiente controlado con el fin de realizar una comparación de bandas como por ejemplo la respuesta de como deberá ser el aspecto de un rojo puro, azul puro y un verde puro, así como también tener en cuenta la incidencia de la luz solar en los cálculos. Las pruebas se realizaron sobre **plántulas de café**, estas fueron seleccionadas por que son accesibles gracias a su costo y disponibilidad. Las pruebas realizadas se listan a continuación:

- a) Verificación del funcionamiento de los filtros.
- b) Verificación y comparación de las bandas resultantes de las dos cámaras
- c) Construcción de una imagen utilizando bandas combinadas.
- d) Aproximación de las bandas del espectro visible resultantes en las dos cámaras.

- **Verificación del funcionamiento de los filtros**

Gracias a que es posible realizar una separación de las bandas y realizar un estudio de cada una de ellas, se propone el realizar capturas mediante la cámara RGB utilizando cada uno de los filtros y de paso verificar que es lo que contienen dichas bandas, para mantener unanimidad en las capturas, el balance de blancos en esta cámara se establece en “1,1”.

Primero se realizan las capturas utilizando el filtro #19, los resultados se presentan en la Figura 51.



Figura 50 Imagen RGB con filtro #19 [Fuente propia].

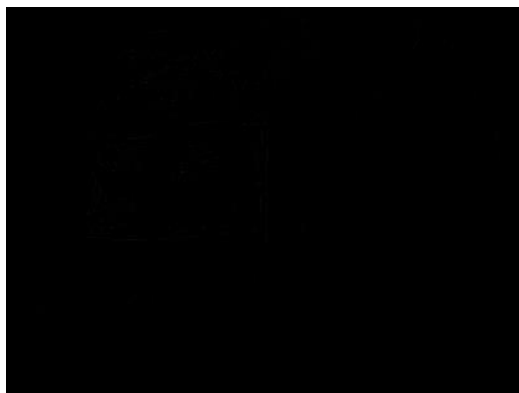


Figura 51 Banda azul resultante [Fuente propia].



Figura 52 Bandas rojo y verde resultante [Fuente propia].

Seguidamente se realizan capturas utilizando el filtro #2007, los resultados se presentan en la Figura 54.



Figura 53 Imagen RGB con filtro 2007 [Fuente propia].

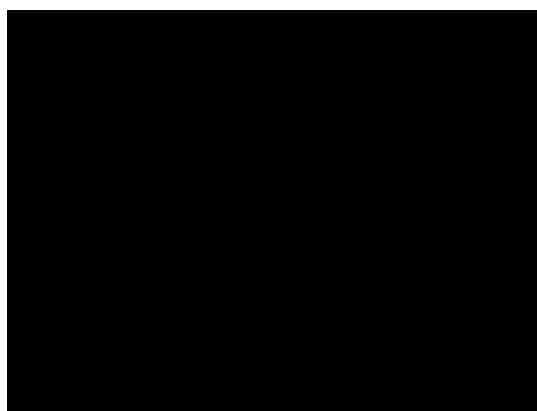


Figura 54 Banda roja resultante [Fuente propia].

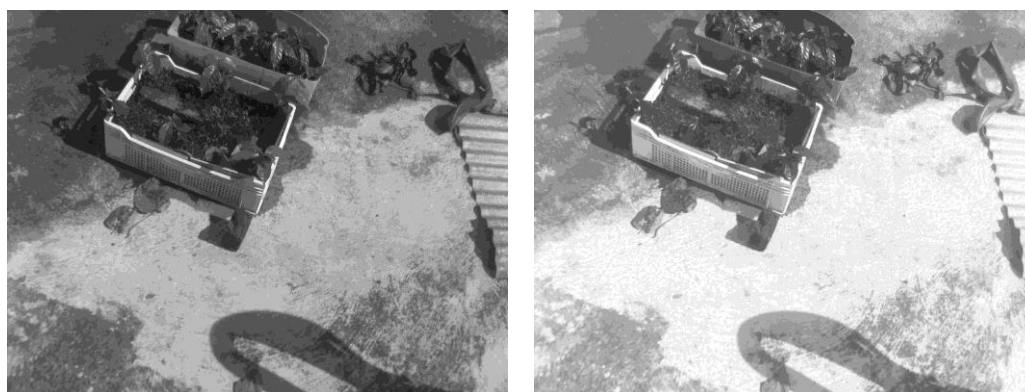


Figura 55 Bandas verde y azul resultante [Fuente propia].

Los resultados mostrados en la Figura 54 y la Figura 51 permiten establecer claramente que los filtros seleccionados #19 y #2007 cumplen con las características antes descritas.

- **Verificación y comparación de las bandas resultantes de las dos cámaras**

El objetivo de esta prueba se centra en establecer similitudes y diferencias entre la banda visible utilizada para el cálculo del NDVI con la cámara Noir y la banda visible resultante de la cámara RGB.



Figura 56 Imagen Original (RGB) [Fuente propia].



Figura 57 Bandas imagen RGB (Roja, Verde y Azul Respectivamente) [Fuente propia].

La Figura 57 presenta el comportamiento de las plantas en torno al espectro visible, se puede apreciar que en el rojo y en el azul estas no presentan una elevada reflectancia tal y como se había estudiado en el capítulo 2. Estos resultados permiten tener una referencia para obtener las bandas que corresponden al espectro visible al utilizar la cámara NoIR. Para comenzar con esto se realiza una descomposición de las imágenes obtenidas con la cámara NoIR utilizando ambos filtros. Esto se puede ver a continuación.



Figura 58 Imagen Original NoIR Filtro #2007 [Fuente propia].



Figura 59 Bandas Imagen NoIR Filtro #2007(Roja, Verde y Azul) [Fuente propia].



Figura 60 Imagen Original Filtro Noir #19 [Fuente propia].



Figura 61 Bandas Imagen NoIR Filtro #19(Roja, Verde y azul) [Fuente propia].

En la Figura 59 y la Figura 61, se puede apreciar que las bandas utilizadas para almacenar la información del espectro visible no tienen similitud a las bandas originadas por la imagen RGB, lo que conlleva a tratar de analizar el procesamiento de las bandas para lograr acercar dichos resultados.

- **Construcción de una imagen utilizando bandas combinadas**

El objetivo de esta prueba es realizar una captura controlada con las dos cámaras, de tal forma que las fotografías queden lo más alineadas posibles para lograr componer una imagen utilizando la banda visible de la cámara RGB y la banda infrarroja de la cámara NoIR, esto con el fin de tener una idea de los resultados obtenidos a partir de un NDVI real.

Debido a que los sensores de las cámaras son idénticos, con la diferencia que la cámara NoIR no cuenta con el filtro de bloqueo de infrarrojo, se propuso realizar una captura controlada con las dos cámaras de tal forma que mantuvieran la alineación para que las bandas de las mismas sean comparables.

El proceso de alineación fue ayudado con el sistema de transmisión de video en tiempo real proporcionado por el software VNC [62], y con la ayuda de herramientas que sirvieron como guías de alineación se realiza la captura de las fotografías presentada en la Figura 62.



Figura 62 Captura mediante alineación de las cámaras [Fuente propia].

En la Figura 62 se pueden apreciar las fotografías RGB, NoIR filtro #2007, NoIR filtro #19 respectivamente, todas obtenidas mediante el proceso de alineación de la cámara. A continuación se presenta el proceso de combinación de bandas.

Bandas Combinadas utilizando el filtro #19

En el primer caso, se utilizará la banda roja de la imagen RGB y la información Infrarroja de la fotografía NoIR con filtro #19 para el cálculo del NDVI. El resultado se presenta en la Figura 65.



Figura 63 Bandas combinadas (Rojo, IR) [Fuente propia].



Figura 64 Imagen resultante de la combinación [Fuente propia].

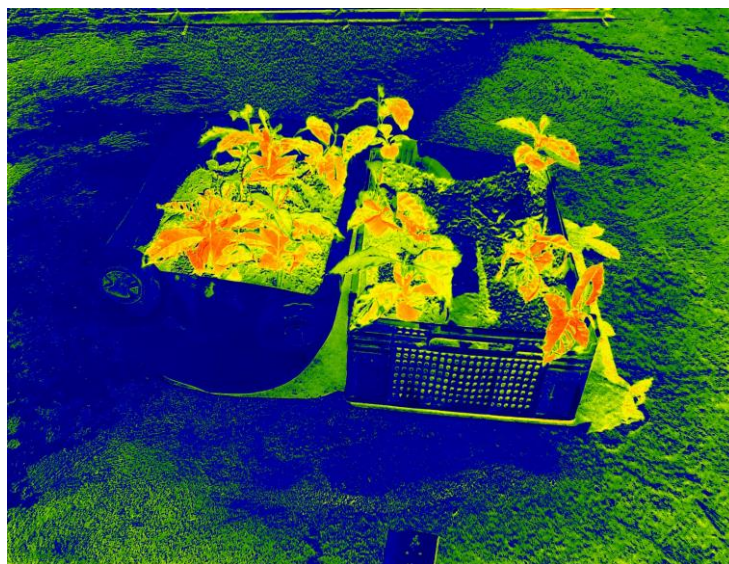


Figura 65 Resultado NDVI con las bandas combinadas [Fuente propia].

Bandas Combinadas utilizando el filtro #2007

En este caso se utiliza la banda azul de la imagen RGB y la banda que contiene la información infrarroja de la fotografía NoIR del filtro #2007 para el cálculo del NDVI.

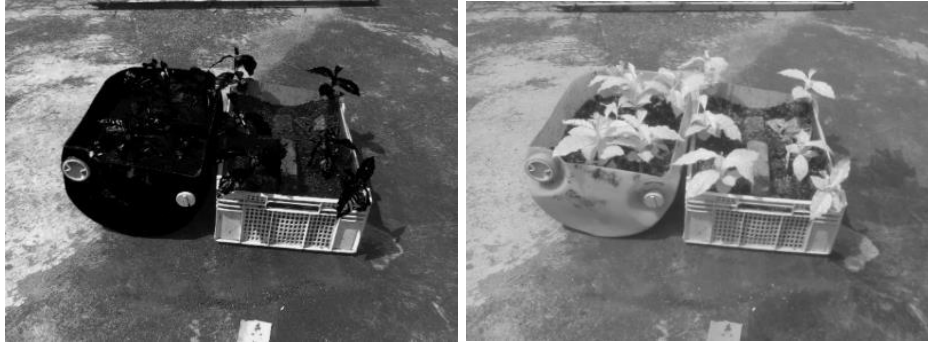


Figura 66 Bandas combinadas (Azul, IR) [Fuente propia].



Figura 67 Resultado de la combinación de imágenes [Fuente propia].

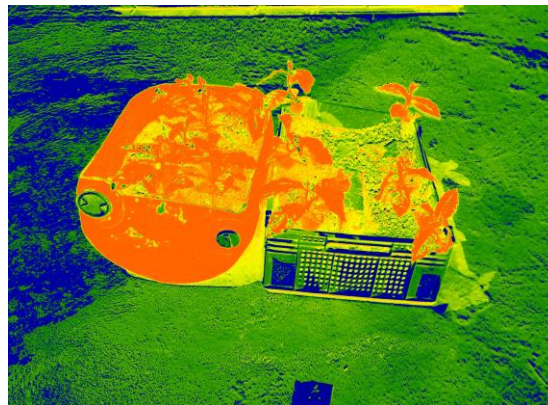


Figura 68 Resultado NDVI Filtro con bandas combinadas #2009 [Fuente propia].

Los resultados de la Figura 65 y la Figura 68 muestran que respecto a la vegetación los niveles de NDVI se respetan. Sin embargo, los resultados se ven afectados por la sombra, que es uno de los inconvenientes que presenta dicho índice de vegetación, por eso, se recomienda realizar las pruebas al medio día cuando la sombra es mínima y preferiblemente sin incidencias de nubosidad, esto se detalla en [63], [64], [65], [66]

- **Aproximación de las bandas del espectro visible resultantes en las dos cámaras**

Teniendo en cuenta los resultados de la actividad anterior, se puede concluir que existen diferencias entre el NDVI obtenido al combinar las bandas y el NDVI obtenido al utilizar sólo la cámara NoIR, esto se debe a la gran diferencia que existe entre la banda roja o azul real resultante de la cámara RGB, y las bandas roja o azul resultantes de la cámara NoIR dependiente del filtro a utilizar. Esto se debe a que para cualquiera de los dos filtros estas bandas van contaminadas por información infrarroja, lo que provoca dicha diferencia, teniendo en cuenta esta información, se procede a realizar un proceso matemático que permita lograr una aproximación entre las bandas visibles resultantes de la cámara Noir y la cámara RGB. Dicho proceso se describe a continuación:

Para aproximar las bandas se realiza una manipulación matemática de las bandas visibles resultantes de la captura con la cámara NoIR teniendo como base las obtenidas con la cámara RGB bajo las mismas condiciones.

Se sabe que la información de la banda visible está afectada por información infrarroja que no puede ser filtrada, y a partir de este hecho se propone remover dicha información restándole la banda infrarroja pura obtenida mediante el uso del filtro, a la banda visible de la misma fotografía, concretamente la ecuación propuesta es:

$$VISresult = A * (B * VISobtenido - C * INFRAROJOobtenido) \quad (18)$$

Donde VISresult= Banda visible resultante del procesamiento.

VISobtenido= Banda Visible capturada

INFRAROJOobtenido = banda Infrarroja capturada

A,B y C = constantes decimales multiplicadoras.

Para determinar los valores de A,B y C se debe comparar la banda visible resultante con la banda visible real obtenida de la cámara RGB, este proceso de comparación se realiza mediante el índice de correlación lineal que define que tan correlacionadas están dos variables aleatorias, en este caso dos imágenes. Los valores que tiene este dicho índice van desde -1 a 1, de los cuales el valor de menos semejanza es el 0 o que las dos imágenes no tienen

nada en común. Este índice puede ser calculado utilizando las funciones de OpenCV que ya están predefinidas en la biblioteca [67].

En general se propone el diseño de un algoritmo que permita variar dichos valores en un rango determinado hasta obtener un valor definido para cada uno de ellos y así verificar los resultados. El diagrama de flujo utilizado se presenta en la Figura 69.

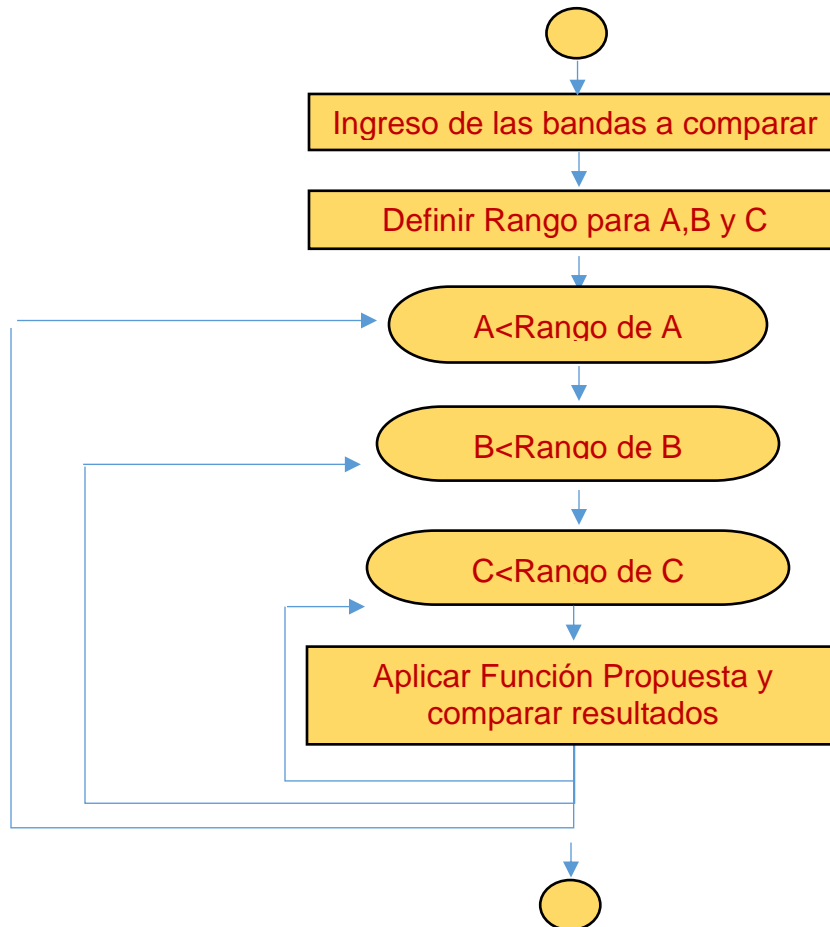


Figura 69 Diagrama de flujo Aproximación de bandas [Fuente propia].

Los resultados obtenidos permitieron definir los valores para A, B y C adecuados para cada una de las configuraciones de filtros utilizada en las fotografías alineadas en la prueba de las bandas combinada

- **Banda Roja Real vs Banda Roja desde Filtro #19 –AWB 0.54,1**

Los valores de A, B y C que el índice de correlación sea de 0.76660693 son 0.61, 2.6, 1.4 Respectivamente dando como resultado la aproximación de la Figura 70.

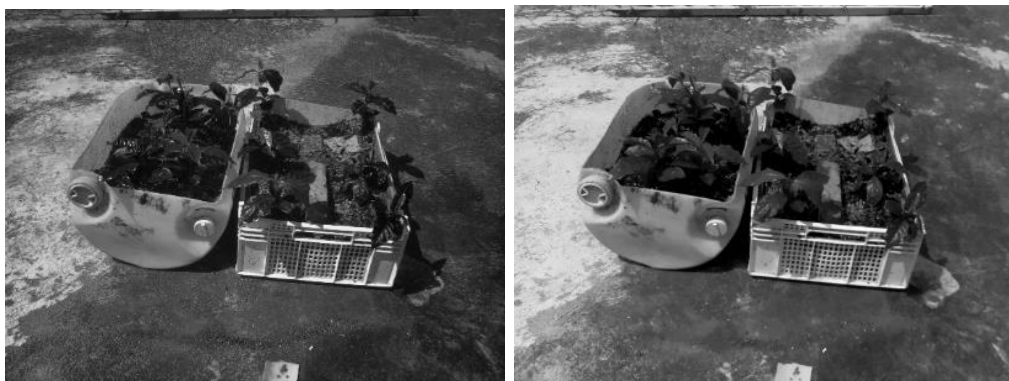


Figura 70 Banda Roja Real vs Banda Roja Aproximada [Fuente propia].

- **Banda Azul Real vs Banda Azul desde Filtro #2007 –AWB 1,1**
Los valores de A, B y C que el índice de correlación sea de 0.8813566 son 2.81, 1.36, 1.2 Respectivamente dando como resultado la aproximación de la Figura 71.

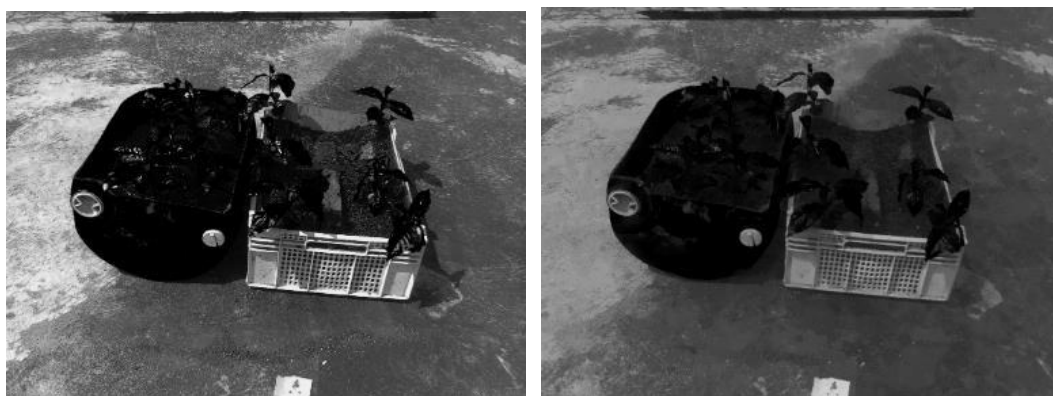


Figura 71 Banda Azul Real vs Banda Azul Aproximada [Fuente propia].

La similitud en las imágenes y el alto índice de correlación en los dos casos lleva a concluir que es posible realizar el cálculo del NDVI utilizando la cámara Raspberry Pi NoIR con cualquiera de los dos filtros. La configuración del filtro rojo con ganancias de 1,1 no se logró aproximar por lo que no se implementan los resultados.

4.3.4. Aplicación Fórmula NDVI: En este proceso se aplica la fórmula del índice de vegetación NDVI (ecuación (23) o (24)) a cada píxel de la imagen, debido a que se trabajan con matrices de igual tamaño, es posible hacer esto de forma aritmética, sin embargo es importante incluir un factor que evite la división por cero.

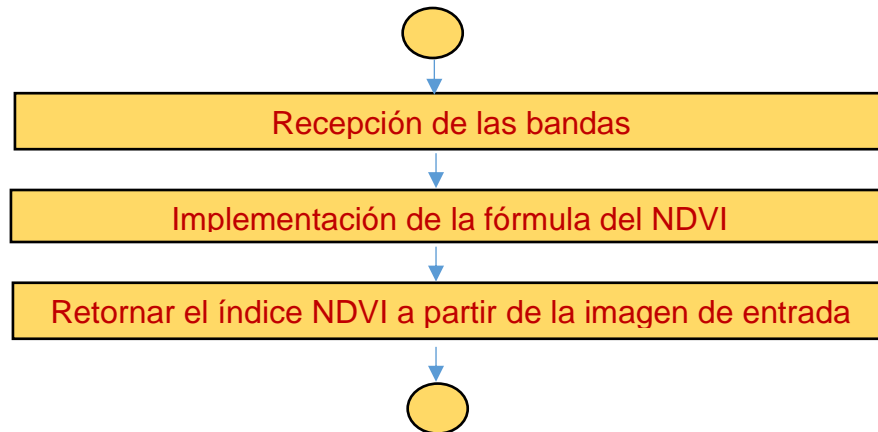


Figura 72 Proceso de cálculo de NDVI [Fuente propia].

4.3.5. Mapear los resultados: Este proceso consiste en representar en un mapa de colores pre definido, los valores resultantes de la operación anterior, estos deben corresponder en un pequeño rango a un color en el mapa de color, esta tarea es posible realizarla mediante los mapas de colores de OpenCV pero gracias a su naturaleza, que se originan a partir de una única matriz de enteros de 8 bits, existe una gran pérdida de información al realizar el mapeo, pues es necesario llevar el rango de -1 a 1 el valor del índice de vegetación a un rango de 0 a 255, es decir existen solo 256 valores posibles para representar los valores resultantes. Esto conlleva a analizar diferentes opciones entre las que se encontró que es posible realizarlo de una forma más elaborada y controlada mediante una herramienta llamada matplotlib [68]. En la figura 76 se puede apreciar el mapa de colores obtenido el cual la parte más azul de la izquierda corresponde al valor de -1 y el valor rojo de la derecha corresponde a 1.

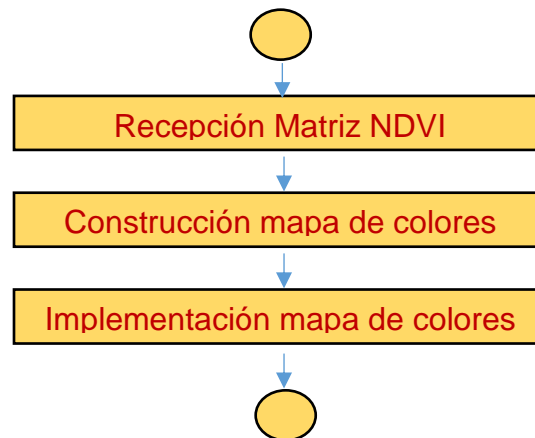


Figura 73 Función mapeo de resultados [Fuente propia].

Este proceso consiste en crear un mapa de colores predeterminado, como se muestra en la Figura 74.



Figura 74 Mapa de colores [Fuente propia].

Luego de haber creado el mapa de colores, este es aplicado a los datos.

4.3.6. Exportar resultados: En este punto los resultados están en el dominio de Matplotlib, estos deben ser exportados a un archivo denominado resultado con lo que concluye el procesamiento de la imagen.

El proceso anterior permite sustituir el uso del sitio web [61], controlar el proceso de obtención del NDVI ya que no depende de elementos o páginas externas y puede representar herramienta útil al momento de analizar las imágenes con las que se trabaja.

Capítulo 5

Modelado e implementación del prototipo de despliegue, recolección y procesamiento de información

Una de las finalidades del presente trabajo de grado consiste en presentarle al productor agrícola los resultados obtenidos en cada proceso de caracterización, con el fin de que sean debidamente interpretados y aprovechados, Una de las brechas encontradas en la mayoría de trabajos revisados en torno a la agricultura de precisión está justamente en que no son dirigidos al productor agrícola, por ello, en este trabajo se propone un prototipo software encargado del despliegue y recolección de información, distinguido por presentar interfaces intuitivas que emplean tecnología Web y móvil diseñadas para llevar a cabo el manejo de los procesos descritos en el capítulo 4 de forma ordenada y automática. Uno de los principales aportes encontrados en este trabajo de grado, es la integración de tecnologías en la nube, que permiten un manejo distribuido y seguro de la información. Inicialmente se describe la arquitectura del sistema web-móvil la cual sirve como guía y soporte para la implementación del sistema, para que sea de fácil interpretación.

Arquitectura y modelado del sistema Web-Móvil

En la construcción del prototipo se tuvo en cuenta algunas etapas de la metodología del modelo de construcción de soluciones MCS [69] con el fin de llevar una visión general del proceso, además, se utiliza el modelo de vistas 4+1 para lograr una abstracción organizada de la arquitectura [70].

5.1. Modelado del negocio

El modelamiento del negocio permite establecer el contexto en el cual la aplicación será implementada, en el ámbito de la construcción de *software* desempeña el papel de guía para la arquitectura del sistema. Uno de los

lenguajes más utilizado para llevar a cabo el modelamiento de negocio es el UML [71], este modelamiento se expresa en dos partes. El primero corresponde a los casos de uso donde se describen las acciones que se llevan a cabo en el proceso de negocio, con el fin de llevar un producto o solución a un determinado “cliente”, cabe aclarar que la definición de cliente no se centra solamente en el ámbito económico. El segundo corresponde al modelado de objetos de negocio, en el que se describe como un proceso de negocio logra cumplir las acciones que se describen en el modelo número 1, esto permite observar las interacciones entre los actores con las entidades. En este contexto se define al trabajador del negocio como la representación de un rol o conjunto de roles dentro de la organización, los cuales se encargan de manipular las entidades del mismo.

5.1.1. Descripción de los actores

Los actores del negocio se identifican al analizar el escenario de interacción de la aplicación, en este caso debido a que el contexto general es la agricultura, se define como actor del negocio al agricultor.

Agricultor: Quien interactúa directamente con el negocio, este deberá contar con los siguientes requerimientos para el desempeño correcto alrededor de este trabajo de grado:

- Poseer conocimientos sobre el manejo sistemas operativos Android.
- Poseer los conocimientos necesarios sobre la operación de aeronaves no tripuladas.
- Poseer conocimientos básicos para llevar a cabo análisis agrícola con NDVI.

5.1.2. Modelado de casos de uso de la organización

Teniendo en cuenta los actores identificados se presenta en la Figura 75 el modelo de casos de uso del negocio incluyendo las funciones identificadas.

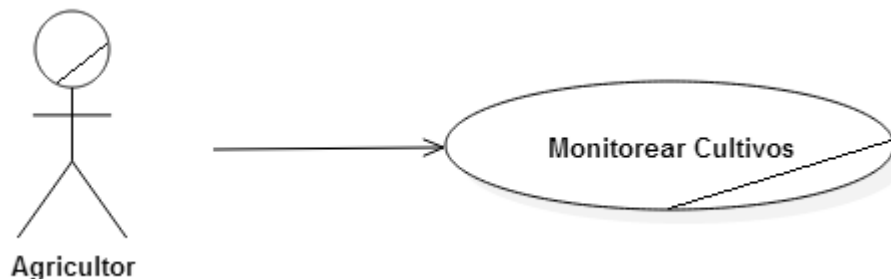


Figura 75 Modelo de casos de uso del negocio [Fuente propia].

5.1.3. Modelo de objetos de la organización

El modelo de objetos del negocio permite establecer la interacción entre los actores y los objetos del negocio. Se presenta en la Figura 76 y puede notarse que el agricultor gestiona directamente la información del negocio.

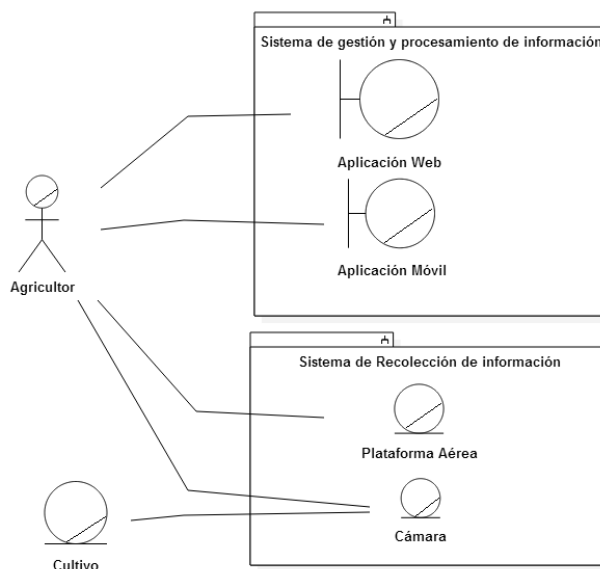


Figura 76 Diagrama de objetos del negocio [Fuente propia].

5.2. Requisitos del sistema

En esta sección se presenta el proceso para obtener un resumen de los requisitos funcionales y no funcionales sobre los cuales se plantea la base del desarrollo y evaluación del sistema. Teniendo en cuenta que la finalidad del prototipo es la recolección, procesamiento y despliegue de información, se definen las siguientes características de la aplicación para constituir los requisitos del sistema.

5.2.1. Características del sistema

El poder definir diferentes características de la aplicación implica un análisis de los procesos de recolección, procesamiento y despliegue de información involucrados en el proceso de caracterización de cultivos agrícolas, para facilitar el uso del sistema, se establece que dicha aplicación deberá dividirse en varios módulos encargados de una tarea particular, definiendo la tecnología más adecuada para cada uno, en el caso de la recolección de imágenes que corresponde a la actividad de subir o cargar fotografías, se lleva a cabo mediante un servicio Web, y en el caso de la recolección de la información de cada proceso a realizar se lleva a cabo mediante un sistema móvil. Por otra

parte, el procesamiento de la información se realiza en un módulo aparte utilizando tecnologías en la nube, con la capacidad de comunicarse con el servicio web para la entrega de resultados.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la tabla 4 son presentadas las características identificadas para el sistema a implementar.

Característica	Descripción	Riesgo	Prioridad
Recolección de la información inicial del proceso	Recolectar la información necesaria de cada proceso de caracterización	Crítico, se debe garantizar que la información recolectada se realiza de forma completa.	Crítica, de esta característica depende la organización y el proceso de caracterización
Gestión y organización del proceso de caracterización	Llevar un control adecuado de las capturas programadas para que sean de utilidad al agricultor.	Crítico, el éxito del proceso de caracterización depende de que las capturas se realicen en forma correcta en los tiempos estipulados	Crítica, de esta característica depende el cumplimiento del objetivo de monitoreo del desarrollo de las plantas
Recolección de información perteneciente a cada captura	Permitir al usuario durante un tiempo determinado el cargar la información recolectada	Crítico, la información que el usuario suministra, como las fotografías hace parte de la base esencial del trabajo.	Crítico, para que sea posible entregar alguna clase de resultado a partir del proceso de caracterización es necesario que la información se recolecte de forma apropiada
Procesamiento de la información recolectada	Procesar la información acorde a los parámetros preestablecidos.	Crítico, la información suministrada necesita ser procesada para poder generar resultados	Crítica, el sistema debe integrarse completamente para ser capaz de procesar toda la información recolectada
Entrega de resultados	Entregar los resultados de	Alto, es importante que el usuario entienda	Importante, una de las finalidades es poder llegar al

	forma ordenada y clara	la información entregada para que pueda ser aprovechada	productor agrícola.
Programación de calendarios	Programar en el calendario del sistema las fechas de las pruebas a realizar	Bajo, Esta funcionalidad no pone en riesgo la estabilidad y funcionamiento del sistema	Ordinario

Tabla 5 Lista de características del sistema

5.2.2. Requisitos funcionales

Teniendo en cuenta las características que se muestran en la tabla 4, se pueden definir los siguientes requisitos funcionales:

- Autenticación mediante nombre de usuario y contraseña al agricultor, esto con el fin de proteger su información.
- Permitir el ingreso de aeronaves y cámaras con sus respectivas características para los cálculos mostrados en el capítulo 3.
- Permitir al agricultor realizar la programación de los procesos de caracterización.
- Controlar el cronograma en el que se realizan las capturas definidas en la programación del proceso de caracterización
- Permitir cargar información al servidor cuando el cronograma esté dispuesto para ello.
- Procesar la información cargada al servidor de acuerdo a los lineamientos planteados en el capítulo 4.
- Desplegar resultados del análisis de forma clara y consistente.

5.2.3. Requisitos No funcionales

De igual forma a partir de la tabla 4 se definen los requisitos no funcionales:

- Permitir el uso de internacionalización (varios idiomas).
- Mostrar un video manual para la capacitación del uso del sistema.
- El sistema debe ser del menor costo posible.

5.3. Descripción de la arquitectura del sistema

5.3.1. Diseño preliminar

Teniendo en cuenta los requisitos funcionales y no funcionales se construye un diseño preliminar de la arquitectura mostrado en la Figura 77, esto con el fin de tener una idea ilustrativa de lo que será la arquitectura final del sistema.

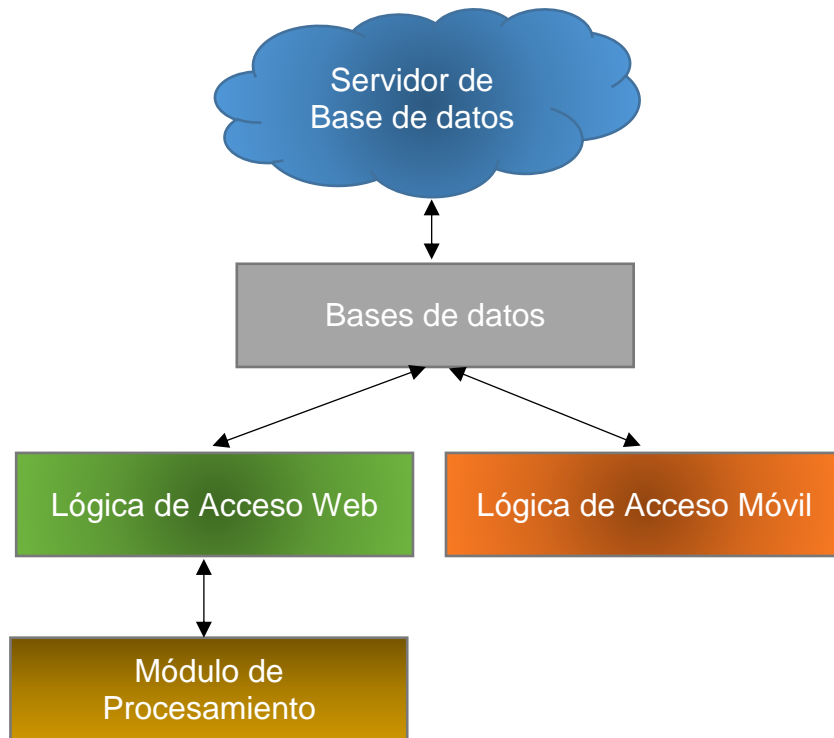


Figura 77 Arquitectura Preliminar [Fuente propia].

Como se puede apreciar la arquitectura se compone de 4 componentes detallados a continuación:

- La lógica de acceso web y móvil los cuales se encargarán del proceso de recolección y despliegue de información.
- El módulo de procesamiento, que se encarga de procesar y almacenar la información y resultados finales.
- El módulo de bases de datos se encarga de almacenar la información necesaria para el funcionamiento del sistema, ya sea información del control de usuarios o información de control de procesos.

5.3.2. Arquitectura completa

Para describir la arquitectura de una forma ordenada se decide utilizar el modelo de vistas 4+1 planteado por [70]. En este modelo se utilizan diagramas

UML(*Unified Modeling Language*), las vistas del modelo se especifican en la figura 78, tomada de [72].

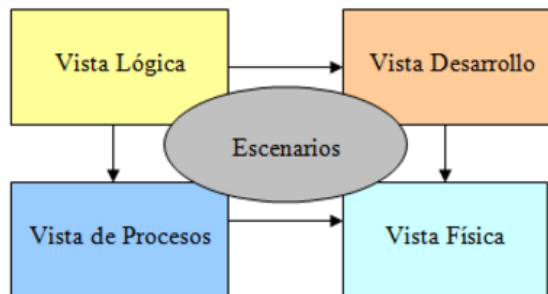


Figura 78 Modelado de vistas 4+1 [72]

Vista lógica: En esta vista es representada la estructura y funcionalidad que el sistema provee a los usuarios finales. Se encarga de representar lo que el sistema debe hacer, las funciones y servicios ofrecidos. Entre los diagramas de esta vista pueden encontrarse diagramas de clases, comunicación o secuencia, definidos en UML.

Vista de desarrollo: En esta vista el sistema es mostrado desde la perspectiva del programador; se presenta la división del sistema *software* en componentes y las dependencias que se encuentran entre dichos componentes. Los diagramas encontrados en este caso se centran en componentes y paquetes.

Vista de procesos: en esta vista son presentados los procesos del sistema y su forma de comunicación, los diagramas presentados por esta vista son los de actividad.

Vista física: En esta vista se muestran todos los componentes físicos que integran el sistema así como también las posibles conexiones físicas que existan entre dichos componentes. Los diagramas de despliegue hacen parte de la documentación de esta vista.

Vista de escenarios: La representación de esta vista se centra en los casos de uso y su funcionalidad es la de relacionar las otras 4 vistas. Los diagramas de casos de uso corresponden a la documentación de la vista.

La descripción completa de las vistas aplicada a este proyecto se encuentra en detalle en el anexo E.

5.4. Implementación del prototipo

Tomando como referencia la arquitectura descrita en la sección 5 se describen los procesos llevados a cabo para realizar la implementación del prototipo del sistema solución. Como primera medida se presenta una sección relacionada con el proceso de selección y desarrollo de herramientas de trabajo, ambientes de desarrollo entre otras cosas relacionadas con el proceso de desarrollo del prototipo funcional. Posteriormente se pasa a la implementación del sistema tomando como guía el diseño preliminar y centrándose en la construcción de cada uno de los módulos. Este capítulo finaliza con la descripción del módulo para el procesamiento de imágenes que será integrado con el prototipo software.

5.4.1. Dispositivos y herramientas

Se describen las herramientas *software* que se usan para la implementación del prototipo móvil y web, así como las tecnologías utilizadas para la implementación del módulo de procesamiento de información. Esta sección se presenta en calidad de anexo B.

5.4.2. Sistema de gestión de información o bases de datos

Para almacenar información en forma remota se decide utilizar los servidores de bases de datos de Microsoft Azure, puesto que con esta herramienta es posible realizar una implementación de bases de datos en la nube con las siguientes características:

- Agilidad en implementación de BackEnd para la aplicación móvil.
- Soporte para replicación geográfica según se requiera.
- Soporte para escalabilidad ya sea Horizontal y/o vertical.
- Soporte para gestión de información de forma rápida e intuitiva.

Se implementa un servidor que puede ser consultado tanto por la aplicación móvil y la aplicación web desde cualquier medio de acceso a la red.

5.4.2.1. Diseño del diagrama relacional de bases de datos.

El diagrama relacional de la base de datos es mostrado en la Figura 79

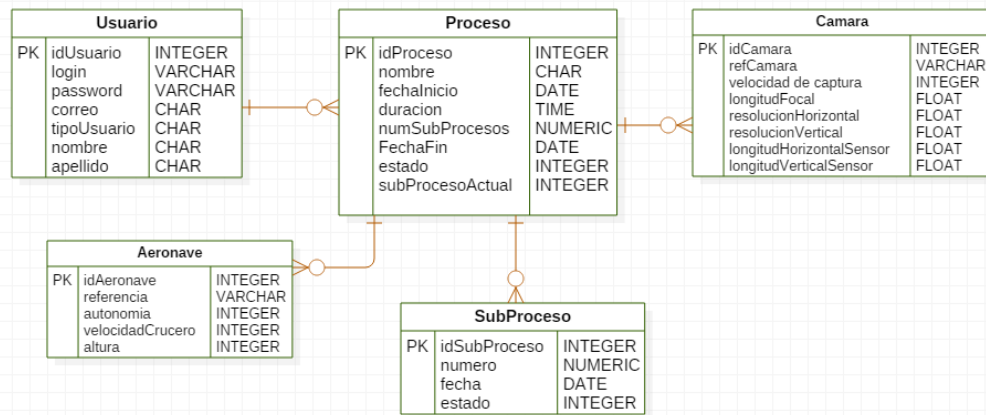


Figura 79 Diagrama relacional [Fuente propia].

Se presentan las diferentes tablas que componen la base de datos con sus respectivas relaciones, en este se define al proceso como aquel evento llevado a cabo por el usuario el cual involucra un cultivo en específico y que será llevado a cabo en determinados sub procesos.

La tabla Usuarios se encarga de almacenar toda la información de los usuarios, como aclaración es importante mencionar que solamente se tendrá un rol que será el del agricultor.

La tabla Proceso se encargará de almacenar todos los procesos llevados a cabo por un agricultor y será el encargado de organizar las capturas de fotografías y los resultados.

La tabla SubProceso se encarga de almacenar todos los sub procesos que componen un proceso, en concreto, un subproceso se entiende como una de varias capturas que serán realizadas sobre un cultivo en específico.

La tabla Resultado se encarga de almacenar la información de cada resultado obtenido, en cada sub proceso, teniendo en cuenta los anteriores capítulos, el único resultado generado por cada subproceso es el NDVI.

5.4.3. Prototipo móvil

De acuerdo a los requisitos y diagramas planteados en la arquitectura se definen las funcionalidades principales de la aplicación móvil en el diagrama HFA.

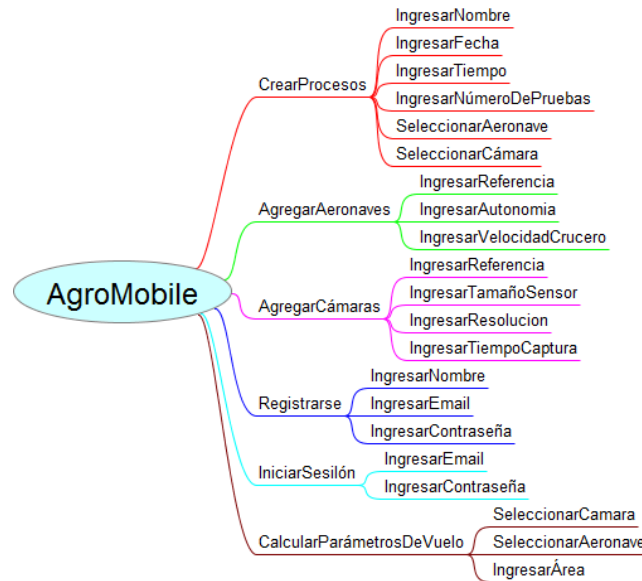


Figura 80 Diagrama de funcionalidades HFA [Fuente propia].

5.4.3.1. Interfaz Gráfica

Considerando el diagrama de funcionalidades, se procede al diseño de un StoryBoard, que será validado con personas ajenas a la aplicación siguiendo un diseño centrado en el usuario.

El StoryBoard es una representación gráfica preliminar de las funcionalidades de la aplicación y es útil para realizar una validación del diseño de interfaces antes de iniciar la etapa del desarrollo.

Se presenta el diseño y descripción de cada una de las vistas orientadas a cumplir las funcionalidades indicadas en el diagrama HFA. Cabe aclarar que en las pantallas se implementan patrones de diseño de “*Material Design*” [73], tales como la barra de navegación, o el botón flotante entre otros.

- **Vista Principal**

Esta pantalla se encarga de cumplir la funcionalidad principal del prototipo, que se basa en la gestión de los procesos que serán llevados a cabo por parte de los usuarios, la pantalla se compone de una lista general en la que serán mostrados todos los procesos existentes y su estado, así como también se encuentra un botón flotante que representa la funcionalidad principal de la aplicación, que es agregar nuevos procesos. También se compone de un elemento denominado barra de navegación en la cual se presentan el resto de funcionalidades de la aplicación.

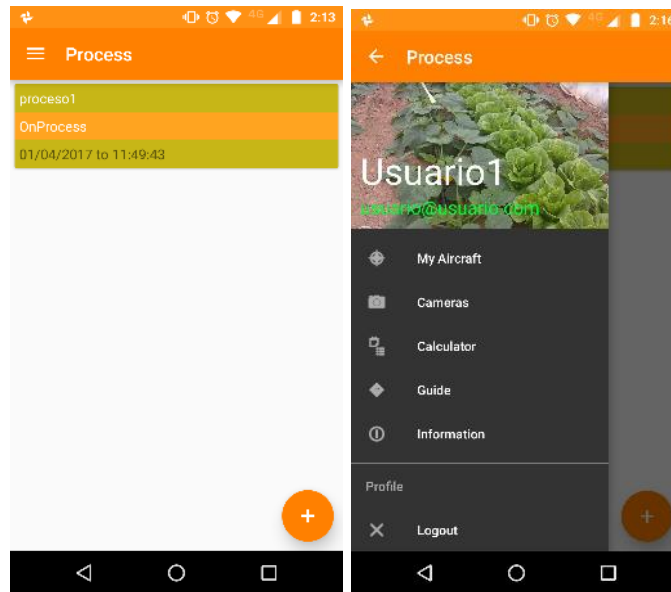


Figura 81 Pantalla principal [Fuente propia].

- **Vista Agregar Proceso**

La Figura 82 muestra las vistas diseñadas para la funcionalidad de agregar un nuevo proceso, en el que también se agregan una aeronave y una cámara para realizar los cálculos necesarios.

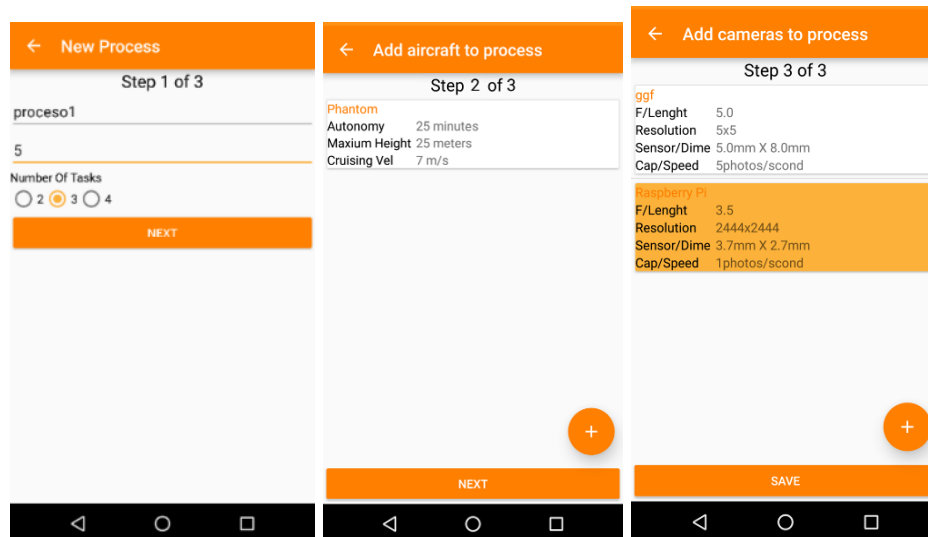


Figura 82 Vistas para agregar proceso [Fuente propia].

- **Vista Proceso**



Figura 83 Vista de un proceso [Fuente propia].

Esta vista se encarga de mostrar las características principales de un proceso, esta sección muestra también las tareas que lo componen las cuales fueron definidas al momento de crear el proceso mostrado.

Es importante aclarar que las vistas anteriormente mostradas corresponden a la funcionalidad básica de la aplicación, en el anexo C se presentan otras vistas que incluyen validaciones y mensajes que informarán al usuario en torno al control de errores.

Teniendo en cuenta que el desarrollo de aplicaciones Android se basa en un modelo de desarrollo denominado Modelo Vista-Control el cual se basa en separar la lógica de la parte de las vistas se tiene un lenguaje y unos procedimientos definidos en cada uno de los procesos, en este caso para la implementación de las vistas anteriormente diseñadas se utiliza un lenguaje de etiquetas demarcado (XML) [74], el cual mapeará cada uno de los componentes de cada vista.

- **Plantillas para los datos individuales**

Cada una de las vistas que contienen listas de datos deberán ser renderizadas utilizando una plantilla o *“template”* para cada una de ellas, en la parte lógica se analizará el mecanismo de llenado de cada una de las vistas, en este caso se presentan las plantillas utilizadas. Se presenta en la Figura 84 un ejemplo de la plantilla de un proceso de captura.

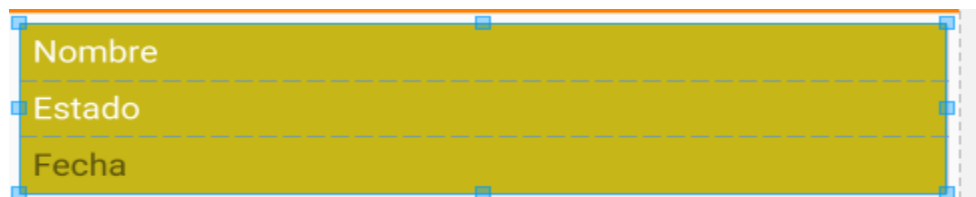
A screenshot of a data entry form template. It consists of a yellow rectangular box with a thin orange border. Inside the box, there are three horizontal sections separated by dashed lines. The top section is labeled 'Nombre', the middle section is labeled 'Estado', and the bottom section is labeled 'Fecha'. Small blue square handles are visible at the corners and midpoints of the box, indicating it is a drag-and-drop element.

Figura 84 Plantilla proceso de captura [Fuente propia].

En el anexo C se presentan las diferentes plantillas de datos utilizadas en la aplicación

5.4.3.2. Lógica de la aplicación

La lógica de la aplicación será la encargada de darle funcionalidad a cada una de las anteriores vistas, siguiendo con el modelo Vista-Controlador, la parte lógica hará las veces del controlador. Cada una de las vistas que encarnan una funcionalidad en la aplicación tendrán asociada una clase en el controlador, estas son denominadas “*Activity*” para lo cual cada una lleva asociado un ciclo de vida, sin embargo el análisis a fondo de estos temas no está contemplado en este trabajo de grado, para lo cual si desea mayor información se recomienda remitirse a [75].

- **Modelos**

Para comenzar con el proceso de implementación de la lógica es necesario crear los modelos de los objetos que interactúan con el sistema, estos son:

- **Usuario:** Es la clase que mapea la información de los usuarios, en este caso los agricultores, entre sus atributos están el nombre, el correo y la contraseña.
- **Proceso:** Es la clase que mapea la información de los procesos que pueda crear el usuario, entre sus atributos están el estado, la fecha de inicio y de finalización, el número de pruebas entre otros.
- **SubProceso:** Es la clase que mapea la información de cada una de las tareas de captura que se llevan a cabo en un proceso, entre sus características más importantes están la fecha de realización y su estado.
- **Camara:** Esta clase mapea la información de las cámaras a utilizar y sus características, entre estas están la longitud focal, la velocidad máxima de captura entre otras.
- **Aeronave:** Esta clase contiene información de las aeronaves utilizadas, contiene la altura máxima, la velocidad crucero entre otras.

La implementación de cada una de las clases se puede ver en el anexo D.

- **Activities o actividades**

Como se mencionaba anteriormente las actividades de la aplicación son el componente más importante de la misma, estas se encargan de renderizar la interfaz gráfica además de llevar el control de los procesos que se lleven a cabo. A continuación se da una breve descripción de cada una de ellas.

- **MainActivity:** La actividad principal es la que se lanza al iniciar la aplicación y se encarga de controlar los procesos de monitoreo que el usuario pueda tener.
- **NewProcessActivity:** Esta actividad es la que se encarga de controlar el ingreso de nuevos procesos de monitoreo.
- **ProcessActivity:** Esta actividad muestra los detalles de cada proceso.
- **CamerasActivity:** Esta actividad lista todas las cámaras disponibles agregadas por todos los usuarios.
- **AddCameraActivity:** Esta actividad permite agregar cámaras al sistema.
- **AeronavesActivity:** Esta actividad lista todas las aeronaves del usuario.
- **AddUAVActivity:** Esta actividad permite agregar nuevas aeronaves al sistema.
- **LoginActivity:** Esta actividad permite ingresar las credenciales para iniciar sesión.
- **RegisterActivity:** Esta actividad permite desplegar un formulario de registro para ingresar al sistema.

- **Adapters**

Estos elementos se utilizan para llenar las listas de datos de una actividad, básicamente son útiles para aplicar una plantilla al momento de mostrar cada uno de los elementos de la lista.

- **AircraftAdapter:** Es el adapter encargado de renderizar las aeronaves.
- **ProcessAdapter:** Es el encargado de renderizar los procesos de captura.
- **SubProcessAdapter:** Es el encargado de renderizar los subprocesos.
- **CameraAdapter:** Es el encargado de renderizar las cámaras.

Como se mencionó en la sección de vistas, existen diferentes plantillas que serán utilizadas por uno o varios adapters que son los encargados de llenar las listas de datos. En el anexo D se presenta la implementación de los adapter mencionados.

- **Conexión base de datos**

Una de las características importantes de la lógica corresponde a que deberá poseer capacidades de conectarse a la base de datos principal, para ello se

agregan las librerías que indica la documentación de Windows Azure que es el gestor de bases de datos elegido [76].

```
compile 'com.microsoft.azure:azure-mobile-android:3.1.0'
```

Figura 85 Dependencias de Azure Servicio Móvil [Fuente propia].

En dicho paquete de dependencias se encuentran las funciones necesarias que puedan permitir llevar a cabo las operaciones CRUD (Crear, Leer, Actualizar, Eliminar), por lo tanto se deben crear las mismas para cada una de las tablas que se encuentran en la base de datos.

- **Aeronaves Con:** Se encarga de realizar la comunicación con la base de datos para gestionar la información de las aeronaves
- **Camaras Con:** Se encarga de gestionar la información de las cámaras en la base de datos
- **ProcesosCon:** Se encarga de realizar la gestión de información de procesos.
- **SubProcesosCon:** Se encarga de la gestión de información de subprocesos.
- **UsuariosCon:** Se encarga de gestionar la información de usuarios.

Cada una de las clases anteriormente mencionadas deberá ser capaz de comunicarse de forma asíncrona a través de interfaces para no bloquear el proceso de ejecución de la aplicación. En caso de que el proceso responda con error deberá ser informado a la interfaz.

Por efectos de espacio en el documento la implementación de cada una de las clases se encuentran en el anexo D.

5.4.4. Prototipo Web

5.4.4.1. Interfaces Gráficas

Para el diseño del prototipo web se tomará en cuenta que este será el encargado de brindar la posibilidad de subir fotografías al sistema, por lo tanto teniendo en cuenta los requisitos establecidos y lo desarrollado en la parte móvil se definen las siguientes interfaces

- Interfaz principal o vista de procesos
- Interfaz de detalles de cada proceso
- Interfaz de subir fotografías
- Interfaz de autenticación

En este prototipo se prescinde de la interfaz de registro debido a que ya se encuentra en la aplicación móvil, por lo tanto se presenta el diseño de cada una de estas interfaces.

1) Interfaz principal o de procesos.

Se compone de una lista de todos los procesos creados por el usuario con los elementos básicos para la navegación, la interfaz se presenta en la Figura 86.

Lista de Procesos usuario@usuario.com			
Nombre	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Sub Proceso Actual
proceso1	01/04/2017 06:49:43	06/05/2017 06:49:43	1
proceso2	04/04/2017 06:42:36	09/05/2017 06:42:36	1

Figura 86 Pantalla principal Procesos [Fuente propia].

2) Interfaz de proceso individual

La interfaz de proceso individual se compone de toda la información básica de cada proceso, en este punto el usuario puede visualizar un resumen de cada uno en el botón detalles. Esto se presenta en las figuras 87 y 88

Lista de Sub Procesos proceso2			
Nombre	Fecha de realización	Estado	
Task 2 of proceso2	09/05/2017 06:42:36	No disponible	⌵
Task 1 of proceso2	05/04/2017 06:42:36	Disponible	⌵

Figura 87 Vista individual proceso [Fuente propia].



Figura 88 Interfaz detalles de proceso [Fuente propia].

En la Figura 88 se puede apreciar que la disponibilidad de los procesos corresponde a 3 días alrededor de la fecha indicada a la realización, esto con el fin de llevar un control, en el caso específico de lo mostrado se puede notar que el proceso se encuentra disponible, en caso de que la fecha ya haya pasado de ese rango el proceso se considera perdido, los diferentes casos se presentan en el anexo C.

3) Interfaz subir fotografías

Esta interfaz es la que se encarga de permitir al usuario el subir fotografías al servidor, teniendo en cuenta las recomendaciones recibidas, al servidor será necesario subir una fotografía RGB y una fotografía NGB en las cuales la primera no intervendrá en los resultados y será solo para fines ilustrativos. Esta interfaz se presenta en la Figura 89.



Figura 89 Interfaz subir fotografías [Fuente propia].

Es importante aclarar que para que los resultados sean registrados es necesario subir ambas fotografías de manera obligatoria.

4) Interfaz Gestión Vuelos

Esta interfaz aunque no hace parte de los requisitos generales del prototipo, fue necesario incluirla debido a que se requiere un proceso de transformación para el archivo generado por el *software* Mission Planner que podrá ser recibido por la aplicación Litchi con el fin de integrar la plataforma Phantom 3 Standard. Este proceso se estudió y fue definido en el capítulo 3. La interfaz mencionada se puede ver en la Figura 90.

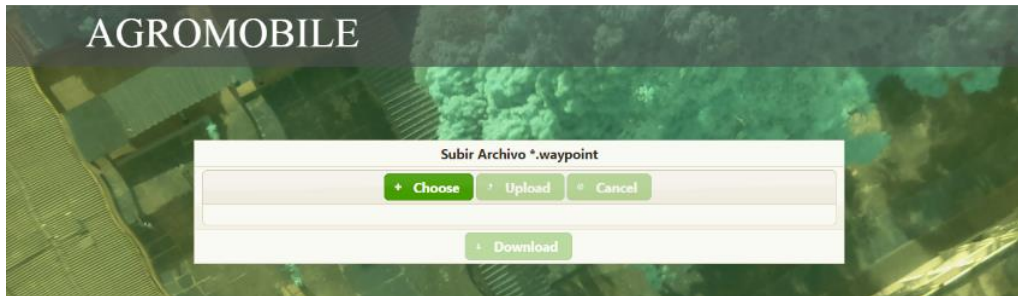


Figura 90 Gestor de archivos de vuelo [Fuente propia].

5.4.4.2. Lógica de la aplicación

Teniendo en cuenta las interfaces implementadas en el apartado anterior, se procede a describir el funcionamiento de la lógica que rige la aplicación, basado en la documentación de Java Empresarial JSF y la documentación de PrimeFaces, se describen los componentes de la lógica [77], [78].

- **Managed Beans o Beans Administrados.**

Los Managed Beans son los componentes más importantes de la aplicación y se encargan de controlar la ejecución y el desarrollo de los procesos, así como también de la navegación entre interfaces [77]. Es posible agregar tantos Managed Bean como se desee, pues a diferencia de lo analizado en la plataforma del prototipo móvil, donde es necesario una actividad para cada interfaz, en este caso, es posible agregar uno o más ManagedBean según el requerimiento, para este caso se decide implementar 3 Managed Bean, el primero se denomina LoginBean y será el encargado de manejar toda la información de los usuarios registrados y los procesos de control de sesión; el segundo se denomina MainMB y se le llama principal por que se encarga de manejar toda la información de los procesos y sus tareas; el tercero se denomina ArchivesMB y es el encargado de manejar la información y el control del proceso de subir imágenes al servidor. La implementación se presenta en calidad de anexo D.

- **Modelos**

Los modelos corresponden a los mismos que se utilizan en la aplicación móvil, por lo que el código en este caso es reutilizable.

En el anexo D se puede encontrar la implementación completa de los mismos.

- **Conexión a Bases de Datos.**

Esta sección se compone de diferentes elementos entre los que se encuentran los Beans de Java Empresarial (EJB) y los Handlers [77], los cuales se encargarán de facilitar las labores de conexión a la base de datos.

- **Enterprise JavaBeans (EJB):** Son utilizados para encapsular toda la conexión a la base de datos con los métodos que se requieran, la ventaja más importante de utilizar estos elementos es que no es necesario que sean declarados ni creados solo se requiere instanciarlos. A lo largo de este trabajo de grado se tienen 3 EJB que serán descritos a continuación,
 - **ProcessEJB:** Este EJB se encarga de listar todos los procesos por Id de usuario además del método de actualizar proceso. Cada método se encarga de crear la conexión utilizar lo necesario y luego cerrarla para evitar problemas de seguridad.
 - **UserEJB:** El EJB Usuario se compone de dos métodos que se encargan de buscar los usuarios por los parámetros de ID y login o nombre de usuario.
 - **SubProcessEJB:** El EJB Sub Proceso se compone de dos métodos, el primero lista todos los procesos por ID y el segundo se encarga de actualizar la información de un sub proceso determinado.

La implementación de los EJB se presenta en el anexo D.

- **Handlers:** Son los encargados de llevar a cabo una comunicación directa con la base de datos mediante el *driver* proporcionado por el gestor de la base de datos, en este caso como el servicio móvil montado para la aplicación móvil maneja *SQL Server* se debe utilizar la lógica y lenguaje SQL necesario para el mismo. Esto se puede encontrar en la documentación de *SQLServer* [79]. Los *handler* son un complemento de los EJB y llevan una interacción directa con la base de datos, por cada EJB se implementa un Handler, estos serán descritos a continuación.
 - **HandlerProcess:** El *Handler* proceso contiene métodos encargados de realizar las tareas que requieran los EJB además de implementar métodos para la gestión de la conexión con el servidor.

- **HandSubProcess** el Handler sub proceso contiene los métodos que se encargan de realizar las consultas que requiere el EJB Sub Proceso además de la gestión de las conexiones.
- **HandUser:** el Handler User contiene los métodos que se encargan de implementar los métodos que requiere el EJB Usuario, además de la gestión de las conexiones.

La implementación de los handler se puede apreciar en el anexo D.

5.5. Puesta en Marcha de la solución

La fase de puesta en marcha que se refiere a la entrada en funcionamiento del prototipo implementado sobre las herramientas anteriormente descritas, esto se contempla en los siguientes pasos.

a) Creación y configuración de la máquina virtual en Windows Azure

Para la creación de la máquina virtual se utiliza los servicios en la nube de Microsoft Azure, donde lo importante es tener una máquina virtual con sistema operativo Ubuntu. En [80] se presentan tutoriales de creación de máquinas virtuales en Microsoft Azure.

El proceso de configuración de la máquina virtual se basa en la instalación de las herramientas descritas en la sección de herramientas. Tales como Git, NetBeans, OpenCV, MatPlotLib, entre otros. Debido a que no suponen una importancia sustancial, estos procesos no serán documentados, pero se pueden encontrar en [81], [68], [77] , [53].

Es importante tener en cuenta que para el acceso a la máquina virtual se utiliza TightVNC [82], y gracias a que se le asigna una IP pública, todos los servicios podrán ser consumidos desde cualquier lugar con acceso a internet.

b) Creación y configuración del servicio para la aplicación móvil

Un servicio es un producto de Microsoft Azure el cual se encarga de soportar distintos servidores de bases de datos, además de aportar un API REST en Java Script para que haga las veces de BackEnd para la aplicación móvil.

El proceso de creación deberá tener en cuenta la creación de la base de datos y su conexión con el servicio.

La configuración del servicio contempla la implementación de la base de datos. Una de las ventajas más importantes es que cuando se agrega un registro nuevo a una base de datos, esta automáticamente crea los campos necesarios en la misma, por lo que será suficiente con implementar los modelos de forma correcta de acuerdo a lo deseado.

c) Apertura de los puertos de comunicación de los servidores.

Teniendo en cuenta que los servidores GlassFish⁶ y Tomcat⁷ utilizados manejan algunos puertos para poder funcionar, en concreto 8080 y 80 respectivamente [77], estos deberán ser abiertos en la interfaz de red de la máquina virtual creando reglas de comunicación, el proceso de apertura de puertos se puede encontrar en [83].

Habiendo realizado los pasos anteriores ya es posible correr la aplicación web sobre el servidor GlassFish, el servidor ApacheTomcat se encarga de dar acceso a los resultados que serán implementados y analizados en el capítulo 7.

⁶ GlassFish es un software tipo servidor que permite desplegar aplicaciones de Java EE

⁷ Tomcat es un software multiplataforma que se utiliza comúnmente para realizar despliegues de aplicaciones ya compiladas

Capítulo 6

Pruebas generales de funcionamiento del prototipo en entornos reales

Con el objetivo de realizar la validación del prototipo implementado y el método para la caracterización de cultivos agrícolas se propone una serie de pruebas generales en entornos reales, dichas pruebas están basadas en el estándar de pruebas IEEE 29119 [84], esto con el fin de llevar un orden y un control sobre las mismas.

6.1. Especificación de pruebas

a) Política de pruebas

Objetivo de las pruebas: Evaluar el desempeño del método para el monitoreo de cultivos agrícolas en torno al prototipo y los resultados que del mismo se puedan obtener. Se desea implementar los procesos para la obtención del NDVI sobre un cultivo determinado durante un tiempo determinado procurando mantener las condiciones en cada prueba.

Alcance de las pruebas: Se contempla como objetivo principal de las pruebas el permitir realizar un monitoreo de un cultivo agrícola real en un tiempo determinado. La prueba debe incluir análisis de resultados entregados por el prototipo software tal que sea apto para la interpretación de productores agrícolas. Las pruebas, se realizan sobre un cultivo de café en la hacienda el Troje del municipio de Timbío Departamento del Cauca.

6.2. Estrategia de las pruebas

a) Procesos de las pruebas

Los procesos de las pruebas están basados en las actividades descritas en la Tabla 6.

Actividad	Nombre	Descripción
1	Identificación de la zona de las pruebas	Se debe realizar una identificación del área a cubrir para el reconocimiento de la ruta que realizará la aeronave
2	Planificación de las Capturas	Se realiza la planificación de las pruebas de vuelo de acuerdo al cronograma y los criterios establecidos en el capítulo 4, en este paso se crea el proceso de caracterización para el cultivo determinado en el prototipo.
3	Registro de los datos de la planificación de la captura.	Se Registra en el sistema la información de planificación de captura además de la información del proceso para que sea programado.
4	Realización Prueba 1	Se realiza la prueba 1 de acuerdo con todos los lineamientos propuestos en el capítulo 3 y 4.
5	Procesamiento y carga de la información prueba 1	La información recolectada se procesa para formar un mosaico que posteriormente se ingresa en el prototipo web de acuerdo a la información recolectada
6	Realización Prueba 2	Se realiza la prueba 2 de acuerdo con todos los lineamientos propuestos en el capítulo 3 y 4.
7	Procesamiento y carga de la información prueba 2	La información recolectada se procesa para formar un mosaico que posteriormente se ingresa en el prototipo web de acuerdo a la información recolectada
8	Realización Prueba 3	Se realiza la prueba 3 de acuerdo con todos los lineamientos propuestos en el capítulo 3 y 4.

9	Procesamiento y carga de la información prueba 3	La información recolectada se procesa para formar un mosaico que posteriormente se ingresa en el prototipo web de acuerdo a la información recolectada
10	Generación de resultados del proceso	El prototipo, al finalizar el proceso de recolección en los tiempos planificados, genera los resultados a partir de los datos ingresados.
11	Análisis de resultados	Finalmente se deben analizar los resultados por parte de los actores de acuerdo a la socialización en donde se consigna la evaluación funcional del prototipo.

Tabla 6 Actividades de las pruebas

b) Productos de las pruebas

A lo largo del proceso de pruebas se generaron los siguientes productos: Reporte de resultados generados a partir del prototipo software.

c) Herramientas de las pruebas

Las herramientas software que intervienen en las pruebas son: Office Excel para la consignación de resultados, Máquina virtual de Microsoft Azure, Servicio Móvil de Microsoft Azure, NetBeans IDE 7.4 para el despliegue del servicio Web, Aplicación Litchi, Herramienta Mission Planner, Putty, VNC Server. Las herramientas Hardware que intervienen en las pruebas son: Tarjeta Raspberry Pi, Cámara Raspberry Pi NoIR, Cámara Raspberry PI RGB, Filtros Rosco #19 y #2007, Aeronave Phantom 3 Standard, Celular Motorola Moto G4, Wifi Portatil Une MiFi, Banco de batería Samsung.

6.3. Gestión de planificación de las pruebas

6.3.1. Planificación de las pruebas

La planificación de las pruebas se basa en la construcción del cronograma descrito en la Tabla 7 que será el encargado de organizar las actividades que se realizarán en torno al proceso de pruebas.

Actividad	Fecha
Identificación de la zona de capturas	15 de abril 2017
Planificación de las Capturas	15 de abril 2017
Registro de los datos de la planificación de la captura	15 de abril 2017
Realización Prueba 1	23 de abril 2017
Procesamiento y carga de la información prueba 1	23 de abril 2017
Realización Prueba 2	30 de abril 2017
Procesamiento y carga de la información prueba 2	30 de abril 2017
Realización Prueba 3	7 de mayo de 2017
Procesamiento y carga de la información prueba 3	7 de mayo de 2017
Generación de resultados del proceso	7 de mayo de 2017
Análisis de resultados	7 de mayo de 2017

Tabla 7 Cronograma de las pruebas

6.3.2. Control y seguimiento

a) Identificación y valoración de riesgos

El proceso de identificación y valoración de riesgos dentro del proceso de pruebas se llevó a cabo de acuerdo a los lineamientos de IEEE 29119-3 [85]. Los riesgos y su valoración son presentados en la Tabla 8. En esta tabla, el factor **E** corresponde al índice de exposición del riesgo, **P** es la probabilidad de ocurrencia del riesgo e **I** corresponde a la incidencia del riesgo. El factor de exposición corresponde al producto entre la incidencia y la probabilidad de ocurrencia. Tanto la probabilidad de ocurrencia como la incidencia son números en el rango entre 1 y 6, siendo el valor inferior 1 y el valor superior 6 [85].

Código de Riesgo	Descripción	P	I	E
R1	No posibilidad de realizar las pruebas a causa del mal tiempo	4	3	12
R2	Problema de capturas o de hardware de la cámara	2	2	4

R3	Cambios repentinos en el alcance y los objetivos de las pruebas	2	3	6
----	---	---	---	---

Tabla 8 Verificación de riesgos

b) Mitigación de riesgos identificados

En la Tabla 9 se muestran las estrategias de mitigación para los riesgos identificados. La documentación de las mismas se ha hecho de acuerdo con los ejemplos disponibles en el estándar de pruebas IEEE 29119 – 3 [85].

Identificador	Riesgo que mitiga	Descripción de la estrategia
E.M. 1	R1	Disposición de flexibilidad de tiempo durante tres días para realizar la captura en el momento más adecuado posible
E.M. 2	R2	Contar con Hardware de respaldo para que sea reemplazado en caso de ser necesario
E.M. 3	R3	Establecimiento de un cronograma de pruebas estricto

Tabla 9 Estrategias de mitigación de los riesgos identificados.

6.4. Gestión de ejecución de las pruebas

La ejecución de las pruebas está encaminada a la realización de las actividades establecidas en la Tabla 6.

6.4.1. Reconocimiento del cultivo a monitorear.

Se inicia el proceso con el reconocimiento del cultivo a monitorear, que para este caso es un cultivo de café de una hectárea de longitud. En la figura 91 se presenta una vista aérea a partir de Google Maps. En este paso se verifican posibles obstáculos además de delimitar las zonas de prueba.



Figura 91 Área a cubrir [86].

6.4.2. Planificación de las capturas

Se establece que se realizarán en total 3 pruebas separadas por 8 días cada una, para una duración de pruebas de 3 semanas. Se define la altura como una constante de vuelo de 50 metros, debido a que a esa altura no existen obstáculos que afecten el curso de la aeronave.

La primera prueba se realizó el día 23 de abril del 2017, la segunda el 30 de abril del 2017 y la tercera el día 7 de mayo del 2017.

6.4.3. Ingreso de información al sistema

Con el ingreso de información al sistema se inicia el proceso de captura de información, pues es ahí donde se realiza la programación de las pruebas y la apertura del sistema. Como se había detallado en el capítulo 5, la iniciación de un proceso de monitoreo de cultivos se realiza en 4 pasos principales en los cuales se ingresa la información del cultivo, se selecciona la aeronave y la cámara, para finalmente mostrar un resumen de los datos del vuelo y guardar en el calendario del teléfono un recordatorio de las pruebas. Esto se presenta a continuación.

Paso 1. Ingreso de la información principal del proceso.

En este paso se ingresa la información principal que recibe el proceso, en la Figura 92 se presenta el ingreso de la información al sistema, se recibe el nombre, el número de pruebas, la altura y se procede a seleccionar el número de pruebas.



Figura 92 Carga de información al sistema [Fuente propia].

Paso 2. Selección de la aeronave

En este paso se agrega la aeronave utilizada al sistema. En caso de que no se muestre ninguna aeronave, será posible agregarla manualmente.

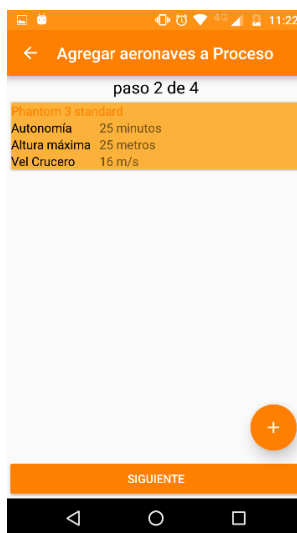


Figura 93 Agregar Phantom 3 Standard [Fuente propia].

Paso 3. Selección de la cámara

En este paso se agrega la cámara Raspberry PI NoIR la cual tiene unas características ya predefinidas, en caso de no encontrar la cámara deseada, el sistema permite agregarla manualmente.



Figura 94 Agregar Raspberry Pi al proceso [Fuente propia].

Paso 4. Información de vuelo.

En la Figura 95 se presenta un resumen de la información del vuelo calculada por la aplicación móvil, en ella se presentan los datos del proceso tales como la cámara utilizada y la aeronave, así como también la altura de vuelo seleccionada y de acuerdo a las ecuaciones (9) y (10) estudiadas en el capítulo 3, se calcula la distancia entre líneas de vuelo y la distancia entre capturas. Para que la distancia entre capturas se pueda cumplir, se calcula la velocidad de la aeronave teniendo en cuenta la velocidad de captura de la cámara.

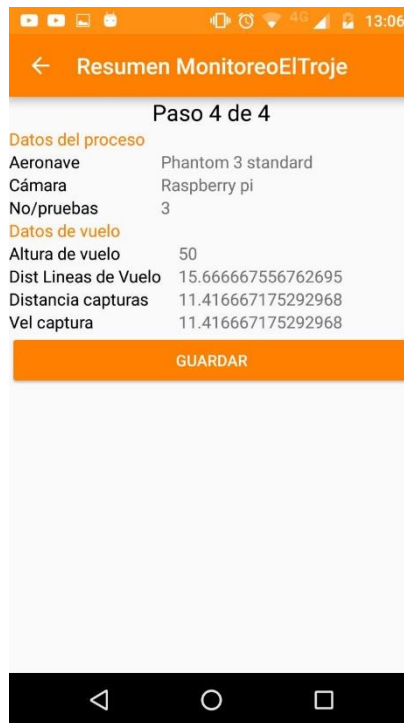


Figura 95 Resumen Creación del proceso [Fuente propia].

Paso 5. Resumen de los procesos

Al momento de guardar el proceso, se programan las capturas en el calendario y se crea cada una de las pruebas a realizar. Esto se presenta en la Figura 96 donde se puede apreciar la fecha de cada uno de los procesos y además se sabe cuáles de ellos están activos para realizar la carga de la información. Así como también se puede apreciar la información del vuelo calculada que ha sido almacenada en el sistema para su uso posterior.



Figura 96 Información del proceso ya implementado [Fuente propia].

Paso 6. Creación de la misión

Para este punto, después de haber hecho una inspección del terreno, se procede a realizar la creación de la misión teniendo en cuenta la información que arroja la aplicación móvil, el proceso a seguir fue el que se estableció en la sección 3.2.1, en donde se propone un método para la planificación la misión. En la Figura 97 se presenta el resultado de dicho proceso en donde se evidencia que todos los puntos por donde pasará la aeronave conservan la misma altura, además de conservar una distancia entre líneas de vuelo paralela, lo que asegura un traslape lateral del 70%, pues fue lo implementado en la aplicación de forma predeterminada, además, se establece una velocidad de vuelo de 10 metros por segundo para la aeronave, lo que asegura el límite superior arrojado por los cálculos de la aplicación, en donde se establece esta velocidad para que el traslape longitudinal de las fotografías sea del 70%. Todo esto garantiza que cada uno de los puntos del terreno esté en por lo menos dos fotografías, lo que permite al software Image Composite Editor realizar la tarea de fusión de las imágenes capturadas.



Figura 97 Planificación de la misión Phantom 3 Standard Litchi App [Fuente propia].

Finalizado este proceso, se puede proceder a la realización de las pruebas en las fechas indicadas en la Tabla 6.

6.4.4. Realización de pruebas, pre-procesamiento y registro de datos de las pruebas

Este proceso se basa en la sección 3.2.2 donde, después de haber realizado la planificación de la captura se procede a ejecutarla, en este paso, en cada tarea programada se realizó una verificación del Hardware y de las herramientas a utilizar, tal y como se aconseja en la sección 3.2.1, esto permitió que todas las tareas se llevaran de forma exitosa. Para conseguir una perspectiva clara sobre la configuración de la cámara a utilizar, se llevó a cabo en cada tarea una captura por cada una de las configuraciones manejadas a lo largo del trabajo, las cuales fueron:

- Filtro Rojo con AWB 0.54,1
- Filtro Azul con AWB 1,1
- Filtro Rojo con AWB 1,1

Inicialmente se procede a realizar las capturas, luego en la misma prueba, se procede a subir la información al servidor.

Filtro Rojo AWB 054,1

Los resultados del proceso de captura se presentan como se puede ver en la Figura 98 donde se recolectan alrededor de 200 fotografías, lo cual es de forma similar en el resto de las pruebas.

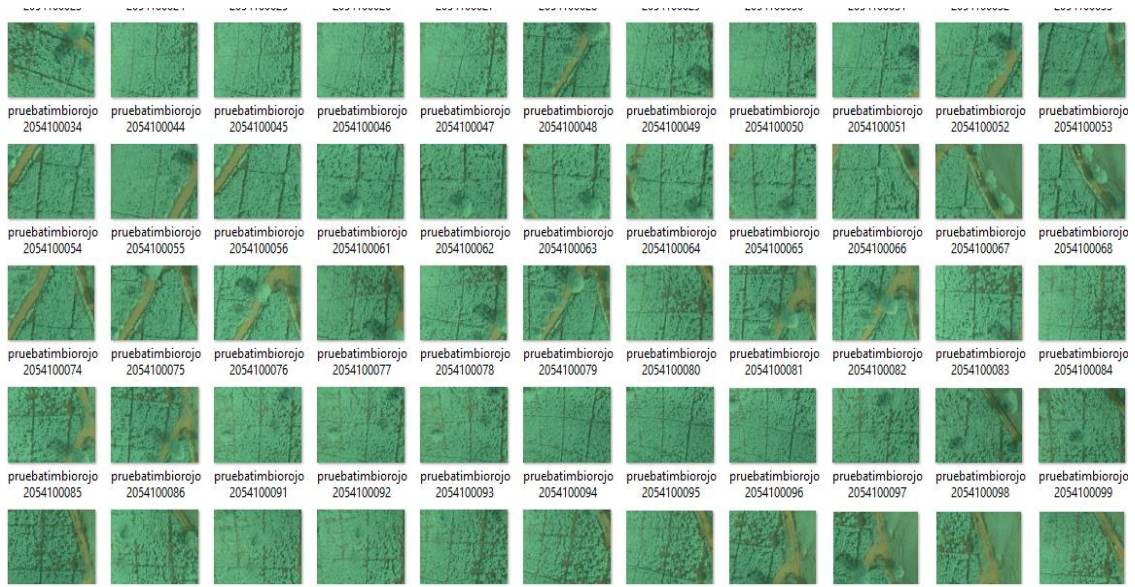


Figura 98 Resultados proceso de captura [Fuente propia].

Luego de la recolección se procede a ejecutar el proceso de fusión de imágenes, en donde la herramienta a utilizar es Image Composite Editor de donde se obtiene los resultados mostrado en la Figura 99 utilizando el proceso descrito en [87]. Los resultados presentados pertenecen a las tres pruebas realizadas en las fechas establecidas, una el 23 de abril, otra el 30 de abril y la última el 7 de mayo del año 2017 respectivamente.

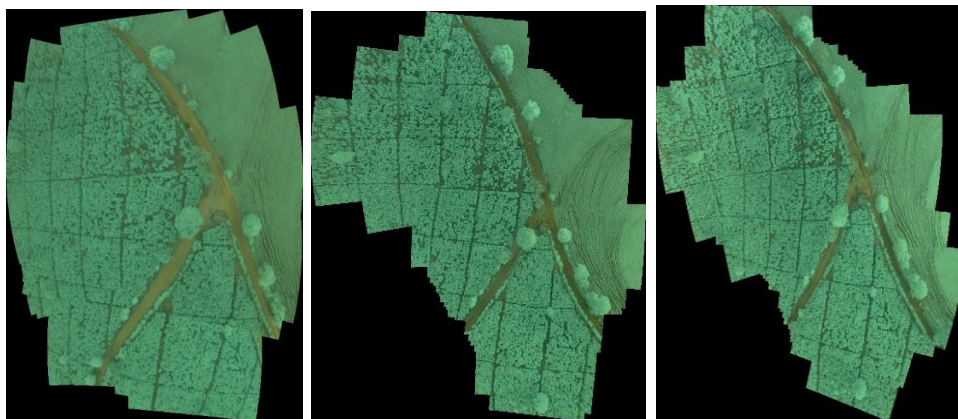


Figura 99 Pruebas con Filtro rojo AWB 0.54,1 [Fuente propia].

Con esto se da paso a las pruebas realizadas con el filtro rojo #19 con la configuración AWB 1,1.

Filtro Rojo AWB 1,1

Esta configuración es una alternativa al uso del filtro rojo con la cual también se realizan cálculos de NDVI, el proceso a realizar fue el mismo que la configuración anterior, en la Figura 100 se presentan las pruebas del 23 de abril, 30 de abril y 7 de mayo respectivamente.

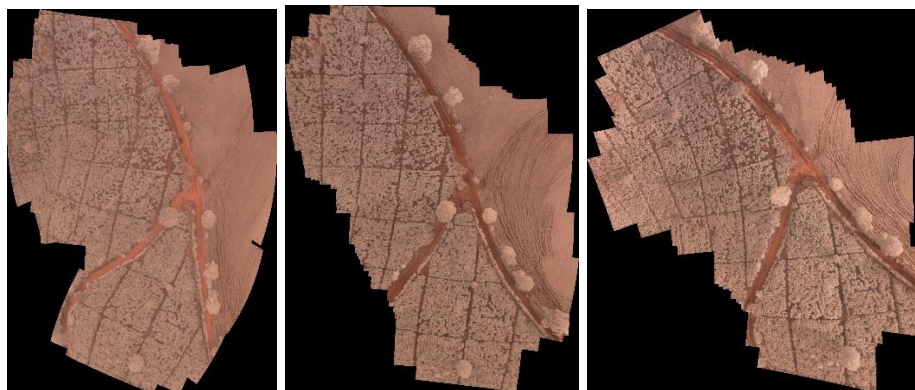


Figura 100 Pruebas con filtro rojo Awb 1,1 [Fuente propia].

Filtro Azul AWB 1,1

Esta configuración se establece para el cálculo del NDVI mediante el filtro #2007, en la Figura 101 se presentan las pruebas del 23 de abril, 30 de abril y 7 de mayo respectivamente.

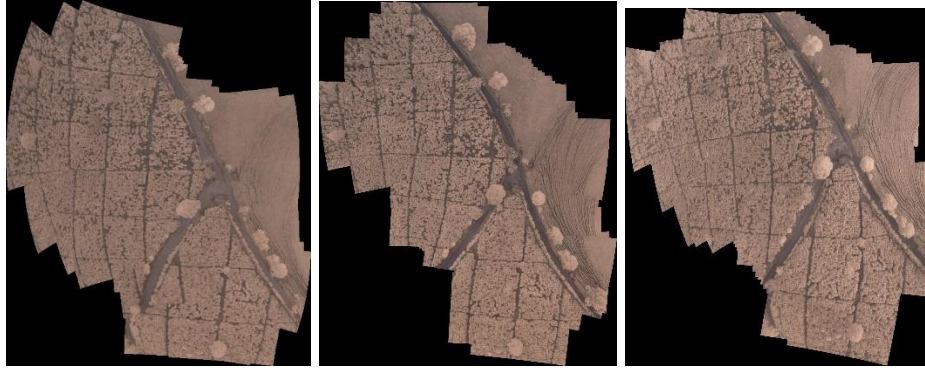


Figura 101 Mosaicos filtro azul Awb 1,1 [Fuente propia].

6.4.5. Carga de fotografías:

En cada captura teniendo la información del proceso se realiza la carga de la información al servidor, para esto, se crean tres procesos iguales con el fin de poder subir las fotografías que se generan con cada una de las configuraciones de los filtros.

En la Figura 102 se muestra la interfaz de carga de fotografías donde en este caso se sube la misma fotografía en ambos campos, esto se debe a que no se cuenta con una fotografía RGB de las capturas. En este caso, como es una prueba controlada donde se tiene dominio del software desarrollado, es necesario definir el tipo de filtro y la configuración a utilizar en el sistema de procesamiento de información, como se menciona en la sección 6.4.6.1, se establece en el módulo de procesamiento de información el método a utilizar, que para este caso contiene los coeficientes determinados para que el proceso tenga éxito.



Figura 102 Interfaz de carga de fotografías a las diferentes tareas [Fuente propia].

6.4.6. Módulo de procesamiento de la información

El módulo del procesamiento de información es el encargado de llevar a cabo la generación de los resultados mediante diversos procesos de tratamiento de imágenes, dicho módulo deberá seguir las fases descritas en la sección 4.3 que se refiere al estudio del procesamiento digital de imágenes. En esta fase, se hace uso del lenguaje Python para implementar el procesamiento de imágenes, estos programas son ejecutados desde el servidor web mediante el uso del objeto “*Runtime*”, que ejecuta programas de línea de comandos a partir de la máquina virtual de Java, llevando a cabo el procesamiento de la información sin requerir intervención externa por parte de un administrador.

La implementación del módulo de procesamiento de información se describe a continuación:

6.4.6.1. Implementación del Programa en Python.

La implementación de cada una de las fases descritas en la sección 4.3 se presenta en el diagrama de flujo presentado en la Figura 103, dicho diagrama de flujo corresponde a la descripción de la estructura del programa encargado de llevar a cabo el procesamiento de las imágenes.

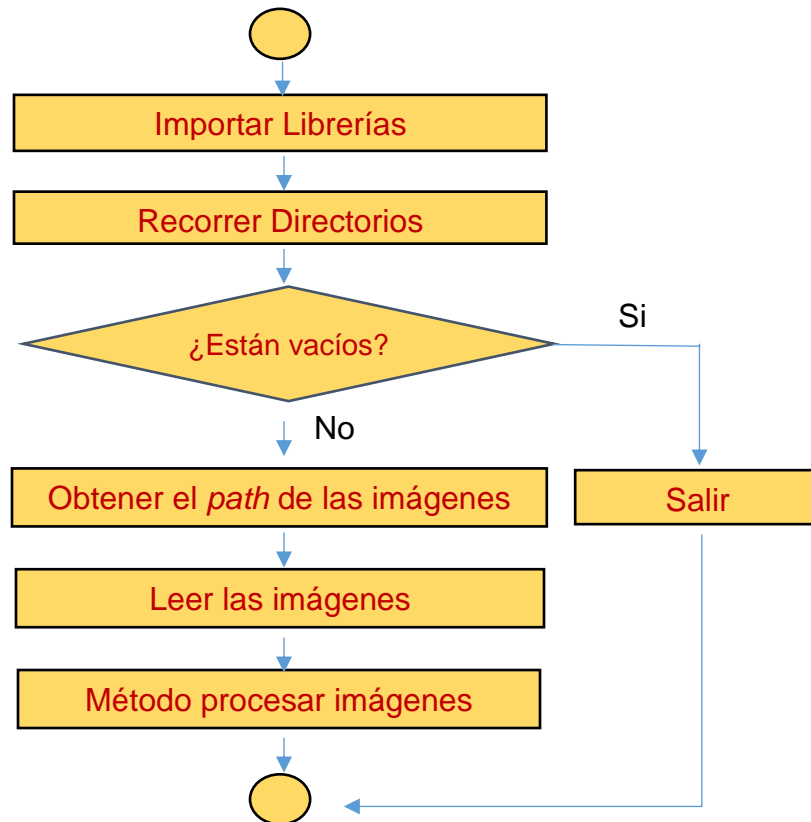


Figura 103 Programa para el procesamiento de imágenes [Fuente propia].

En la Figura 103 se presenta que el diagrama de flujo que representa el código que será llamado para ejecutar la función de procesar la información, recibe como parámetro el *path* a donde se guardará toda la información, además del lugar donde se encuentra guardada la imagen objeto para ser procesada, seguidamente se procede a leer las imágenes utilizando el método “*listdir*” para de esta forma obtener los nombres de las imágenes para que el programa los pueda leer.

Existe un paquete “funciones” que contiene todos los métodos necesarios que realizan los procesos de cálculo de NDVI en función de la configuración utilizada en la imagen.

- **Método para procesar imágenes.**

En la Figura 104 se presentan el proceso realizado por el método procesar imágenes, esta función hace parte del diagrama de flujo principal de la Figura 103.

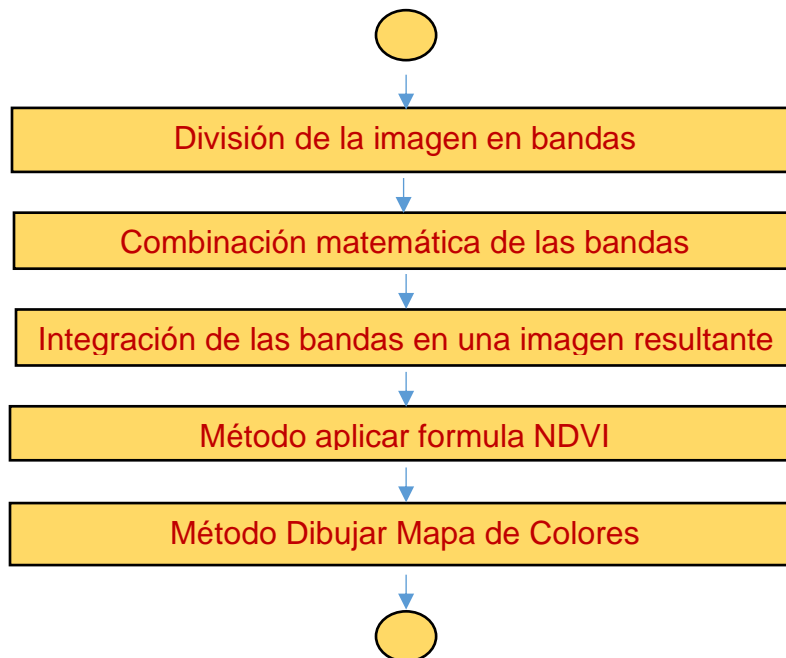


Figura 104 Diagrama de flujo método procesar imagen [Fuente propia].

El diagrama de flujo de la Figura 104 inicia con la separación de las bandas que componen la imagen mediante el método “*split*” del paquete OpenCV, para a partir de ahí, de acuerdo a las pruebas realizadas en el apartado 4.3 establecer las combinaciones matemáticas entre las bandas de acuerdo a la configuración de balance de blancos de la imagen. En este trabajo de grado

se cuenta con 2 filtros para los cuales se establecieron configuraciones estudiadas en la sección 4.3, este proceso da como resultado unas nuevas bandas que ya son adecuadas para el cálculo del NDVI, estas bandas se integran obteniendo como resultado una imagen NGB resultante, esto con el objetivo de visualizar los cambios que se llevaron a cabo sobre la imagen original. Luego se procede a realizar el llamado de la función del cálculo del NDVI la cual se define por el diagrama de flujo mostrado en la Figura 105.

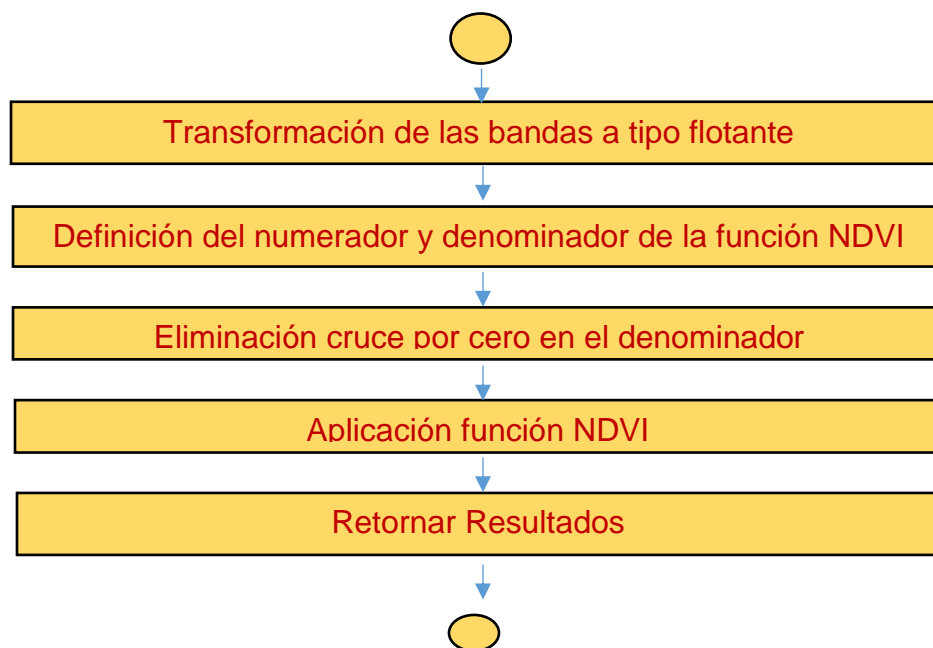


Figura 105 Función cálculo de NDVI [Fuente propia].

La función del cálculo del NDVI de la Figura 105 recibe las bandas correspondientes al infrarrojo cercano y al visible en forma de matriz bi dimensional, cada uno de los valores de dichas matrices es transformado al tipo de dato flotante 32 bits para evitar perdida de información en los decimales, luego se construye el numerador y denominador correspondientes a la fórmula del NDVI descrita en (22) teniendo en cuenta de validar el cruce por cero al que se ven enfrentados los valores cuando su valor hace que el denominador sea cero para finalmente aplicar la fórmula (22), esto devuelve una matriz correspondiente al NDVI de la imagen.

La fase final del proceso del procesamiento de imágenes descrito corresponde a la de la función de dibujar el **mapa de colores** del diagrama de flujo de la Figura 105, esta función se describe en el diagrama de la Figura 106

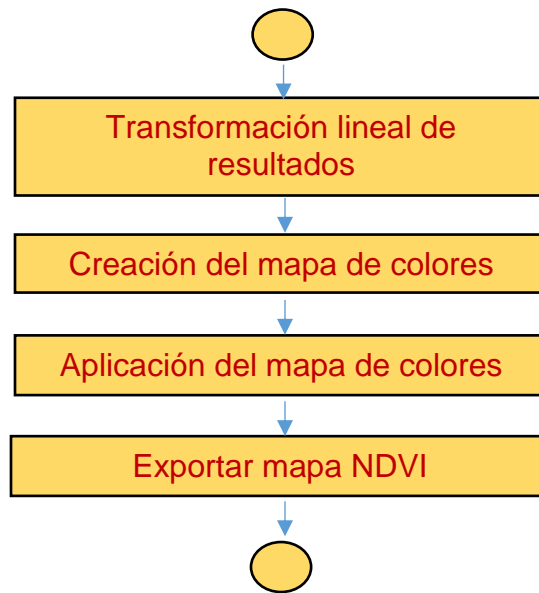


Figura 106 Aplicación de ColorMap [Fuente propia].

El método encargado de aplicar el mapa de colores se basa en el paquete Matplotlib el cual recibe los valores de NDVI calculados y los mapea de tal forma que les sea aplicado un mapa de colores para la fácil interpretación, finalmente se guarda la imagen en el *path* del directorio de información del servidor.

Al finalizar la carga de fotografías y el procesamiento de datos en las tres fechas estipuladas, la interfaz principal se ve como se muestra en la Figura 107.



Figura 107 Interfaz principal con los procesos terminados [Fuente propia].

Se da a entender que para lograr procesar las bandas de las tres configuraciones se realiza un proceso idéntico para cada una de ellas, es decir, se toma la misma configuración mostrada en los pasos iniciales y se crean 3 procesos con los cuales se trabaja.

6.5. Generación de resultados de las pruebas

Habiendo finalizado las pruebas y el estado de los procesos llega a “Terminado”, el sistema habilita la sección “mostrar resultados” en el servidor web tal y como se presenta en la Figura 108. Los resultados generados corresponden a la compilación de imágenes NDVI provenientes del proceso de cálculo de NDVI de cada una de las tareas.

Proceso filtroblue			
Nombre:	filtroblue		
Sub Proceso Actual	3		
Lista de Sub Procesos filtroblue			
Nombre	Fecha de realización	Estado	
Tarea 1 de filtroblue	22/05/2017 11:25:56	Finalizado	ρ
Tarea 2 de filtroblue	22/05/2017 11:25:56	Finalizado	ρ
Tarea 3 de filtroblue	22/05/2017 11:25:56	Finalizado	ρ
<input type="button" value="Volver"/> <input type="button" value="Mostrar Resultados"/>			

Figura 108 Habilidad de Mostrar Resultados [Fuente propia].

Esta opción es habilitada cuando todas las tareas o pruebas del proceso se han llevado a cabo, existen dos posibilidades para la generación de resultados, la primera es la ventana que se muestra inmediatamente después de accionar “mostrar resultados” tal y cual se puede apreciar en la Figura 109.

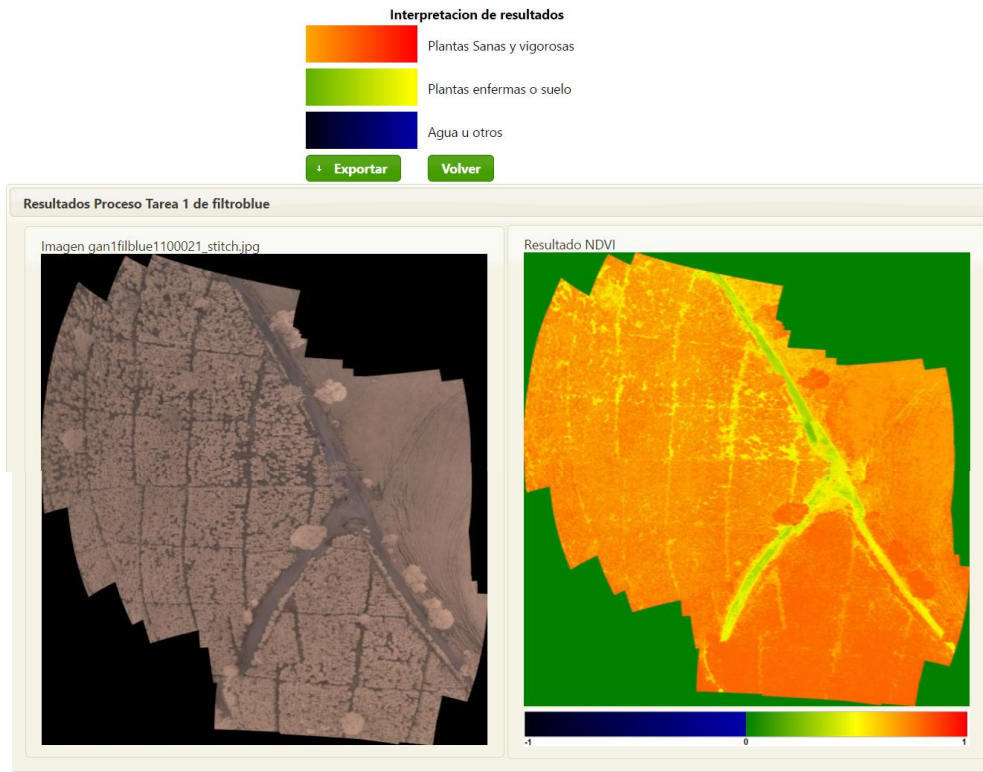


Figura 109 Resultados por proceso [Fuente propia].

Como se puede apreciar Figura 109, existe la posibilidad de generar los mismos resultados mostrados en la página en formato de PDF, un ejemplo de ello se presenta en la Figura 110

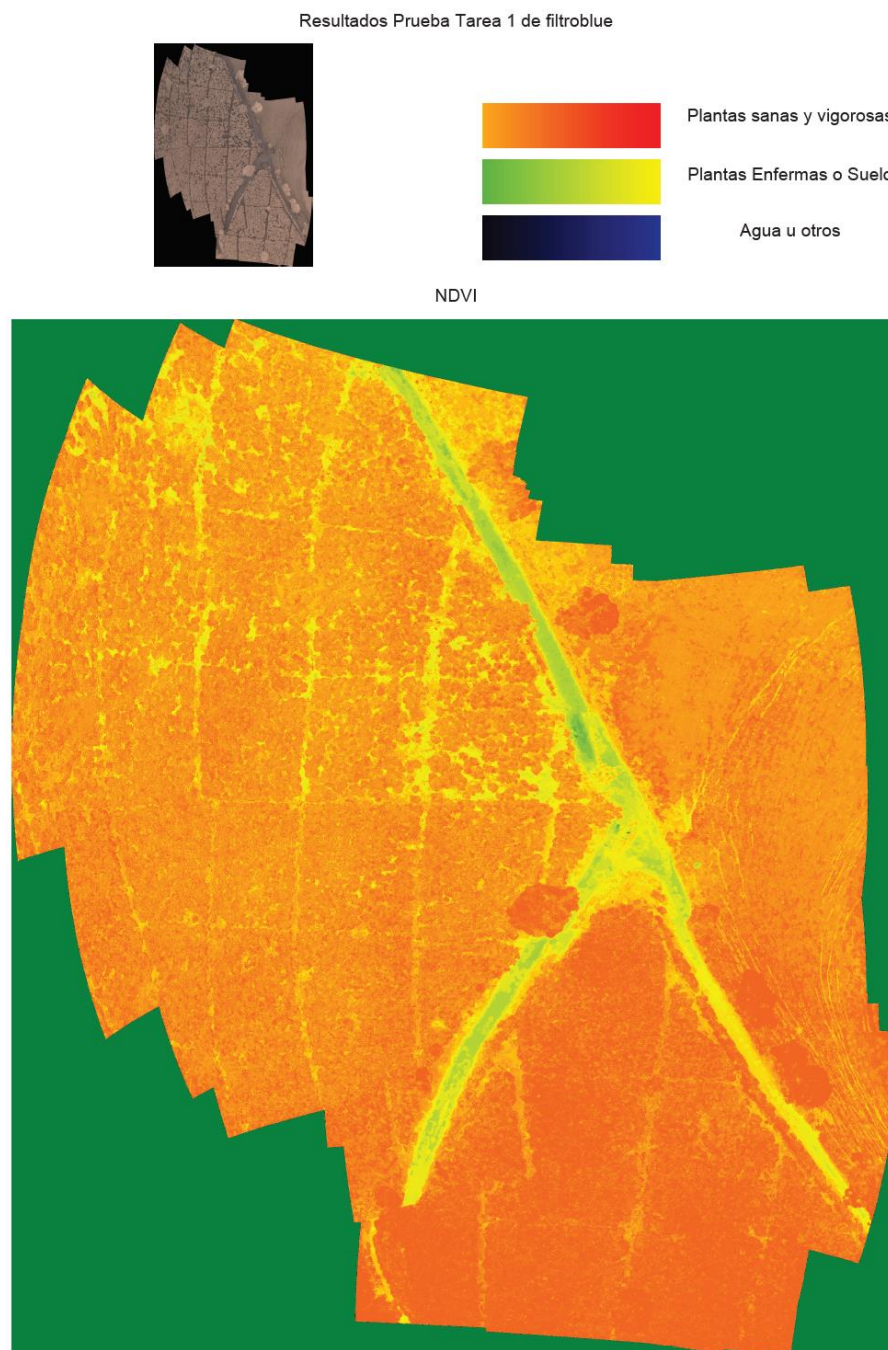


Figura 110 Resultados En PDF [Fuente propia].

De igual forma, finalizada la tarea, la aplicación móvil es capaz de mostrar un resultado preliminar del proceso en el momento que la información es cargada al servidor, esto se puede apreciar en la Figura 111

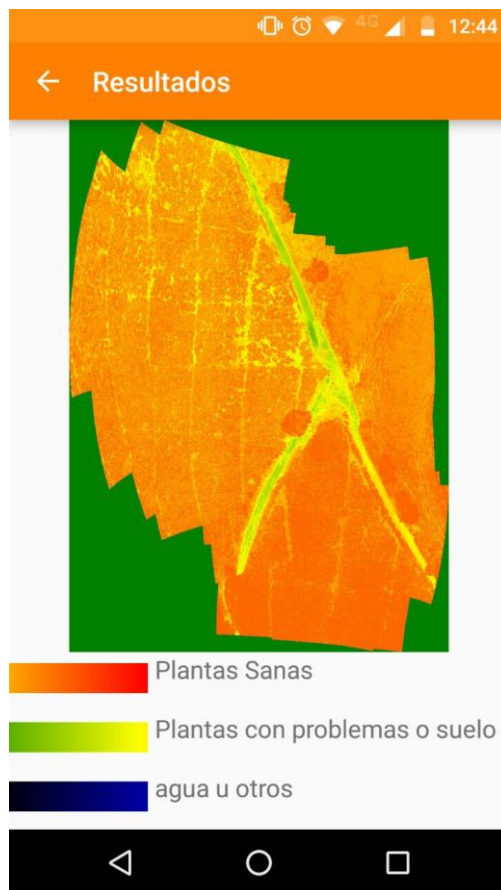


Figura 111 Resultados NDVI Aplicación móvil [Fuente propia].

Resultados filtro rojo AWB 1,1

En la Figura 112 se presentan los resultados generados en las tres pruebas correspondientes con la configuración del filtro rojo awb 1,1. Estas pruebas se corresponden respectivamente a los resultados de cada una de las imágenes capturadas en cada una de las tareas, cuando se termina el proceso, estos resultados son generados automáticamente como se mostró anteriormente. En las figuras 131 y 132 se presentan los resultados correspondientes a las pruebas con las otras configuraciones.

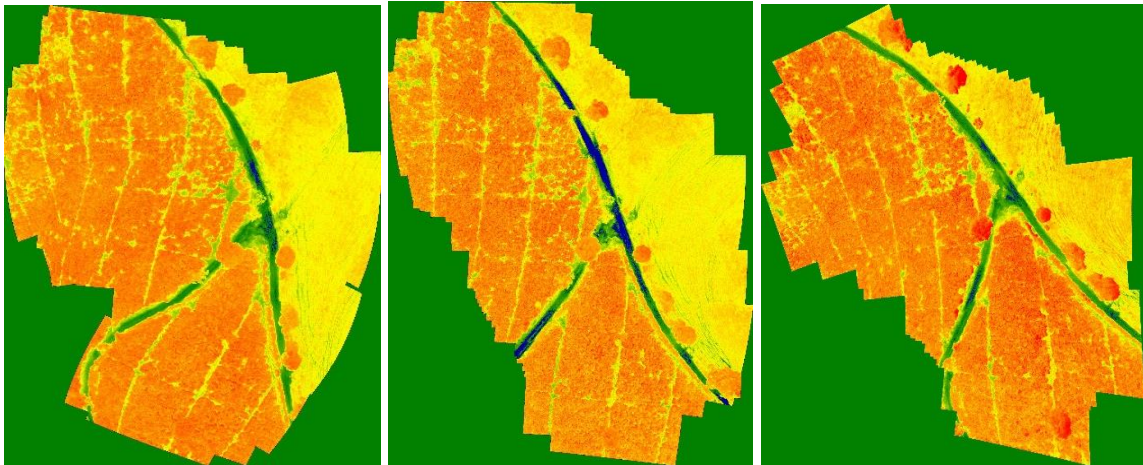


Figura 112 Resultados Filtro Rojo AWB 11 [Fuente propia].

Resultados filtro rojo AWB 0.54, 1

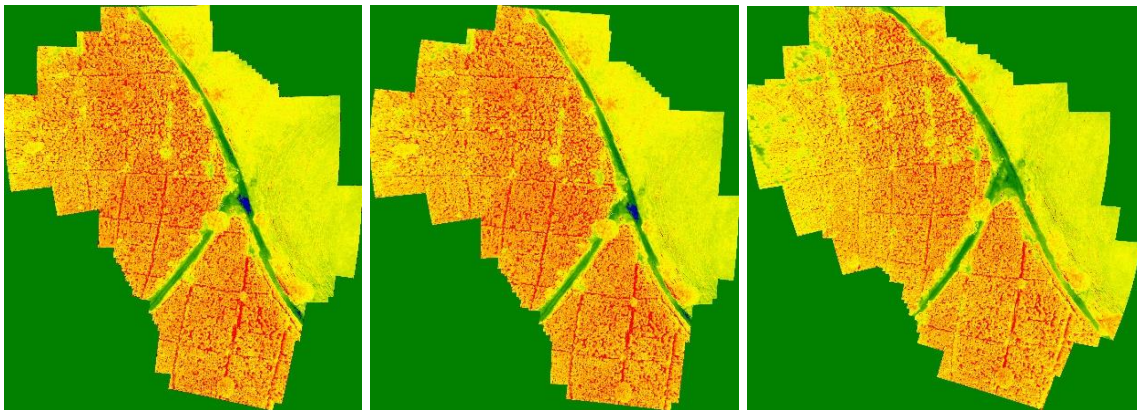


Figura 113 Resultados Filtro Rojo AWB 0.54,1 [Fuente propia].

Resultados filtro azul AWB 1,1

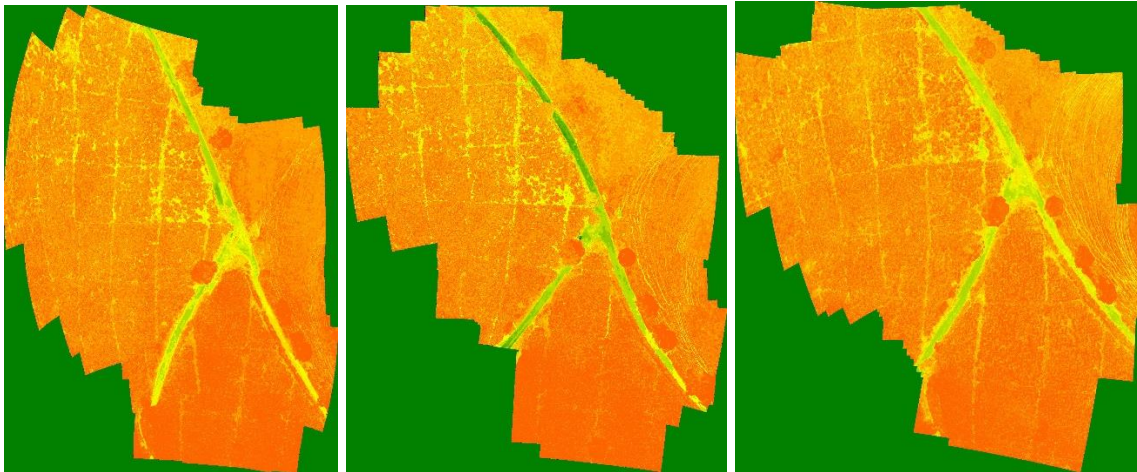


Figura 114 Resultados Filtro Azul AWB 11 [Fuente propia].

Luego de la recolección generación de resultado se procede al análisis de los mismos.

6.5.1. Análisis de resultados

Teniendo en cuenta que se tienen mapas NDVI de un mismo cultivo los cuales fueron tomados en diferentes tiempos, se realiza un análisis de variación y evolución con respecto al tiempo, también, como el NDVI representa una matriz de datos cuantitativos es posible llevar a cabo operaciones matemáticas aunque solo se considere su implementación en este trabajo de grado, para ello, se propone definir rangos de valores de NDVI los cuales servirán como umbrales para denotar la cantidad de valores con respecto al total que pertenecen a plantas sanas, a plantas con problemas o suelo y a valores que corresponden al agua u otros, esto permite definir y tener en cuenta el comportamiento de las configuraciones utilizadas con respecto al tiempo.

Debido a que las matrices NDVI generadas poseen un tamaño del orden de 60 a 70 millones de celdas o píxeles, esto generó sobrecarga en los cálculos de los umbrales de las imágenes, obligando a definir un método específico que permita realización del cálculo con los recursos computacionales existentes.

Como el lenguaje utilizado es Python, se encuentra en [88] que es posible realizar diferentes procesos al tiempo mediante hilos de ejecución, lo que conlleva a proponer la división de las matrices originales en 16 sub matrices, esto permite generar 16 hilos diferentes ayudando a mitigar el problema del tiempo de procesamiento de las matrices.

El algoritmo por el cual se obtienen los resultados se presenta en la Figura 115, es el encargado de la clasificación de los valores de la matriz NDVI, este recibe distintos valores entre -1 y 1, los compara y los clasifica. Como se mencionó anteriormente, se definen 16 hilos de procesamiento para realizar un balance de carga del proceso, generando 16 resultados por separado que serán sumados posteriormente para formar el reporte completo.

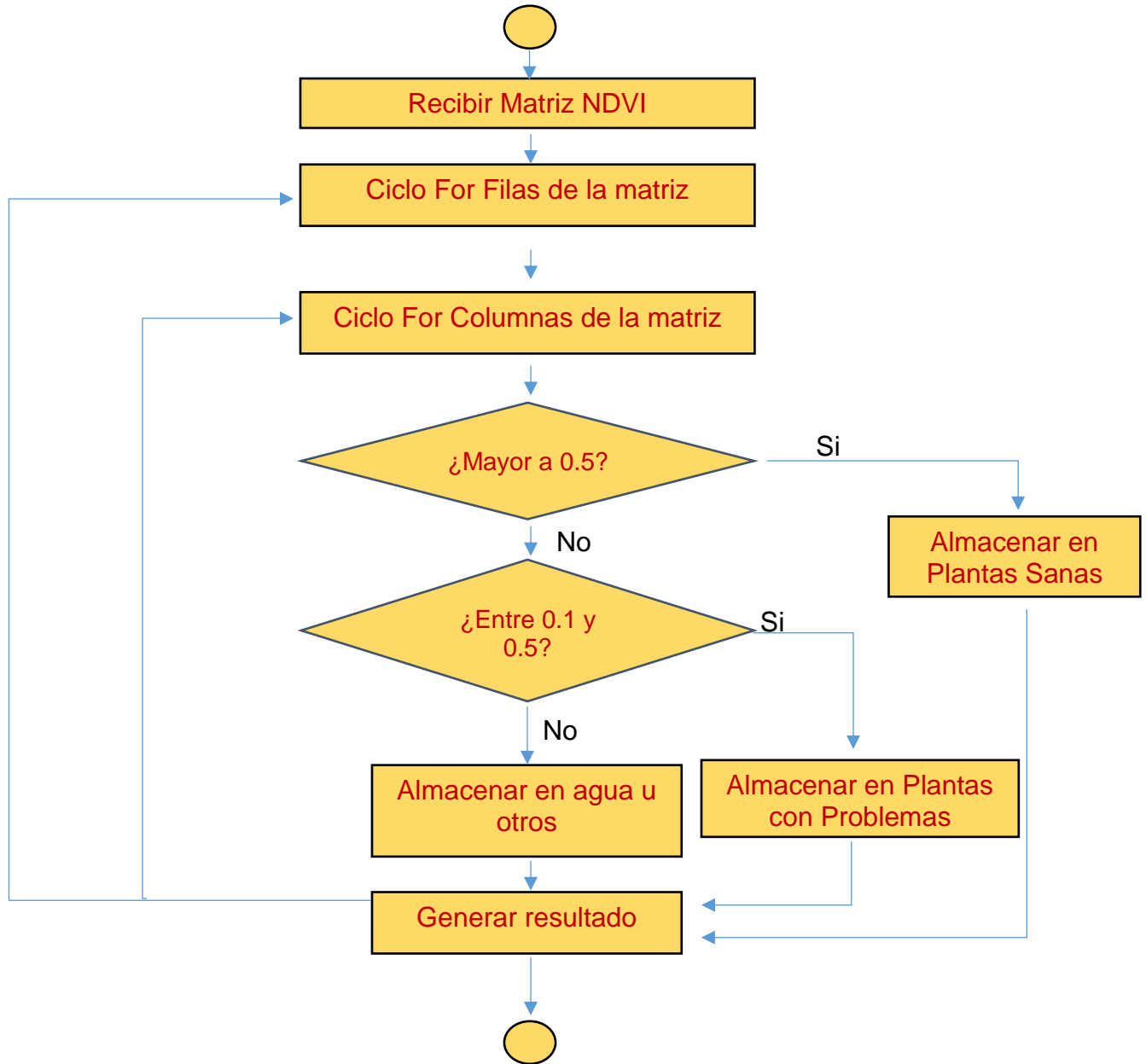


Figura 115 Diagrama de flujo Clasificar NDVI [Fuente propia].

Los resultados originados fueron resumidos en tablas 9, 10 y 11, estos corresponden a la suma de cada uno de los hilos de prueba, los resultados completos detallados de cada uno de los hilos se presentan en calidad de anexo F.

En las siguientes tablas, se presentan las estadísticas resumidas en cada una de las tareas realizadas teniendo en cuenta la configuración del filtro, en las tres, se tiene un cálculo para plantas sanas, plantas con problemas o suelo y agua u otros. Se tiene una fila que denota el **total** de píxeles analizados para la prueba y el **total** de píxeles original de la imagen.

Es importante aclarar que como fue necesario dividir la imagen en 16 secciones diferentes, cabe la posibilidad de que al momento de dividir la cantidad de píxeles totales sobre la unidad requerida exista pérdida de información, esto se ve reflejado en el cálculo de las dimensiones del mosaico original y el valor de la línea **total prueba**, aunque el valor es aproximado no llega a ser igual en ninguno de los casos.

Si existe diferencia entre los valores de Total y total prueba, esta se debe a que al momento de realizar la comparación de los niveles se decidió omitir los valores límite entre los intervalos, es decir, se omite todos los píxeles con valor 0.5 y 0.1 por ser los valores frontera entre las condiciones establecidas para el estado de las plantas. Es importante aclarar que el factor o valor denominado “Agua u otros”, que corresponde a los valores inferiores a 0.1, se ve afectado por las secciones **oscuras de la imagen**, las cuales equivalen a cero y que sí se tienen en cuenta en el cálculo. Las plantas con problemas o suelo se consideran en el rango de 0.1 a 0.5, y las plantas sanas se consideran a todos aquellos valores que superan 0.5.

Filtro rojo 11	tarea 1		tarea 2		tarea 3	
	Total	%	Total	%	Total	%
Plantas sanas	35518790	50,08	35185944	47,69	44526570	47,68
Plantas con problemas o suelo	13615191	19,20	14133325	19,16	9420010	10,09
Agua u otros	21791232	30,72	24457095	33,15	39439314	42,23
Total	70925213	100,0	73776364	100,0	93385894	100,00
Total Prueba	70999536		76121600		94342160	

Tabla 10 Resultados Pruebas Filtro rojo awb 11

Según las estadísticas de la Tabla 10, se puede entender que aunque existe variación en los valores de las tres pruebas, en las tres, los tres parámetros son

aproximados, las plantas sanas estuvieron alrededor del 50% con respecto al total, las plantas con problemas o suelo se mantienen alrededor del 15% y las plantas con problemas u otros alrededor del 35%. Un aspecto importante en esta prueba es que los valores de las filas **Total** y **Total Prueba**, en cada una de las tareas es aproximado, permitiendo concluir que pocos valores estuvieron cerca de los límites con respecto al total de píxeles analizados en **Total Prueba**. Una conclusión importante que se puede sacar de esta prueba es que según los resultados, las plantas sanas se mantuvieron constantes, permitiendo una compensación entre los valores de agua u otros y plantas con problemas o suelo.

Filtro rojo 0541	tarea 1		tarea 2		tarea 3	
	Total	%	Total	%	Total	%
Plantas sanas	12435271	51,09	16557882	30,51	20720728	35,13
Plantas con problemas o suelo	2412707	9,91	1840675	3,39	2536176	4,30
Agua u otros	9490265	38,99	35866248	66,09	35728564	60,57
Total	24338243	100,00	54264805	100,0	58985468	100,00
Total prueba	45952000		91251072		91609728	

Tabla 11 Resultados Pruebas Filtro rojo Awb 0541

En la Tabla 11 se puede notar que existen diferencias marcadas entre los resultados de las tareas con respecto al tiempo, esto podría deberse a la simple naturaleza de la configuración, pues teniendo en cuenta los resultados de la Figura 113, estos no se comportan de la forma esperada, pues en muchos puntos, la vegetación posee un NDVI menor al del suelo, situación que no se presenta en los resultados de las otras dos configuraciones, por tal motivo, podemos concluir a partir de aquí que esta prueba no es aconsejada o recomendable para realizar este tipo de análisis.

filtro azul	tarea 1		tarea 2		tarea 3	
	Total	%	Total	%	Total	%
Plantas sanas	27981069	54,53	27460136	46,81	26010323	53,69
Plantas con problemas o suelo	1228673	2,39	2266056	3,86	1311104	2,71
Agua u otros	22101541	43,07	28942734	49,33	21126269	43,61
Total	51311283	100,0	58668926	100,00	48447696	100,00
Total prueba	74757584		80842720		68020800	

Tabla 12 Resultados Pruebas Filtro azul Awb 11

En la Tabla 12 se puede encontrar estadísticas en las cuales el resultado es muy similar al de la Tabla 10 en lo relacionado al porcentaje de plantas sanas encontrado, teniendo como diferencia fundamental que el porcentaje de plantas con problemas o suelo calculado es un poco más elevado en la configuración Filtro rojo AWB 11, siendo ambas pruebas de un contraste similar si se analiza de forma visual los resultados de la Figura 112 y la Figura 114, con esto se puede concluir que es aconsejable y posible llevar a cabo la realización de pruebas con estas dos configuraciones.

De acuerdo con [47] se puede afirmar que los valores de NDVI encontrados para las plantas utilizando el método, están entre el rango permitido que generaría un NDVI mediante los métodos tradicionales de cámaras multiespectrales definidos anteriormente lo que aporta validez al trabajo desarrollado.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo presenta las conclusiones a las que se ha llegado mediante el desarrollo del presente trabajo de grado y del cumplimiento de sus objetivos general y específico. Posteriormente, se presentan los trabajos futuros caracterizados por ser oportunidades para mejorar o potencializar lo desarrollado en este trabajo de investigación.

7.1. Conclusiones

En esta sección se presentan las conclusiones del presente trabajo de grado. Estas se irán desarrollando en orden de importancia. Para construir estas conclusiones se realizó un análisis por cada capítulo recopilando las deducciones más importantes que surgieron en el desarrollo de los mismos.

1. Es posible, mediante una cámara comercial de bajo costo, obtener un NDVI confiable para determinar y monitorear la salud de las plantas en cualquier cultivo.
2. Se logró desarrollar un método confiable para la captura y procesamiento de fotografías que permita obtener resultados aceptables.
3. El método para el monitoreo de cultivos agrícolas propuesto, es conveniente desde el punto de vista económico puesto que las herramientas hardware y software de procesamiento utilizadas son de licencia libre.
4. Se puede realizar un monitoreo de cultivos agrícolas durante un rango de tiempo determinado mediante el método para el monitoreo de cultivos agrícolas propuesto, es necesario mantener las condiciones ambientales para que la variación de las mismas no afecte los resultados.
5. El método para la captura de fotografías propuesto en este trabajo de grado puede ser utilizado en forma general para cualquier plataforma aérea

siempre y cuando esta sea capaz de respetar los parámetros de velocidad y altura que se definan, esto con el fin de optimizar la captura y obtener resultados confiables, es importante tener en cuenta que este tipo de tecnología cuenta con un tiempo limitado para la realización de los procesos de captura.

6. El prototipo desarrollado tiene la capacidad de procesar la información cargada de forma automática, esto permite a un agricultor obtener resultados de forma ágil y segura, todo lo anterior de forma rápida e intuitiva. La única dificultad es que solo se tienen 3 configuraciones posibles con las cuales el sistema funciona, teniendo como base, que la configuración que brinda los mejores resultados en entornos reales es "Utilización de un filtro Rosco #19 con la configuración de balance de blancos AWB en 1,1".
7. Los resultados generados por el prototipo pueden ser interpretados gracias a que poseen ayudas para la lectura de los mismos, el mapa NDVI generado posee rangos de colores definidos para las plantas sanas, las plantas con problemas o suelo, y el agua u otros.

7.2. Trabajos Futuros

Teniendo en cuenta las oportunidades de investigación que se abren con el desarrollo de este proyecto de investigación, se proponen los siguientes trabajos futuros.

1. Implementación de un modo de captura de cámaras simultáneas utilizando Raspberry Pi RGB y NoIR, se debe implementar un modo de alineación en tiempo real de las dos cámaras.
2. Implementación de nuevos filtros y configuraciones que permitan calcular nuevos índices de vegetación que permitan obtener mayor información del cultivo.
3. A partir del método para realizar la configuración de la cámara, realizar pruebas con configuraciones diferentes a las tratadas en este trabajo de grado.
4. Mejoramiento del prototipo para que permita la selección automática de la configuración de la cámara dependiendo de las imágenes de entrada.
5. Implementación de un método de fusión de imágenes automático para que el sistema permita la carga masiva de fotografías y este se encargue de unirlos y procesarlos.

Bibliografía

- [1] B. Mundial, «Agricultura y desarrollo-rural,» 2016. [En línea]. Available: <http://datos.bancomundial.org/tema/agricultura-y-desarrollo-rural?locations=CO>. [Último acceso: 20 11 2016].
- [2] B. Mundial, «Indicadores de desarrollo del mundo,» 2015. [En línea]. Available: <http://wdi.worldbank.org/table/4.2>. [Último acceso: 10 07 2016].
- [3] Ahmad, A. Samad y A. Manan, «Aerial mapping using high resolution digital camera and unmanned aerial vehicle for Geographical Information System,» de *Signal Processing and Its Applications (CSPA), 2010 6th International Colloquium on*, 2010, pp. 2--6.
- [4] J. Bendig, K. Yu, H. Aasen, A. Bolten, S. Bennertz, J. Broscheit, M. Gnyp y G. Bareth, «Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley,» *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, pp. 79--87, 2015.
- [5] C. Gonzaga Aguilar, «Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador,» 2014.
- [6] B. Brisco, R. Brown, T. Hirose, H. McNairn y K. Staenz, «Precision agriculture and the role of remote sensing: a review,» *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 24, nº 3, pp. 315--327, 1998.
- [7] A. Comparetti, «Precision Agriculture: Past, Present and Future,» *Research Gate*, 2015.
- [8] Emiliano y F. Flego, « Agricultura de precisión García,» *Revista Ciencia y Tecnología*, 2008.
- [9] S. Liaghat y S. K. Balasundram, «A review: The role of remote sensing in precision agriculture,» *American journal of agricultural and biological sciences*, pp. 50--55, 2010.
- [10] A. Vibhute y S. K. Bodhe, «Applications of Image Processing in Agriculture:A Survey,» *International Journal of Computer Applications*, 2012.
- [11] V. Andreo, «Remote Sensing and Geographic Information Systems in Precision Farming,» 2013.
- [12] P. Gábrlík, «THE TECHNIQUES OF TERRAIN MAPPING AND MODELING,» The Faculty of Electrical Engineering, Czech Republic, 2014.
- [13] H. S. University, «Spectral Reflectance,» [En línea]. Available: http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/reflectance.html. [Último acceso: 15 01 2017].

- [14] U. o. Oldenburg, «Spectral Reflectance Properties,» [En línea]. Available: <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c01-p05.html>. [Último acceso: 4 12 2016].
- [15] J. Torres-Sánchez, F. López-Granados y J. Peña, «An automatic object-based method for optimal thresholding in UAV images: Application for vegetation detection in herbaceous crops,» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 43--52, 2015.
- [16] 2. LEDitGrow, «La Fotosíntesis,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.leditgrow.cl/fotosintesis/>. [Último acceso: 10 01 2017].
- [17] Pion, «Electromagnetic Spectrum,» [En línea]. Available: <http://www.pion.cz/en/article/electromagnetic-spectrum>. [Último acceso: 10 05 2017].
- [18] I. B. Froment, «Fotografías aéreas,» kumbaya, [En línea]. Available: <http://www.kumbaya.name/ci2412/GPS/mapas/4-2-Fotografias-aereas.pdf>. [Último acceso: 10 01 2017].
- [19] Abraham_Thomas, «AERIAL PHOTOGRAPHY,» University of the Western Cape University of the Western Cape, [En línea]. Available: http://www.cdioinstitute.org/papers/Day1/AERIAL%20PHOTOGRAPHY_Abr_aham_Thomas.pdf. [Último acceso: 10 1 2017].
- [20] L. Jauregui, «GEOMETRIA DE LA FOTOGRAFÍA AÉREA,» [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO2.pdf>. [Último acceso: 10 12 2016].
- [21] A. Diaz y M. A. Cisternas, «FOTOGRAFÍAS AÉREAS ASPECTOS TÉCNICOS,» [En línea]. Available: <https://wikigeomatica.wikispaces.com/file/view/fotosaereas.pdf>. [Último acceso: 10 12 2016].
- [22] U. G. Survey, «Types of aerial photographs,» [En línea]. Available: <https://www2.usgs.gov/faq/node/2623>. [Último acceso: 12 1 2017].
- [23] A. P. L. ABN, «MULTISPECTRAL IMAGERY & VEGETATION INDICES,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.aeroeye.com.au/industries/agriculture/multispectral-imagery-and-vegetation-indices/>. [Último acceso: 2 11 2016].
- [24] AerialPhotoLab, «Types Of Aerial Photography,» [En línea]. Available: http://www.aerialphotolab.com/types_of_aerial_photography.htm. [Último acceso: 10 1 2017].
- [25] F. Zubrinic, «Planeamiento de vuelo fotográfico para tomas de fotografías aéreas verticales,» [En línea]. Available: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p14.PDF>. [Último acceso: 12 1 2017].
- [26] R. Pi, «Raspberry Pi Raspistill,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/camera/raspicam/raspistill.md>. [Último acceso: 15 2 2016].

- [27] PublicLab, «Public Lab Multispectral Imaging,» [En línea]. Available: <https://publiclab.org/wiki/multispectral-imaging>. [Último acceso: 2 11 2015].
- [28] Anthony, D. Elbaum, S. Lorenz, A. Detweiler y Carrick, «On crop height estimation with UAVs,» *IEEE*, pp. 4805--4812, 2014.
- [29] L. C. Velasquez, J. Argueta y K. Mazariegos, «Implementation of a low cost aerial vehicle for crop analysis in emerging countries,» *IEEE Journal*, pp. 21-27, 2016.
- [30] D. I. Inc, «An Introduction to Unmanned Aerial Vehicles (UAVs),» 08 2008. [En línea]. Available: <http://www.draganfly.com/blog/introduction-to-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>. [Último acceso: 10 06 2016].
- [31] Kadamatt, «How quadcopters work & fly: An intro to multirotors,» 11 04 2017. [En línea]. Available: <http://www.droneybee.com/how-quadcopters-work/>. [Último acceso: 10 05 2017].
- [32] J. Reagan, «DJI Phantom vs AR Drone 2.0,» 30 09 2014. [En línea]. Available: <https://dronelife.com/2014/09/30/drone-duel-dji-phantom-vs-ar-drone-parrot/>. [Último acceso: 10 05 2017].
- [33] K. Anderson y K. J. Gaston, «Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology,» *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 11, n° 3, pp. 138--146, 2013.
- [34] jvaldezch, «Imágenes de satélite y su escala de producción (precisión vs escala),» 24 02 2012. [En línea]. Available: <https://jvaldezch.wordpress.com/2012/02/24/458/>. [Último acceso: 10 06 2016].
- [35] P. J. Zarco-Tejada, J. A. Berni, L. Suárez y E. Fereres, «A new era in remote sensing of crops with unmanned robots,» *SPIE Newsroom*, pp. 2-4, 2008.
- [36] C. A. Rokhmana, «The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia,» *Procedia Environmental Sciences*, pp. 245--253, 2015.
- [37] B. Ruzgiene, «Requirements for aerial photography,» *Geodezija ir Kartografija*, vol. 30, n° 3, pp. 75--79, 2004.
- [38] flex, «Cómo funciona el sensor de una cámara digital,» 2015. [En línea]. Available: <http://quecamarareflex.com/como-funciona-el-sensor-de-una-camara-digital/>. [Último acceso: 2 12 2016].
- [39] N. R. Rodrigo Andres, «FOTOGRAFIA AEREA,» 2005. [En línea]. Available: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcin415f/doc/bmfcin415f.pdf>. [Último acceso: 01 10 2016].
- [40] Pix4D, «Flight Planning,» 15 12 2015. [En línea]. Available: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type#gsc.tab=0>. [Último acceso: 25 05 2016].

- [41] G. d. Canadá, «Concepts of Aerial Photography,» 01 09 2016. [En línea]. Available: <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/air-photos/about-aerial-photography/9687>. [Último acceso: 11 10 2016].
- [42] D. Globe, «Litchi Mission Hub,» 2017. [En línea]. Available: <https://flylitchi.com/hub>. [Último acceso: 20 1 2017].
- [43] D. P. D. A. D. R. NEGRO, «NDVI,» Área de planificación y evaluación de los recursos hídricos , Rio Negro Argentina, 2014.
- [44] ArcGis, «Función NDVI,» 2016. [En línea]. Available: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>. [Último acceso: 20 01 2017].
- [45] U. d. Piura, «Biblioteca Universidad de Piura,» [En línea]. Available: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_59_185_24_508.pdf. [Último acceso: 10 06 2016].
- [46] B. Ortiz, J. Shaw y J. Fulton, «Basics of crop sensing,» *Alabama Cooperative extension system*, pp. 1-3, 2011.
- [47] A. A. Gitelson, Y. Gritz y M. N. Merzlyak, «Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves,» *Journal of plant physiology*, vol. 160, n° 3, pp. 271--282, 2003.
- [48] D. M. Gates, H. J. Keegan, J. C. Schleter y V. R. Weidner, «Spectral properties of plants,» *Applied optics*, vol. 4, n° 1, pp. 11--20, 1965.
- [49] J. W. Herring y David, «Measuring Vegetation ENVI and NDVI,» 30 08 2000. [En línea]. Available: <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>. [Último acceso: 5 04 2016].
- [50] C. Lu, «A New Interpretation of Natural Beauty and Sexual Selection,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.thegreatdebate.org.uk/ESexualSeln.html>.
- [51] A. El Gamal y H. Eltoukhy, «CMOS image sensors,» *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 21, n° 3, pp. 6--20, 2005.
- [52] G. McDowell, «how does a digital camera,» 09 10 2009. [En línea]. Available: <http://www.makeuseof.com/tag/technology-explained-how-does-a-digital-camera-work/>. [Último acceso: 10 1 2017].
- [53] Opencv, «Getting Started with Images,» OpenCV, 10 11 2014. [En línea]. Available: http://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_gui/py_image_display/py_image_display.html. [Último acceso: 05 06 2016].
- [54] E. R. Fossum, «CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip,» *IEEE transactions on electron devices*, vol. 44, n° 10, pp. 1689--1698, 1997.
- [55] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest y J. Salvi, «Review of CMOS image sensors,» *Microelectronics journal*, vol. 37, n° 5, pp. 433--451, 2006.

- [56] V. Dworak, J. Selbeck, K.-H. Dammer, M. Hoffmann, A. A. Zarezadeh y C. Bobda, «Strategy for the development of a smart NDVI camera system for outdoor plant detection and agricultural embedded systems,» *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. 13, nº 2, pp. 1523--1538, 2013.
- [57] B. José, M. Nicolás, C. Danilo y A. Eduardo, «Multispectral NDVI aerial image system for vegetation analysis by using a consumer camera,» *Electronics and Computing (ROPEC), 2014 IEEE International Autumn Meeting on power*, pp. 1--6, 2014.
- [58] M. Ghazal, Y. Al Khalil y H. Hajjdiab, «UAV-based remote sensing for vegetation cover estimation using NDVI imagery and level sets method,» *2015 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, pp. 332--337, 2015.
- [59] L. U. D. o. Communications, «WHAT'S THAT BLUE THING DOING HERE?,» Raspberry Pi Foundation, 23 10 2013. [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/blog/whats-that-blue-thing-doing-here/>. [Último acceso: 3 12 2015].
- [60] Rosco, «Roscolux Filters,» [En línea]. Available: <http://us.rosco.com/en/products/catalog/roscolux>. [Último acceso: 20 11 2015].
- [61] P. Lab, «Infragram,» 08 2013. [En línea]. Available: <https://infragram.org/>. [Último acceso: 3 12 2015].
- [62] V. Lan, «VLC Media Player,» [En línea]. Available: <http://www.videolan.org/vlc/index.es.html>. [Último acceso: 20 2 2017].
- [63] L. Zhang, X. Sun, T. Wu y H. Zhang, «An Analysis of Shadow Effects on Spectral Vegetation Indexes Using a Ground-Based Imaging Spectrometer,» *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, nº 11, pp. 2188--2192, 2015.
- [64] Z. a. H. A. R. Jiang, J. Chen, Y. Chen, J. Li, G. Yan y X. Zhang, «Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction,» *Remote sensing of environment*, vol. 101, nº 3, pp. 366--378, 2006.
- [65] P. Lab, «Comments and questions on NDVI,» 08 02 2014. [En línea]. Available: <https://publiclab.org/notes/radialmind/02-08-2014/comments-and-questions-on-ndvi>. [Último acceso: 10 11 2016].
- [66] P. L. CFastie, «Multigrain NDVI,» 23 05 2013. [En línea]. Available: <https://publiclab.org/notes/cfastie/05-23-2013/multigrain-ndvi>. [Último acceso: 11 10 2016].
- [67] OpenCV, «OpenCV Image Matching,» [En línea]. Available: http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/histograms/template_matching/template_matching.html. [Último acceso: 20 1 2017].
- [68] Matplotlib, «Matplotlib Color Map,» 20 02 2012. [En línea]. Available: http://matplotlib.org/examples/color/colormaps_reference.html. [Último acceso: 5 10 2016].

- [69] C. E. Serrano, *Modelo integral para el profesional de ingeniería*, Popayán: Universidad del Cauca, 2009.
- [70] P. Kruchten, «Architectural blueprints—The “4+ 1” view model of software architecture,» *Tutorial Proceedings of Tri-Ada*, vol. 95, pp. 540--555, 1995.
- [71] IBM, «Unified Modeling Language (UML),» [En línea]. Available: <https://www-01.ibm.com/software/rational/uml/products/>. [Último acceso: 10 06 2017].
- [72] «Ingeniería de Requerimientos,» [En línea]. Available: <http://proy-pnfi.forosactivos.net/t3-foro-trimestre-ii-modelo-arquitectural>. [Último acceso: 10 12 2016].
- [73] Google, «Material Design for Android,» [En línea]. Available: <https://developer.android.com/design/material/index.html>. [Último acceso: 20 02 2017].
- [74] W3C, «Guía Breve de Tecnologías XML,» [En línea]. Available: <http://www.w3c.es/Divulgacion/GuiasBreves/TecnologiasXML>. [Último acceso: 10 03 2017].
- [75] A. Developer, «Android,» [En línea]. Available: <https://developer.android.com/develop/index.html>. [Último acceso: 1 05 2016].
- [76] A. Development, «Azure Development SQL Data Base,» [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/sql-database/>. [Último acceso: 1 06 2016].
- [77] Oracle, «JEE Documentation,» 2015. [En línea]. Available: <http://docs.oracle.com/javaee/7/index.html>. [Último acceso: 1 09 2016].
- [78] Primefaces, «Primefaces ShowCase,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.primefaces.org/showcase/>. [Último acceso: 12 09 2016].
- [79] Microsoft, «SQL Server Technical Documentation,» [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/sql/sql-server/sql-server-technical-documentation>. [Último acceso: 10 11 2016].
- [80] Microsoft, «Create a Linux virtual machine with the Azure portal,» 2 05 2017. [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/virtual-machines/linux/quick-create-portal>. [Último acceso: 16 06 2017].
- [81] Git, «Installation on Linux,» [En línea]. Available: <https://git-scm.com/download/linux>. [Último acceso: 2 05 2016].
- [82] TightVNC, «TightVNC Software,» [En línea]. Available: <http://www.tightvnc.com/>. [Último acceso: 1 10 2016].
- [83] Microsoft, «How to open ports to a virtual machine with the Azure portal,» 11 05 2017. [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/virtual-machines/windows/nsg-quickstart-portal>. [Último acceso: 16 06 2017].
- [84] IEEE, *Presentación ISO/IEC/IEEE 29119*, MADRID: GRUPO DE TRABAJO AENOR, 2014.
- [85] IEEE, *ISO/IEC/IEEE 29119-3*, New York: ISO - IEC - IEEE, 2013.

- [86] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@2.3512629,-76.6915093,2767m/data=!3m1!1e3?hl=es-419>. [Último acceso: 17 04 2017].
- [87] M. Research, «Image Composite Editor,» 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.microsoft.com/en-us/research/product/computational-photography-applications/image-composite-editor/>. [Último acceso: 20 01 2016].
- [88] P. Tutorials, «Multithreading Python,» [En línea]. Available: https://www.tutorialspoint.com/python/python_multithreading.htm. [Último acceso: 20 05 2017].
- [89] W. Wei, Y. Xia, Y.-c. TIAN, X.-j. LIU, N. Jun, W.-x. CAO y Z. Yan, «Common spectral bands and optimum vegetation indices for monitoring leaf nitrogen accumulation in rice and wheat,» *Journal of Integrative Agriculture*, pp. 2001-2012, 2012.
- [90] J. Torres-Sánchez, J. Peña, A. De Castro y F. López-Granados, «Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV,» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 104--113, 2014.
- [91] J. V. Stafford, «Implementing precision agriculture in the 21st century,» *Journal of Agricultural Engineering Research*, pp. 267--275, 2000.
- [92] N. Otsu, «A threshold selection method from gray-level histograms,» *IEEE Trans*, p. 62--66, 1979.
- [93] T. Murakami, M. Yui y K. Amaha, «Canopy height measurement by photogrammetric analysis of aerial images: Application to buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) lodging evaluation,» *Computers and electronics in agriculture*, pp. 70--75, 2012.
- [94] W. Li, Z. Niu, H. Chen, D. Li, M. Wu y W. Zhao, «Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system,» *Ecological Indicators*, pp. 637--648, 2016.
- [95] M. Kelly, «Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images,» *PLOS One*, 2010.
- [96] W. Kazmi, F. J. Garcia-Ruiz, J. Nielsen, J. Rasmussen y H. J. Andersen, «Detecting creeping thistle in sugar beet fields using vegetation indices,» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 10--19, 2015.
- [97] M. Kahani, «Engineering Research Methodology,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.slideserve.com/donnan/engineering-research-methodology>. [Último acceso: 10 04 2015].
- [98] ISO, *ISO 9241-210*, 2010.
- [99] E. R. Hunt, C. S. Daughtry, S. B. Mirsky y W. D. Hively, «Remote sensing with simulated unmanned aircraft imagery for precision agriculture applications,»

electd Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, pp. 4566--4571, 2014.

- [100] M. Guijarro, G. Pajares, I. Riomoros, P. Herrera, X. Burgos-Artizzu y A. Ribeiro, «Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images,» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 75--83, 2011.
- [101] A. Gitelson, Y. Kaufman, R. Stark y D. Rundquist, «Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction,» *Remote sensing of Environment*, pp. 76--87, 2002.