

ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE CLOROFILA DIRECTOS E INDIRECTOS EN CULTIVOS DE CAFÉ

Jhon Álvaro Muñoz Reyes
Kevin Stiff Vivas Fernández

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN
2024

ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LOS MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DE CLOROFILA DIRECTOS E INDIRECTOS EN CULTIVOS DE CAFÉ

Jhon Álvaro Muñoz Reyes
Kevin Sthiff Vivas Fernández

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO

DIRECTOR:
M. Sc. Saúl Eduardo Ruiz Sarzosa
CODIRECTOR:
M. Sc. Andrés Felipe Solís Pino

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA
POPAYÁN
2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL DIRECTOR OPCIÓN DE GRADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACIÓN	17
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2 CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA	20
2.1 MARCO TEÓRICO.....	20
2.1.1 Agricultura de precisión	20
2.1.2 Aplicaciones Específicas en Agricultura Precisión [23].....	21
2.1.3 Drones o Aeronaves	23
2.1.4 Índices normalizados de vegetación.....	27
2.1.5 Plataforma de UAS/ RPAS - Ala Rotatoria (Fixed Wing Aircraft) .	28
2.1.6 Plataforma de UAS / RPAS – Ala fija.....	28
2.1.7 Aplicaciones de los UAS/RPAS [45]	29
2.1.8 Aeronaves no tripuladas RPAS / UAS	30
2.2 ANTECEDENTES	32
3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	35
3.1 ÁREA DE ESTUDIO O DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL LUGAR DE ESTUDIO.....	35
3.2 SELECCIÓN DEL CULTIVO	36
3.3 MATERIALES PARA DESARROLLAR EL PROYECTO	37
3.3.1 CÁMARA MICASENSE REDEGE-M	37
3.3.2 CÁMARA MICASENSE REDEGE-MX BLUE.....	40
3.3.3 DRONE DJI PHANTOM 4.....	43
3.3.4 CLOROFILÓMETRO TYS-A.....	44
3.3.5 ESPECTROFOTÓMETRO GENESYS™ 20	45
3.3.6 INSTRUMENTOS INFORMÁTICOS.....	46

3.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE ACOPLE PARA LOS SENSORES MULTIESPECTRALES AL VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO	48
3.5	ENSAMBLE DEL SISTEMA DE ADAPTACIÓN PARA LAS CÁMARAS MULTIESPECTRALES	53
3.6	TOMA DE DATOS MEDIANTE TÉCNICA INDIRECTA	57
3.6.1	DISEÑO DEL PLAN DE VUELO.....	57
3.7	TOMA DE DATOS MEDIANTE TÉCNICAS DIRECTAS	66
3.7.1	MUESTREO MEDIANTE CLOROFILOMETRO	66
3.7.2	MUESTREO MEDIANTE LABORATORIO	67
3.8	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	68
4	CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE CLOROFILA PARA DETERMINAR LAS CORRELACIONES ENTRE LAS TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN.....	73
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	76
	ÍNDICES DIARIOS	77
	ÍNDICES GENERALES.....	84
4.4	AMENAZAS DE VALIDEZ.....	89
	CONCLUSIONES	90
	TRABAJOS FUTUROS.....	92
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXOS.....	100
	ANEXO 1: GRAFICAS DE CORRELACIÓN DESDE 09 DE MARZO HASTA 28 DE MARZO.....	100
	ANEXO 2: CONFIGURACIÓN DE APLICACIÓN DJ GS PRO	106
	ANEXO 3: CALIBRACIÓN DRONE PHANTOM 4	114
	Figura 1 Plan de vuelo. Fuente [29].	24
	Figura 2 Solapamiento de imágenes. Fuente [34].	26
	Figura 3 Finca la Fortaleza. Fuente autor.	35
	Figura 4 Kit cámara Micasense RedEdge-M. Fuente autor.	38
	Figura 5 Sensor de luz descendente (DLS) de la cámara Micasense RedEdge-M. Fuente autor.....	38
	Figura 6 Modulo GPS de la cámara MicaSense RedEdge-M. Fuente autor.....	39
	Figura 7 Panel de reflectancia calibrada CRP modelo RP04 de la cámara MicaSense RedEdge-M. Fuente autor.	40
	Figura 8 Cámara multiespectral Micasense RedEdge-Mx Blue. Fuente autor.....	40
	Figura 9 Sensor de luz descendente (DLS 2). Fuente autor.....	42

Figura 10 Panel de reflectancia calibrada CRP modelo RP06 de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue. Fuente autor.	43
Figura 11 Drone Phantom 4. Fuente autor.	44
Figura 12 Clorofilometro TYS A. Fuente autor.	44
Figura 13 Espectrofotómetro GENESYS™ 20. Fuente autor.	45
Figura 14 Conexión sistema Micasense RedEdge M. Fuente [81].	48
Figura 15 Conexión sistema Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.	49
Figura 16 Montaje del circuito de alimentación con el sistema Micasense M. Fuente [82].	49
Figura 17 Montaje del circuito de alimentación con el sistema Micasense Mx Blue. Fuente autor.	49
Figura 18 Diseño extensión sistema de aterrizaje para drone Phantom 4. Fuente autor.	50
Figura 19 Extensión sistema de aterrizaje para drone Phantom 4. Fuente autor.	50
Figura 20 Diseño soporte cámara multispectral. Fuente autor.	51
Figura 21 Soporte cámara multispectral. Fuente autor.	51
Figura 22 Diseño soporte sensor DLS y módulo GPS. Fuente [86].	52
Figura 23 Diseño soporte sensor DLS 2. Fuente autor.	52
Figura 24 Soporte sensor DLS y módulo GPS. Fuente [87]	52
Figura 25 Soporte sensor DLS 2. Fuente autor.	53
Figura 26 Soporte DLS 2, módulo LM2596 y batería lipo 9.9v. Fuente autor.	53
Figura 27 Instalación sistema de aterrizaje. Fuente autor.	54
Figura 28 Ensamble cámara Micasense RedEdge Mx Blue a la base de sujeción. Fuente autor.	54
Figura 29 Ensamble cámara Micasense RedEdge M a la base de sujeción. Fuente [88].	54
Figura 30 Instalación cámara Micasense Red Edge Mx Blue al dron. Fuente autor.	55
Figura 31 Instalación cámara Micasense Red Edge M al dron. Fuente [89].	55
Figura 32 Instalación del circuito de alimentación externa. Fuente autor.	56
Figura 33 Instalación circuito de alimentación para cámara Micasense RedEdge Mx Blue al drone. Fuente autor.	56
Figura 34 Ensamble completo de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue al drone. Fuente autor.	56
Figura 35 Instalación circuito de alimentación para cámara Micasense RedEdge M al drone. Fuente [90].	56
Figura 36 Ensamble completo para la cámara Micasense RedEdge M al drone. Fuente [91].	56
Figura 37 Zona de vuelo. Fuente autor.	57
Figura 38 Ubicación georreferenciada de árboles estudiados. Fuente autor.	61
Figura 39 Página Home Micasense Camera App. Fuente [95].	63
Figura 40 Captura del panel de reflectancia. Fuente [96].	63
Figura 41 Configuración cámara Micasense. Fuente: autor.	64
Figura 42 Ventana de verificación estado drone.. Fuente autor.	65

Figura 43 Evidencia de vuelo ejecutado. Fuente autor.	Figura 44 Evidencia de vuelo ejecutado. Fuente autor.	65
Figura 45 Ubicación georreferenciada de árboles a muestrear. Fuente autor.		66
Figura 46 Pix4D Fields. Fuente autor.		68
Figura 47 Interfaz principal Pix4D. Fuente autor.		69
Figura 48 Cargar imágenes. Fuente autor.		69
Figura 49 Opciones de procesamiento. Fuente autor.		70
Figura 50 Interfaz de trabajo Pix4D. Fuente autor.		71
Figura 51 Generador de Índice Fuente autor.	Figura 52 Índice personalizado. Fuente autor.	71
Figura 53 Exportar Pix4D. Fuente autor.		72
Figura 54 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 07/03/2023. Fuente autor.		81
Figura 55 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 07/03/2023. Fuente autor.		81
Figura 56 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 16/03/2023. Fuente autor.		82
Figura 57 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 16/03/2023. Fuente autor.		82
Figura 58 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 30/03/2023. Fuente autor.		83
Figura 59 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 30/03/2023. Fuente autor.		83
Figura 60 Correlación global de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.		85
Figura 61 Correlación global de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.		86
Figura 62 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 09/03/2023. Fuente autor.		100
Figura 63 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 09/03/2023. Fuente autor.		101
Figura 64 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 14/03/2023. Fuente autor.		101
Figura 65 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 14/03/2023. Fuente autor.		102
Figura 66 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 21/03/2023. Fuente autor.		102
Figura 67 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 21/03/2023. Fuente autor.		103
Figura 68 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 23/03/2023. Fuente autor.		103
Figura 69 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 23/03/2023. Fuente autor.		104

Figura 70 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 28/03/2023. Fuente autor.....	104
Figura 71 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 28/03/2023. Fuente autor.....	105
Figura 72 Aplicación DJI GS Pro. Fuente autor.	106
Figura 73 Selección icono de signo más. Fuente autor.	106
Figura 74 Icono PhotoMap. Fuente autor.	107
Figura 75 Icono Tap. Fuente autor.....	108
Figura 76 Configuración de Cámaras. Fuente autor.	109
Figura 77 Camera Model. Fuente autor.	110
Figura 78 Thrid Party Camera. Fuente autor.....	110
Figura 79 Add Camera. Fuente autor.	110
Figura 80 Ventana Basic M. Fuente autor.	111
Figura 81 Ventana Basic Mx Blue. Fuente autor.	111
Figura 82 Ventana Advanced Mx Blue. Fuente autor.	112
Figura 83 Ventana Advanced M. Fuente autor.....	112
Figura 84 Misión completa Micasense Mx Blue. Fuente autor.....	113
Figura 85 Misión completa Micasense M. Fuente autor.....	113
Figura 86 Aplicación DJI GO 4. Fuente autor.	114
Figura 87 Calibración IMU. Fuente autor.	115
Figura 88 Calibración IMU. Fuente autor.	116
Figura 89 Notificación calibración IMU. Fuente autor.	116
Figura 90 Pasos calibración brújula drone phantom 4. Fuente autor.....	117
Figura 91 Listo para despegar. Fuente autor.....	117
Tabla 1 Comparación dispositivos UAV. Fuente [27].	23
Tabla 2 Características a considerar en un plan de vuelo. Fuente [31].	25
Tabla 3 Características de la cámara Micasense RedEdge-M. Fuente [61].	37
Tabla 4 Características de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue. Fuente [65].	41
Tabla 5 Especificaciones Clorofilometro TYS A. Fuente [70].	45
Tabla 6 Especificaciones Espectrofotómetro GENESYS™ 20. Fuente [72].	46
Tabla 7 Coordenadas árboles. Fuente autor	61
Tabla 8 Parámetros definitivos de vuelo. Fuente autor.....	62
Tabla 9 Tabla de normalidad cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.	73
Tabla 10 Tabla de normalidad cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.	74
Tabla 11 Datos obtenidos mediante técnica indirecta con la cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.....	78
Tabla 12 Datos obtenidos mediante técnica indirecta con la cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.....	78
Tabla 13 Datos obtenidos mediante técnicas directas (Clorofilometro y Procesamiento de laboratorio). Fuente autor.....	79

RESUMEN

La investigación se enfocó en la visión artificial de fotografía aérea aplicada a la industria del café, utilizando algoritmos computacionales para la reconstrucción de cartografía por ortomosaicos. Para lograrlo, se toman muestras a través de cartografía aérea, toma de datos en campo y procesamiento de muestras en laboratorio de los plantíos de café de una unidad productiva.

Por lo anterior, se implementaron tres técnicas, una indirecta y dos directas; la primera hace referencia al uso de cámaras especiales incorporadas en los RPAS /UAS para la toma de imágenes multiespectrales de cultivos de café a partir de cartografía aérea en una unidad productiva dentro de un Cultivo de Café la cual se encuentra ubicada en la finca “La Fortaleza” en la vereda la Figueroa, municipio de Popayán, Cauca, Colombia. Por lo cual se implementó mediante el diseño mecatrónico un sistema de acople para dos cámaras multiespectrales a un drone Phantom 4.

En términos generales, los resultados de este estudio indicaron la adecuada adaptación del drone Phantom 4 y las cámaras multiespectrales Micasense RedEdge M y Mx Blue mediante el diseño mecatrónico. Se logró recopilar información de campo y laboratorio utilizando tanto técnicas directas como indirectas para cuantificar la clorofila. En este proceso, se identificaron correlaciones satisfactorias entre los 18 índices de vegetación propuestos para la cámara Micasense RedEdge M. Sin embargo, para la cámara Micasense RedEdge Mx Blue, las correlaciones satisfactorias variaron.

En cuanto a las correlaciones entre las técnicas directas e indirectas, se observaron correlaciones fuertes tanto positivas como negativas para cada cámara multiespectral, con valores que oscilan entre -0.77 y 1.0. Destaca la mayor cantidad de correlaciones positivas, acercándose al valor 1.0. Estos resultados resaltan la importancia de emplear diversas técnicas para analizar la vegetación y evaluar su estado de salud de manera integral.

Estos índices proveen información valiosa que contribuye al logro de los objetivos propuestos, el análisis estadístico de los datos permite evaluar el progreso y desarrollo de las plantas, así como comprender mejor las dinámicas ambientales y el desarrollo sostenible. Estos hallazgos son fundamentales para la gestión y la formulación de políticas públicas en términos de impacto ambiental y sostenibilidad.

ABSTRACT

The research focused on the artificial vision of aerial photography applied to the coffee industry, using computational algorithms for the reconstruction of orthomosaic mapping. To achieve this, samples are taken through aerial mapping, field data collection and sample processing in the laboratory of the coffee plantations of a productive unit.

Therefore, three techniques were implemented, one indirect and two direct; the first one refers to the use of special cameras incorporated in the RPAS / UAS to take multispectral images of coffee crops from aerial mapping in a production unit within a coffee crop which is located in the farm "La Fortaleza" in the village of La Figueroa, municipality of Popayán, Cauca, Colombia. Therefore, a mechatronic design was implemented by means of a coupling system for two multispectral cameras to a Phantom 4 drone.

Overall, the results of this study indicated that the Phantom 4 drone and the Micasense RedEdge M and Mx Blue multispectral cameras were well adapted through mechatronic design. Field and laboratory data were collected using both direct and indirect techniques to quantify chlorophyll. In this process, satisfactory correlations were identified between the 18 vegetation indices proposed for the Micasense RedEdge M. However, for the Micasense RedEdge Mx Blue camera, satisfactory correlations varied.

Regarding correlations between direct and indirect techniques, strong positive and negative correlations were observed for each multispectral camera, with values ranging from -0.77 to 1.0. The highest number of positive correlations, approaching the 1.0 value, stands out. These results highlight the importance of employing diverse techniques to analyze vegetation and assess its health in a comprehensive manner.

These indices provide valuable information that contributes to the achievement of the proposed objectives. Statistical analysis of the data allows us to evaluate the progress and development of the plants, as well as to better understand environmental dynamics and sustainable development. These findings are fundamental for the management and formulation of public policies in terms of environmental impact and sustainability.

1 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los cultivos más importantes del mundo; genera unos ingresos de más de 15.000 millones de dólares y es fuente de empleo directo e indirecto para más de 20 millones de personas. Específicamente, en Colombia, el café es el producto estrella de exportación; sin embargo, se han presentado algunos problemas en cuanto al rendimiento de su producción; según la Federación Nacional de Cafeteros, se ha presentado una disminución en la producción de este fruto en los últimos años, causada por la persistencia de un clima desfavorable. Además de lo anterior, existen otras causas como la renovación del cultivo, la baja densidad de siembra y la falta de apoyo de las entidades estatales en cuanto a ayuda técnica [1].

Específicamente, en el departamento del Cauca, la producción de café es bastante rudimentaria en comparación con otras zonas geográficas; esto se debe a que, además de las causas climáticas mencionadas, se puede decir que la baja productividad también se debe a la falta de capacitación, apoyo para la correcta implementación de tecnologías y metodologías de producción y monitoreo basadas en la fenología y evidencia de estrés en las plantas. Esto permite identificar la falta de competencias técnicas del agricultor y de herramientas agronómicas y de extensión para el manejo de los cultivos especiales de café y la escasa innovación tecnológica en su manejo [2].

En esta línea, las tecnologías aplicadas a la producción de café podrían ser una excelente alternativa para mejorar la producción en el departamento, logrando así una mejor capitalización de la producción y consecuentemente mejorando los márgenes de ganancia de las cosechas. Algunas tecnologías que se han aplicado a la producción de café en el Cauca son las imágenes multiespectrales, la ingeniería genética y la biotecnología aplicada a la productividad [3]. Específicamente, un estudio realizado por Cenicafé menciona que hay algunas actividades dentro de la producción del fruto que se realizan de manera manual, lo que perjudica la cadena de producción y la rapidez con la que se realiza; por lo tanto, se proponen algunas alternativas, como una aspiradora de espalda portátil que es viable técnica y económicamente en la producción cafetera colombiana [4]. Otro estudio muestra que la acidez del suelo es el principal factor que afecta la disponibilidad de nutrientes, por lo que se debe adaptar su manejo de acuerdo con la mineralogía del suelo. Por ello, en [5] se propone un dispositivo que mide esta variable, permitiendo estimar la producción del cultivo a una escala óptima. Otra tecnología que ha impactado positivamente en la caficultura caucana es la de imágenes multiespectrales. Solís y Luna en [6] proponen una relación estadística entre el índice espectral y las técnicas de laboratorio como la espectrofotometría óptica, encontrando altas correlaciones entre estas técnicas, concluyendo que puede ser una excelente alternativa para evitar la toma de imágenes del café al estudiar la clorofila.

Con lo anterior, es posible afirmar que el departamento en cuestión carece de estudios científicos en cuanto a la adopción de tecnologías en los procesos de producción de café, limitando a los caficultores a promover sus productos en el mercado. Además, no se han intensificado los estudios sobre suelos, fisiología del café, variedades más productivas, control de plagas y condiciones climáticas que permitan definir alternativas de solución para mitigar las condiciones expresadas [7].

Por lo tanto, en esta investigación se propone un sistema el cual sea capaz de predecir índices normalizados de vegetación (NDVI) en cultivos de café basado en técnicas indirectas y directas para la cuantificación de la clorofila, que permita determinar la relación estadística entre estas técnicas para su posterior implementación en sistemas profesionales.

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) refirió a la disminución de la producción específicamente en el mes de febrero de 2022, causada por la persistencia de condiciones climáticas desfavorables. Lo anterior, se relaciona con el análisis estadístico realizado en el mencionado año con respecto al 2021, donde se define que en “el primer bimestre del año la producción fue de 1,8 millones de sacos, lo que representa una caída del 18% frente a los casi 2,2 millones de sacos del primer bimestre del 2021” [8].

El Cauca es un departamento líder en la producción de café de alta calidad, que cuenta con una variada climatología y topografía, que lo convierte en el cuarto productor de café a nivel nacional y el primero en número de familias cafeteras. Se estima que más de 90.000 mil familias se encargan de cultivar 93.000 hectáreas de café arábigo de las variedades Castillo, Colombia, Caturra, Típica, Borbón y Tabí, en 34 municipios [9]. Sin embargo, su producción y la vulnerabilidad de los cultivos se deben a los cambios agroecológicos y microclimáticos.

La FNC, en nombre de su dirección, afirmó que, “el cambio climático ha provocado muchas lluvias en los últimos dos años, superando los registros históricos de precipitaciones en la zona central”. En consecuencia, identificó que, por cada carga de 125 kilos por encima del millón de pesos, las cifras oscilaron entre 1,01 millones y 1,9 millones de pesos, ya que la última vez que este valor estuvo por debajo del millón de pesos fue hace apenas un año cuando se pagaron 996 mil pesos. Además, se menciona que la contabilidad entre octubre de 2020 y septiembre de 2021 tiene una cosecha de 13,39 millones de sacos, una cifra 5% menor en comparación con los 14,1 millones de sacos contabilizados entre octubre de 2019 y septiembre de 2020. El contexto desfavorable incluye una caída de la cosecha entre 2021 y 2022 mencionada anteriormente [10].

Por otro lado, se señala las difíciles condiciones topográficas y la alta densidad de siembra de los lotes, lo que impide un eficiente seguimiento a cada planta dentro de las unidades productivas, en las cuales la ausencia de un diagnóstico de calidad de suelos del cultivo de café y la falta de conocimiento en la distribución de la siembra de las plantas de café dificulta su seguimiento. De la misma manera, se describe la existencia de variaciones en las condiciones agroecológicas y microclimáticas que afectan el crecimiento, desarrollo y llenado de los frutos de manera homogénea dentro de los lotes. Esto se da por el desconocimiento de las características climáticas del área de siembra.

Sumado a lo anterior, los altos costos de producción para análisis de suelos, incremento del personal necesario para el seguimiento y uso eficiente de abonos e insumos en una región con pequeños productores, ha causado una relación de costo-beneficio muy poco rentable. Además, se identifica una escasa innovación

tecnológica, competencias técnicas, herramientas agronómicas y de extensión por parte del agricultor para el manejo de cultivo de café especial [11].

Se describen otras afectaciones como la falta de nutrientes y presencia de plagas en los cultivos [12], un incremento en el costo de producción y un alto requerimiento de personal para un seguimiento constante. Además de eso, existe una mínima rentabilidad y pérdida de oportunidades en mercados diferenciados, esto se da por la falta de control de plagas ejercido manualmente y uso impreciso de los insumos y equipos.

Además, no hay estudios intensificados frente al estudio de suelos, fisiología del cafeteo, variedades más productivas, control de plagas y condiciones climáticas que permitan la definición de alternativas de solución para mitigar las condiciones expresadas [13].

Haciendo énfasis, en los últimos años, la teledetección se ha convertido en un área que impulsa el progreso de las tecnologías de la información espacial, como los sistemas de posicionamiento global (GPS) y los sistemas de información geográfica, y el desarrollo de software y hardware que facilitan el análisis de las imágenes y la interpretación de las distintas características del terreno. Esto, junto con la cartografía aérea, está siendo ampliamente utilizado en el sector agrícola, contribuyendo a la agricultura de precisión como una herramienta que, entre otras ventajas, favorece el estudio y seguimiento fenológico de diversas plantaciones. Para ello, el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados y sensores remotos ofrece una amplia variedad de aeronaves y software que permiten un acceso más fácil a cualquier zona, rapidez, facilidad de uso, y versatilidad y su funcionamiento autónomo o semiautónomo a distancia ofrece una mayor precisión en la toma de datos, pero cada uno de ellos debe ser rediseñado para las condiciones topográficas y climáticas propias de cada región y cultivo.

Teniendo en cuenta que en este departamento hay una deficiencia en tecnologías modernas en el agro como se mencionó anteriormente, es necesario hacer uso de estas mediante la determinación de los índices normalizados de vegetación y el estudio de la cuantificación de la clorofila en los cultivos de café por distintos métodos correspondientes para este fin, de esta manera determinar la relación entre ellos ya que existen métodos tanto directos como indirectos.

Por lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación.

¿Cómo estimar la relación estadística entre los métodos de cuantificación de clorofila directos e indirectos en el cultivo de café?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El café es una cadena productiva compleja que articula, no solo los cuidadosos procesos de transformación y procesamiento del grano, sino también el manejo del cultivo, la planta y la tierra en la que se desarrolla, afectando las características específicas de la calidad del grano y a su vez el perfil de taza, el cual al final es el indicador real de calidad [14]. Es de mencionar que el departamento del Cauca es competitivo en la producción de cafés de alta calidad. De acuerdo con [15], señala que cuenta con una oferta ambiental inmejorable, que sumada al compromiso por la actividad de más de 87 mil familias cafeteras que cultivan cerca de 74 mil hectáreas de café, garantiza un importante aporte al desarrollo económico del departamento y la industria nacional.

En el Cauca la agenda interna de competitividad genera una apuesta productiva específica para cafés especiales, donde se espera “fortalecer el sistema productivo, permitiendo a los productores mejorar los ingresos para dar continuidad en la actividad lícita y superación de las difíciles situaciones sociales, económicas y políticas vividas en el departamento” [16]. En tal sentido, se propone implementar modelos de agricultura de precisión, que permitan realizar análisis computacional de imágenes de cartografía aérea, capturadas a través de vehículos aéreos no tripulados (UAS) tipo Quadrotores. Este seguimiento fenológico permite planificar más acertadamente los procesos de producción a partir de la identificación temprana de deficiencias y problemáticas en el cultivo, las cuales varían según las condiciones microclimáticas, agroecológicas y de productividad dentro de los diferentes lotes de cultivo en un terreno.

En este sentido, se realizaron tomas de imágenes multiespectrales de cultivos de café a partir de cartografía aérea en plantaciones de este producto en la región de la meseta de Popayán. Asimismo, se analizará el estado de salud de las plantas haciendo uso de un clorofilómetro. A partir de este análisis comparativo de los diferentes índices normalizados de vegetación (NDVI), se definirán alternativas para el mejoramiento de la producción. Las imágenes serán captadas con cámaras especiales incorporadas en los RPAS /UAS, lo que permitirá identificar las variaciones de los lotes y plantas de café en etapa productiva, en relación a su desarrollo fenológico, absorción de nutrientes y estrés hídrico del cultivo, ayudando a mejorar la productividad cafetera, garantizando una mejor gestión del uso de agua y fertilizantes y una mayor trazabilidad del cultivo al realizar una correlación con los valores de vigor de las plantas.

El proyecto dejará como resultado la estimación de la relación estadística que hay entre los métodos de cuantificación de clorofila directos e indirectos en cultivos de café, clave para la planificación de los procesos productivos y un desarrollo tecnológico que traerá beneficios a los caficultores de la región, además del

fortalecimiento de los programas académicos y de formación de las instituciones aliadas.

OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la relación entre los métodos de cuantificación de clorofila directos e indirectos en la agricultura de precisión con cultivos de café.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un sistema de acople para los sensores multiespectrales adaptable a un vehículo aéreo no tripulado.
- Determinar los índices normalizados de vegetación y la cuantificación de clorofila por medio de técnicas directas e indirectas.
- Evaluar las técnicas estadísticas que determinen la relación entre los diferentes métodos de estimación de clorofila.

2 CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

Para este proceso investigativo enfocado a la estimación de la relación entre métodos de cuantificación de clorofila, específicamente en cultivos de café, es de suma importancia abordar los siguientes conceptos a partir de la literatura, tal que se consiga ampliar este espectro epistémico en el marco de la Ingeniería Mecatrónica.

2.1.1 Agricultura de precisión

Según [17] en las próximas cuatro décadas la humanidad tendrá que producir más alimentos que los generados en todos los años pasados juntos. Otras autoridades mundiales señalan que la producción de comida tendrá que aumentar entre el 70 y el 100% para el año 2050, con el fin de alimentar a la población estimada, para entonces, en 9.000 millones de personas.

Una solución a esta necesidad se puede encontrar en la agricultura de precisión, concepto que ha venido tomando mucha fuerza en los últimos años. En la agricultura tradicional se parte de la premisa de homogeneidad, en la cual los procesos de la preparación de la tierra, el control fitosanitario, la siembra y la cosecha se hacen por igual en todo el terreno. Por el contrario, la agricultura de precisión parte de un principio de variabilidad, en donde se reconoce la existencia de desigualdades en las propiedades del suelo dentro de un mismo territorio y que demandan un tratamiento diferencial de acuerdo a sus condiciones [18].

Para lograr dicha diferenciación, la agricultura de precisión se apalanca en herramientas tecnológicas como sensores de percepción remota, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), tecnologías de aplicación de tasas diferenciadas (mecatrónica, electromecánica) y otras tecnologías de información y comunicación (TIC) [19]. De esta manera, el agricultor maximiza sus rendimientos mientras que optimiza el uso de recursos escasos como tiempo, trabajo, fertilizantes y demás insumos agrícolas.

La agricultura colombiana y más específicamente la del departamento del Cauca, está centrada en la producción cafetera siendo este uno de los principales productos de exportación [20], donde los cultivos tienen poca integración de tecnologías en los procesos de siembra, crecimiento y recolección del grano; son escasos los estudios relacionados con el uso de cartografía aérea y agricultura de precisión realizados en este tipo de plantación por diversos factores como son: la topografía del terreno y las condiciones micro climáticas donde se desarrollan dichas actividades. Dependiendo de la necesidad del agricultor, existen diversas aeronaves, cámaras y sensores que cumplen con los distintos requerimientos de información.

En este sentido, el sensor visual es el más sencillo y permite recoger información acerca de las inclinaciones naturales del terreno. Este sensor también recopila información sobre las alturas de las plantas para analizar su crecimiento e incluso cuenta con la capacidad de realizar el conteo de plantas presentes en un cultivo. Así mismo, es posible detectar la radiación electromagnética reflejada por las plantas y que el ojo humano no es capaz de captar [21].

Las variaciones infrarrojas indican cambios en la vegetación mucho antes de que éstos se manifiesten físicamente. Los agricultores utilizan estos datos para saber qué plantas están bajo estrés hídrico, controlar su crecimiento, medir el nivel de clorofila, determinar si tienen alguna deficiencia nutricional y diagnosticar plagas y enfermedades [22].

Cabe mencionar que, existen otros sensores más especializados capaces hasta de descifrar la composición mineral de las superficies analizadas y detectar fuentes hídricas y nivel freático del subsuelo, aunque el verdadero aporte de esta tecnología se encuentra en el software que es capaz de interpretar los datos recogidos, darles un significado y responder a las necesidades de información del agricultor sobre su cultivo, a fin de tomar decisiones de planificación en sus procesos de producción.

2.1.2 Aplicaciones Específicas en Agricultura Precisión [23]

- Detección del estado de salud de las plantas, en cuanto a estrés, enfermedades, plagas o de otras deficiencias. Analizar la estadística y los valores de reflectancia (unidad de medida porcentual del nivel de biomasa) y ser comparados de temporada en temporada o entre monitoreos periódicos. Estimar densidad de siembra, el rendimiento y niveles de proteína (%), cantidad de contenido de nitrógeno foliar, calidad y cantidad de la producción.
- Detección de estrés nutricional en cultivos, evidenciando la deficiencia y los problemas nutricionales con el fin de formular adecuados planes de fertilización de la superficie analizada del cultivo o de la plantación. A partir de la determinación del contenido de clorofila de las plantas se obtiene la concentración de nitrógeno de la hoja, ya que guardan relación, al detectar esta falta de nutrientes en los cultivos permitirá realizar un uso óptimo de fertilizantes, utilizándolos sólo en las zonas en las que son necesarios.
- Detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos, (malas hierbas, insectos, ácaros, hongos) a partir de imágenes multispectrales, detectando así el estrés en la vegetación producido por la presencia de plagas y enfermedades, generando mapas diversos, que permiten detectar procesos en los cultivos en forma focalizada, así como dimensionar el problema y evaluarlo en forma puntual. Permitirá aumentar los beneficios económicos de

los agricultores, evitará la aplicación innecesaria de compuestos fitosanitarios (herbicidas y pesticidas), originando para el agricultor un ahorro de producto fitosanitario, lo que tiene que ver con menor impacto económico en los costos de producción, además de beneficios relacionados a la sustentabilidad ambiental y el grado de sensibilidad que la sociedad adquirió ante la utilización de estos insumos.

- Controles en cultivos, mediante monitorización del estado de los cultivos durante su ciclo fenológico, a partir de imágenes multiespectrales y de la captura de los datos de campo.
- Determinar el estado de las plantas en momentos críticos de su ciclo fenológico y proceder posteriormente a su recolección selectiva, o la aplicación de medidas correctoras.
- Evaluación de daños en los cultivos debidos a fenómenos atmosféricos o climatológicos, daños por heladas, inundaciones y sequías.
- Supervisar la producción agrícola subvencionada, y control de subvenciones agrarias. Actualmente estas imágenes se obtienen de vuelos con aeronaves tripuladas o a través de imágenes de satélites.
- Realizar inventario de áreas cultivadas, debido a que la observación aérea ha sido siempre una herramienta potente para la generación de inventario de cultivos.
- Índices relativos a calidad en cultivos, mediante mapeo agrícola y análisis de cultivos, originando información valiosa que puede tener un impacto directo en la rentabilidad.
- Zonificación agroecológica. Identificación detallada de la Información georreferenciada de las imágenes obtenidas de la cartografía aérea, fotogrametría y reconstrucción en 3D; teniendo en cuenta toda clase de superficie, con el fin de formular adecuados planes de preparación del suelo, siembra, riego, fertilización, fumigación, recolección, entre otros; indicándose lote por lote sobre la morfología real del terreno.
- Cálculo de áreas e índices de vegetación en máximos, mínimos y promedios diferenciados, relacionados con el cálculo de las existencias, la detección de variación de la superficie, la cartografía del terreno, realizar mediciones de altura de la planta mediante la recopilación de información de distancia desde la copa de la planta y por debajo del suelo. Los índices de vegetación, combinaciones o ratios de las bandas de la imagen, permiten aumentar las diferencias de reflectancia entre usos del suelo. Los más usados en estudios de

teledetección para clasificar vegetación son, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), por sus siglas en Inglés.

2.1.3 Drones o Aeronaves

Los drones, son aeronaves piloteada a distancia (UAS) o remotamente tripuladas (RPAS), con unas características técnicas particulares para realizar vuelos, controlados remotamente mediante un sistema de mando y control, estas pueden clasificarse según diferentes criterios, el más frecuente es clasificarlos atendiendo a la forma en la que las aeronaves no tripuladas consiguen su sustentación en la atmósfera [24].

2.1.3.1 Tipos de dispositivos UAV (Drones):

Hay dos categorías principales de vehículos aéreos no tripulados o UAV, los de tipo ala fija y los de tipo multirrotor. Los UAV de ala fija son similares a los aviones y los de tipo multirrotor son aquellos en los que las hélices giran en el aire para generar la fuerza de sustentación necesaria [25].

Los aviones son más versátiles, rápidos, compactos y ligeros, por lo que requieren una mayor habilidad para manejarlos. En cambio, los multirrotos son más estables durante el vuelo, lo que mejora la precisión y la calidad de las imágenes aéreas adquiridas y son más fáciles de operar. Ambos tipos de UAV tienen ventajas en su operación, lo que ha llevado a su uso masivo en todo el mundo para diversas aplicaciones, como la creación de mapas a través de imágenes de alta resolución y la recolección eficiente de información georreferenciada [26]. En la siguiente tabla se puede observar una comparativa entre estos dos tipos de UAV.

Tabla 1 Comparación dispositivos UAV. Fuente [27].

No se encuentran entradas de índice.	AVIONES	MULTIROTORES
Estabilidad de imagen	Menor	Mayor
Implicación personal	Dos pilotos con calificaciones en bimotores, CPL (A), IFR, MEP (L)	1 piloto, algunas veces 1 ayudante /observador
Área de cobertura por vuelo	Mayor	Menor
Altura de vuelo	300m a 500 m.	30m a 250m
Precisión de vuelo	Menor	Mayor
Vuelo estacionario	No	Si
Autonomía	Mayor	Menor

2.1.3.2 Vuelo de dispositivos UAV

Para adquirir información mediante la captura de imágenes aéreas con un UAV, es necesario crear un plan de vuelo que cubra toda la zona de estudio. De esta manera, el UAV podrá sobrevolar el área de manera autónoma, capturando imágenes de manera sistemática y completa [28], en la figura 1 se presenta un ejemplo del plan de vuelo.



Figura 1 Plan de vuelo. Fuente [29].

Para diseñar y ejecutar un plan de vuelo en un UAV, se utilizan herramientas informáticas de posicionamiento global GPS, que se comunican con el dispositivo durante el vuelo y le transmiten el plan de vuelo a través de una conexión GPS.

En la planificación del vuelo, se deben considerar varios factores importantes, como la altura y velocidad de vuelo, el tiempo de exposición del sensor de la cámara, el solapamiento entre las imágenes y la distancia de muestreo del suelo (GSD). Todos estos aspectos se deben tener en cuenta para garantizar la precisión de la toma de imágenes del terreno, tomando en consideración las características del UAV y del sensor de la cámara que se utilizará [30]. Una comparativa de estas características se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2 Características a considerar en un plan de vuelo. Fuente [31].

Características del dispositivo UAV	Características del sensor o cámara
Peso	Peso
Tamaño o dimensiones	Tamaño o dimensiones
Autonomía de vuelo	Consumo de energía
Velocidad	Distancia focal
Radio de alcance	Ancho del sensor
Aplicaciones de comunicación	Tiempo de obturación
	Interfaces de comunicación
	Opciones de activación
	Resolución en píxeles

- **Altura de vuelo**

La altura de vuelo es la distancia entre el UAV y el suelo del terreno. Esta altura puede ser definida por el investigador, ya que al variar se puede ajustar la cantidad de información que se adquiere por imagen del terreno [32].

- **Distancia de muestra del suelo (GSD)**

La distancia de muestreo del suelo, también conocida como GSD (por sus siglas en inglés Ground Sample Distance), es el área del terreno captada por el sensor en cada píxel de la cámara. Esta medida es importante para determinar cuánto terreno se está cubriendo por imagen tomada en el plan de vuelo, y se expresa en centímetros por píxel.

Para calcular el GSD, se deben considerar cuatro variables: el ancho del sensor, la altura de vuelo, la distancia focal de la cámara y el ancho de la imagen expresado en píxeles. Estos factores se utilizan en la siguiente ecuación [33].

$$GSD = \frac{\text{Ancho del sensor(en mm)} * \text{Altura de vuelo(en m)} * 100}{\text{Distancia Focal(en mm)} * \text{Ancho imagen(píxeles)}} \quad (1)$$

- **Solapamiento de imágenes**

El solapamiento se refiere a la información que comparten las imágenes aéreas del terreno, como se muestra en la siguiente figura. En este caso, se puede observar que existe una superposición entre las imágenes adyacentes, lo que permite tener una mayor cobertura y precisión en la toma de datos. El solapamiento es una variable importante a considerar en el diseño del plan de vuelo, ya que afecta la calidad y la cantidad de datos que se pueden obtener.

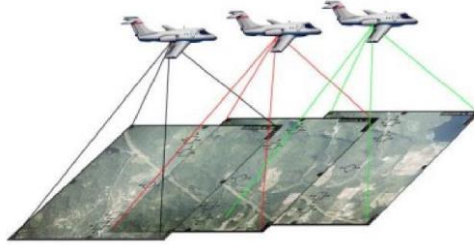


Figura 2 Solapamiento de imágenes. Fuente [34].

El solapamiento es una variable importante en el diseño del plan de vuelo, ya que ayuda a calcular la distancia entre líneas de vuelo y la distancia entre capturas de imágenes longitudinales, también conocida como base en el aire. Comúnmente, se utiliza un solapamiento del 75% en casos de estudio de índices de vegetación para garantizar una buena cobertura y precisión en la toma de datos.

Para obtener la distancia entre líneas y la velocidad de vuelo a partir del valor de solapamiento, es necesario calcular primero los valores de ancho y alto de la huella de cada imagen del terreno, es decir, la cantidad de información en metros que cubre una imagen en su ancho y alto del terreno. Estos valores se obtienen mediante las siguientes ecuaciones [35].

$$\text{Ancho de huella} = \frac{\text{GSD} * \text{Ancho de imagen (píxeles)}}{100} \quad (2)$$

$$\text{Alto de huella} = \frac{\text{GSD} * \text{Alto de imagen (píxeles)}}{100} \quad (3)$$

El ancho de huella es una medida que permite calcular la separación entre las líneas del plan de vuelo, es decir, la distancia que debe haber entre imágenes paralelas del vuelo en base al solapamiento deseado. Se obtiene mediante la siguiente ecuación [36]:

$$\text{Separación de líneas} = \text{Ancho huella}(m) * \left(1 - \left(\frac{\% \text{ de solapamiento lateral}}{100}\right)\right) \quad (4)$$

El alto de huella se utiliza para determinar la distancia en el aire entre la captura de imágenes consecutivas, de modo que se cumpla con el solapamiento deseado entre ellas. Esto permite asegurar que cada imagen cubra una parte adecuada del terreno y se obtenga una información precisa y completa, este se define por la siguiente ecuación [37].

$$Base\ en\ el\ Aire = Alto\ huella(m) * \left(1 - \left(\frac{\% de\ solapamiento\ longitudinal}{100}\right)\right) \quad (5)$$

- **Tiempo de obturación**

El tiempo de obturación de la cámara es el tiempo que tarda la cámara en capturar una imagen. Es importante establecer este tiempo para garantizar que las imágenes capturadas sean nítidas y no salgan borrosas. En general, el tiempo de obturación debe ser lo suficientemente corto como para evitar el movimiento de la cámara durante la toma de la imagen, pero lo suficientemente largo como para permitir que la cámara capture suficiente luz para generar una imagen de calidad [38].

- **Velocidad de vuelo**

La velocidad aérea del dispositivo UAV durante su ruta debe ser constante para garantizar que todas las imágenes tengan el mismo solapamiento y evitar imágenes borrosas debido a velocidades variables. Este aspecto del plan de vuelo está influenciado por el tiempo de exposición de la cámara y la separación en el aire entre tomas consecutivas de imágenes, lo cual puede ser calculado utilizando la ecuación correspondiente [39].

$$Velocidad\ de\ vuelo\ \left(\frac{m}{s}\right) = \frac{Base\ en\ el\ aire}{Tiempo\ de\ obturación} \quad (6)$$

2.1.4 Índices normalizados de vegetación

Los índices de vegetación permiten determinar el tipo de cobertura, evaluar la variación temporal o identificar el estado de salud de cultivos, partiendo de las estimaciones características como vigor vegetal, contenido de clorofila, estado nutricional o estado hídrico [40]. Los índices son calculados a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, para la obtención de información con respecto a la vegetación.

La combinación de longitudes de onda del espectro electromagnético permite la interpretación del estado saludable o deficiencias con las que cuenta la vegetación. Si bien, la condición de energía clasificada en dicho espectro facilita la operación

algebraica de la intensidad de reflectividad, con el objeto de realizar índices espectrales como, por ejemplo, el índice normalizado diferencial de vegetación [41].

Con el monitoreo de la actividad fotosintética en el cultivo de café mediante los índices de vegetación puede brindar información de acuerdo al crecimiento de las plantas, que permite en gran manera la identificación temprana alteraciones que puedan influir negativamente en el desarrollo de las mismas y con ello establecer alternativas de solución.

Cuando se utilizan sensores multiespectrales para la toma de imágenes aéreas, se puede calcular el llamado índice de vegetación. Estos índices son medidas cuantitativas que se basan en los valores digitales de las imágenes y que permiten estimar la biomasa o la salud de la vegetación [42].

El índice de vegetación se obtiene mediante una combinación de bandas espectrales, que se multiplican, suman o dividen de una manera específica para producir un valor que indique la cantidad o vigor de la vegetación dentro de un píxel. Esto permite estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, al medir la radiación que las plantas emiten o reflejan.

2.1.5 Plataforma de UAS/ RPAS - Ala Rotatoria (Fixed Wing Aircraft)

Las aeronaves no tripuladas con ala rotatoria o también llamados multirotores, (quadrotores), son aquellos en los cuales, las fuerzas de sustentación se logran mediante el giro de las hélices en el aire, las características más importantes de estos equipos son [43]:

- Despegue y aterrizaje vertical, reduciendo las necesidades de espacio para las maniobras de aterrizaje y despegue.
- Posibilidad de volar a puntos fijos con Vuelo estacionario, muy útil para aplicaciones de inspección.

2.1.6 Plataforma de UAS / RPAS – Ala fija

Las aeronaves no tripuladas de ala fija, son considerados como aeromodelos o mini-aviones, y sus principales características se señalan a continuación [44]:

- Son aeronaves que en sus vuelos siguen trayectorias curvilíneas, con radios de giro relativamente grandes y velocidades de ascenso y descenso bastante estrictas.
- Vuelan a mayor velocidad, por lo que al tener además mayor autonomía cubren más superficie, siendo más útiles en tareas de cartografía o teledetección.

- Tienen menor acción ruidosa o huella sonora, siendo más indicados para operaciones de vigilancia. Tienen mayor rango meteorológico, en términos de temperatura, viento y lluvia.

Es importante tener en cuenta que ambas plataformas requieren de un equipo especializado de manejo para el éxito del vuelo en actividades no solo recreo deportivas, sino también de seguridad y obtención de información, como son:

- **Plataforma de Vuelo:** es el equipo que conlleva la aeronave no tripulada y su payload (carga), es decir, el equipamiento (la cámara fotográfica) y otros sensores.
- **Plataforma en tierra:** es la estación en la cual se hace el monitoreo al desarrollo del vuelo y el registro de datos del punto de despegue y de llegada del dron.
- **Sistema de Control de Vuelo:** integra un conjunto de elementos receptores GPS, computador, software de control de vuelo etc., los cuales van integrados en la plataforma de vuelo.
- **Sistema de Lanzamiento y Recuperación:** conlleva mecanismos de lanzamiento, catapultas, lanzaderas automáticas, neumáticas, o en forma manual, ganchos de recuperación, aterrizaje de barriga (autónoma), mallas, etc. Todo esto permite controlar el despegue y el aterrizaje.
- **Sistema de Comunicaciones:** a través de la radio, data link y telemetría, GPS, enlaces de comando y control (C2), torre de control (ATC), permite la comunicación en la estación de control con el UAS/ RPAS, garantizando la transmisión de toda la información adquirida durante el vuelo.

2.1.7 Aplicaciones de los UAS/RPAS [45]

Estos se aplican en función del mejoramiento hacia la productividad de acuerdo al análisis de suelo, al monitoreo que sea para la conservación y un mayor aprovechamiento de los recursos del cultivo.

De igual forma se aplican en el cuidado del medio ambiente entorno a los recursos naturales monitoreados y de los insumos agroquímicos utilizados con parámetros garantizados para su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución, así como recomendaciones para preservar la

diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos, por medio de la transferencia apropiada de los conocimientos científicos, técnicos y tecnológicos pertinentes de innovación. De esta manera, ofrecen medidas preventivas para contrarrestar el deterioro ambiental global en medio de la inestabilidad climática, trabajando en conjunto para respaldar la gestión del riesgo. Esto implica la integración de modelos productivos en el desarrollo de cultivos, destacando los beneficios económicos obtenidos, y la optimización del uso eficiente de recursos escasos como el tiempo, trabajo, fertilizantes, plaguicidas y otros insumos agrícolas.

Estas iniciativas también permiten establecer acciones concretas, tales como la promoción del uso de semillas nativas, la sincronización con calendarios lunares, la adaptación a cambios climáticos, el mejoramiento del suelo, la promoción de la agricultura orgánica, la preservación de las fuentes de agua, la utilización de plantas en el control de plagas y enfermedades, la identificación de zonas ricas en agrobiodiversidad, la conservación de recursos agrobiológicos y la protección de la naturaleza, además de poder llevar a cabo la detección de materiales y recursos tanto del subsuelo como en áreas de conservación, contribuyendo de este modo a la exploración y eventual explotación de los recursos disponibles en el suelo.

2.1.8 Aeronaves no tripuladas RPAS / UAS

En cuanto a las aeronaves no tripuladas RPAS / UAS incorporan una carga útil (Payload) de peso variable que les permite obtener la información e imágenes de alta resolución, a través de los avances tecnológicos de nuevos sensores. Esto ha dado lugar a la consecución en el mercado comercial de sensores que se utilizan para múltiples aplicaciones en la industria en general como sensores térmicos, sensores multiespectrales e Hiperespectrales, sensores Lidar, entre otros como:

- **Sensor de visión:**

Los sensores de visión presentan diversas características que los hacen especialmente eficaces para la automatización en fábricas. Es de vital importancia no confundirlos con los sensores digitales incorporados en cámaras, ya que los sensores de visión forman parte de una categoría de sistemas de visión artificial diseñada para llevar a cabo inspecciones básicas de presencia/ausencia y proporcionar resultados de aprobación/falla en entornos no estructurados. Estos sensores combinan la capacidad de una cámara para capturar imágenes con la potencia de procesamiento de una computadora, permitiéndoles tomar decisiones respecto a la posición, calidad e integridad de piezas o productos manufacturados. Además, los sensores de visión cuentan con una

biblioteca de herramientas de software que realiza diversos tipos de inspecciones, incluso múltiples, y proporciona varios resultados de aprobación/falla a partir de una sola imagen capturada. Es importante destacar que, a diferencia de otras categorías de sensores, los sensores de visión pueden abordar múltiples puntos de inspección por objetivo. Asimismo, tienen la capacidad de detectar sus objetivos según patrones, características y colores, siendo capaces de identificar piezas específicas en una región de interés extensa, adaptándose dinámicamente al movimiento de la pieza a lo largo de la línea de producción [46].

- **Sensores Multiespectrales:** Los sensores multiespectrales se refieren a las herramientas significativas para la medición rápida de imágenes espectrales de alta resolución espacial que permite recuperar la radiación espectral de un elemento, la reflectancia de un objeto, o la señal de color combinada en cada píxel de la imagen mediante el uso de datos de las respuestas de sólo unos pocos sensores.

Se menciona que existe una viabilidad de recuperar el contenido de clorofila de los índices de vegetación hiperespectral compuestos por la reflectancia de bandas específicas [47]. Por tanto, es necesario la utilización del sensor multiespectral de 5 canales, compuesto por cinco bandas espectrales: banda azul cercana, verde, rojo, borde rojo, de infrarrojo cercano con 1,2 megapíxeles (1290 x 960) y una resolución en tierra de 8,9 centímetros por píxel en una altitud de 100 metros.

La alta resolución multiespectral de imágenes contiene 18,5 megapíxeles con una resolución del suelo de 1,3 centímetros por píxel a 50 metros y una distancia entre píxeles de 2.864 micras. Con este particular sensor, hay varias opciones disponibles para satisfacer sus necesidades exactas. Se encuentra la opción ya sea de 10 milímetros o 18,5 milímetros de longitud focal y opciones de banda espectral de BGNIR (azul, verde e infrarrojo cercano) o RGNIR (rojo, verde e infrarrojo cercano).
- **Sensor térmico Infrarrojo (TIR):** Es un sensor de alta resolución con Microbolómetro construido por la NASA en el centro de vuelo espacial Goddard en Greenbelt [48]. El TIR es el encargado de recoger los datos para proporcionar imágenes de la superficie terrestre. Este tipo de sensor es de alta resolución radiométrica que cuenta con 640 x 512 píxeles y una resolución en tierra de 8,9 centímetros por píxel en 100 metros de altitud. Se utiliza esencialmente para detección de cuerpos calientes, detección de ganado, vigilancia y seguridad, detección de temperatura de agua e identificación de fuente de agua, respuesta a emergencias.
- **Sensor hiperespectral:** es el sensor más avanzado en la toma de datos espectrales. En los últimos años se han desarrollado sensores con un peso inferior a 1 kg, lo cual ha permitido su empleo mediante UAS / RPAS.

Mantiene bandas espectrales 270,5 nm de resolución que capturan la información comprendida entre 400 nm y 1.000 nm. Con ello, se consigue la máxima información espectral en el rango correspondiente a la vegetación [49].

2.2 ANTECEDENTES

Existen trabajos relevantes en el cultivo del café que están centrados en la caracterización de la fertilización de los suelos cafetaleros de Costa Rica en el cual se evalúa la importancia de la aplicación de abonos foliares y las características químicas de los terrenos en diferentes zonas de ese país [50]. Otro trabajo relevante [51], está centrado en la evaluación temprana de la deficiencia del Nitrógeno en café y aplicaciones, en donde se usan sensores espectrales (clorofilómetro) el cual estima la concentración relativa de clorofila de la hoja y la concentración del Nitrógeno foliar de la planta de café.

Además de las anteriores investigaciones, se evidencia el estudio de evaluación agronómica con técnicas de agricultura de precisión en parcelas de café (*Coffea arabica*) en la cuenca del río Monaquito, Estado Trujillo, donde mediante técnicas de información geográfico SIG, se logra la identificación de valores de pH, determinación de suelos ácidos, y la falta de abonos orgánicos de la tierra y la significativa presencia de aluminio soluble debido a la topografía montañosa del terreno [52]. Desde la perspectiva tecnológica se encuentran dos distintas áreas como son: la generación de algoritmos computacionales para el procesamiento de imágenes según los criterios de relevancia de la información y la segunda que es la adecuación o construcción de aeronaves las cuales cumplan los requerimientos de vuelo en la topografía del cultivo, como también de la toma de imágenes según criterios de elevación y recorrido.

En el campo de los algoritmos computacionales se encuentran trabajos como el de patrones espaciales de cambio de cobertura y uso de suelos en el área cafetera de la sierra norte de Puebla [53], en esta investigación se estudió sobre la dinámica de cambios de patrones en la cobertura vegetal asociados al impacto del cultivo de café entre los años 1988 al 2003. A su vez, en el país se han realizado trabajos de conectividad estructural del paisaje cafetero el cual fue realizado en la cuenca alta del río San Juan del suroeste antioqueño, donde se utilizaron imágenes satelitales y se realizó una categorización de los distintos terrenos, en función de su composición, configuración y formas de los elementos presentes en las imágenes y la respectiva fragmentación del terreno [54].

Ahora desde la perspectiva de las aeronaves no tripuladas UAV se evidencian trabajos como el de [55] uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión de cultivo de papa variedad Diacol, el

cual analiza los problemas de desarrollo del cultivo a través de la respuesta espectral de imágenes de infrarrojo cercano. Entre otros antecedentes, el uso de drones en la agricultura como herramienta para la planificación y el seguimiento al desarrollo fenológico de las plantas han sido verificada por estudios como: Según [56] la caracterización de la condición de la vegetación natural y de las tierras agrícolas es esencial en muchas áreas de aplicación concluyendo que la percepción remota constituye una alternativa rápida y económica para realizar dicha caracterización, la cual se enfoca en la extracción de información sobre el estado y la dinámica de la vegetación utilizando como fuente principal, datos obtenidos mediante sensores próximos y remotos.

En [57] se aborda la problemática relacionada con la escasa implementación de alternativas tecnológicas de planificación y los sobrecostos en la atención de enfermedades que estos presentan, así como la importancia de la implementación de herramientas tecnológicas que permitan mejorar la planificación de las actividades agrícolas, predecir daños y tomar decisiones adecuadas ante situaciones que afectan el desarrollo de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum*) en Cundinamarca. Para el efecto, de ese proyecto se buscó definir los aspectos teóricos y técnicos para evaluar los problemas que se presentan en el desarrollo del cultivo de papa a través de su respuesta espectral en imágenes de infrarrojo cercano (NIR) de alta resolución obtenidas con el uso de drones.

Los resultados obtenidos del trabajo en papa demuestran que la respuesta espectral permite identificar características de la vegetación y problemas en el cultivo, determinando para ese caso que se evidenció la viabilidad económica de dicha herramienta tecnológica en el cultivo de papa. En el trabajo de [58] se estableció que la discriminación de malas hierbas en fase temprana con técnicas de teledetección requiere imágenes remotas de muy elevada resolución espacial (píxeles <5 cm). Actualmente, sólo los vehículos aéreos no tripulados pueden generar este tipo de imágenes. El objetivo del trabajo mencionado anteriormente fue evaluar imágenes tomadas con una cámara visible a diferentes alturas de vuelo (40, 60, 80 y 100 m) y cuantificar la influencia de la resolución espacial en la discriminación de malas hierbas en fase temprana en un cultivo de girasol. Se aplicó un algoritmo de clasificación de imágenes basado en objetos, el cual se dividió en dos fases principales: 1) detección de líneas de cultivo y 2) clasificación de cultivo, malas hierbas y suelo desnudo.

El algoritmo presentado por dicho estudio resultó 100% eficaz en la detección de las líneas de cultivo en todos los casos (fase 1), así como en la detección de zonas libres de mala hierba en las imágenes tomadas a 40 y 60 m de altura. En las zonas con presencia de malas hierbas, los mejores resultados se obtuvieron en las imágenes tomadas a baja altura (40 m), con un 71% de marcos de muestreo clasificados correctamente (fase 2). La mayoría de los fallos de clasificación cometidos en todas las imágenes fueron falsos negativos, es decir, malas hierbas

no detectadas debido a su pequeño tamaño en el momento de la captura de las imágenes. Por tanto, el siguiente paso que se proponen en el estudio de girasoles sería desarrollar un estudio multitemporal para la detección de las malas hierbas en estados fenológicos más avanzados lo que podría facilitar su discriminación en las imágenes y, por tanto, disminuir el porcentaje de falsos negativos en las clasificaciones.

3 CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se encauza directamente con la visión artificial de fotografía aérea aplicado a la industria del café, que con ayuda de algoritmos computacionales para la reconstrucción de cartografía por ortomosaicos, es capaz de abordar de forma eficaz problemas tales como el de la clasificación de biomasa de las plántulas de café y su relación con su seguimiento fenológico de crecimiento.

Para determinar los índices de vegetación de manera precisa, es necesario llevar a cabo una serie de pasos que incluyen la definición del área de estudio, la selección del cultivo, la adquisición de los materiales necesarios y el diseño del plan de vuelo.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO O DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL LUGAR DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la finca “**La Fortaleza**” ubicada en la vereda “**La Figueroa**”, municipio de Popayán, Cauca-Colombia. En las condiciones meteorológicas de Popayán se destaca por su clima suave y moderado, con precipitaciones significativas durante todo el año, incluso en el mes más seco. Según [23] la temperatura media de Popayán es de 15.7 °C, y se registran alrededor de 2594 mm de precipitaciones. La figura 3 muestra la ubicación del área de estudio.

Coordenadas: Latitud 4.596200416666666, Longitud -77.07750791666666.

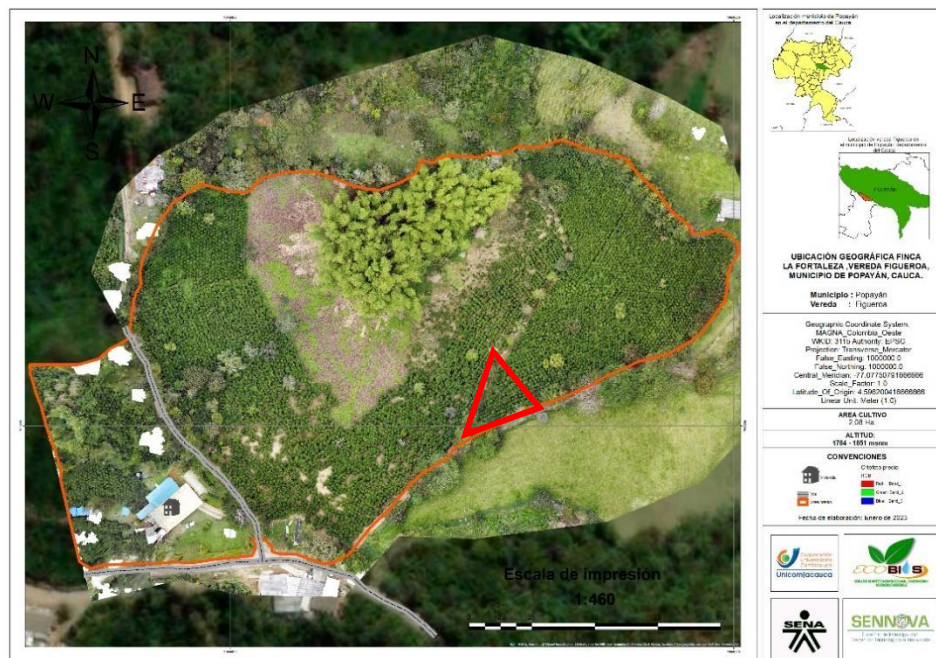


Figura 3 Finca la Fortaleza. Fuente autor.

3.2 SELECCIÓN DEL CULTIVO

El estudio se realizó en un lote de dicha finca, el cual tiene un área de 2,800 m², con 2000 árboles de café variedad castillo tambo¹, que a la fecha el cultivo es una zoca de cinco años. Está a libre exposición a una distancia de siembra de 1.40m * 1.40m, toda esta información fue proporcionada por el propietario de la finca.

Para la selección del cultivo se tuvieron en cuenta factores como la fácil accesibilidad, la menor cantidad de obstáculos aéreos y terrestres, que el lote contará con dimensiones favorables para el estudio y la baja altura de los árboles con el fin de facilitar el trabajo de campo.

Debido a que el lugar donde se realizó el proyecto es extenso para la toma de información tanto de campo como de laboratorio (hojas por árbol), se procede a realizar la toma de datos y muestras en una pequeña parte del mismo (triángulo rojo). Como se muestra en la figura 3.

La zona de estudio cuenta con 200 árboles aproximadamente, por lo cual se toma el 5% de la población para hacer el muestreo completamente al azar en donde se le dio a cada árbol muestreado un código único y se le tomaron las coordenadas exactas para su respectiva correlación de las técnicas directas e indirectas.

¹ La variedad de café castillo tambo es una opción popular entre los productores de café debido a su resistencia a enfermedades y su adaptabilidad a diferentes condiciones de cultivo como lo explican en la investigación del efecto de la interacción temperatura inicial y tiempo de tueste en la calidad sensorial de seis variedades mejoradas de café [59].

3.3 MATERIALES PARA DESARROLLAR EL PROYECTO

3.3.1 CÁMARA MICASENSE REDEGE-M

La RedEdge-M es una cámara de alta gama especializada en imágenes multiespectrales, con la capacidad de capturar de forma simultánea cinco rangos de frecuencias simultáneas. Su función principal es generar imágenes detalladas y datos cuantitativos sobre el estado de salud y vitalidad de los cultivos [60]. Las características de dicha cámara se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3 Características de la cámara Micasense RedEdge-M. Fuente [61].

Especificación	Descripción
Peso	170 gramos (6 onzas) (incluye DLS y cable
Alimentación externa	9.4 cm * 6.3 cm * 4.6 cm (3.7 in * 2.5 * 1.8 in)
Bandas espectrales	Azul, Verde, Rojo, Nir, Red Edge (Obturador banda estrecha)
Salida de color RGB	Obturador global, alineado con todas las bandas
Distancia de muestra desde el suelo (GSD)	Mínimo: 2.1 cm por píxel (por banda) a 30 m Máximo: 8 cm por píxel (por banda) a 120 m
Velocidad de captura	Mínimo 1 captura por segundo (todas las bandas), RAW 12 bits
Interfaces	Serial, Ethernet 10/100/1000, Wi-fi exorable, disparador externo, GPS, SDHC
Campo de visión	47.2° HFOV
Opciones de disparo	Modo de temporizador, modo de superposición, modo de disparo externo (PWM, GPIO, serie y opciones de Ethernet), modo de captura manual
Temperaturas de función	De 50°C a 122°C
Ancho del sensor	4.8 mm por banda
Alto del sensor	6.3 mm por banda
Distancia focal	5.4 mm por banda
Resolución	Ancho 1280 pixeles * Alto 960 píxeles

3.3.1.1 Accesorios de la cámara Micasense RedEdge-M

La cámara Micasense RedEdge-M cuenta con una serie de características que la hacen altamente funcional. Estas incluyen un sensor de luz descendente (DLS) que proporciona mediciones precisas, un módulo GPS para una geolocalización precisa, un panel de reflectancia calibrada que garantiza resultados confiables y un estuche

rígido para protegerla durante su transporte. Puedes observar estas características en la figura 4.



Figura 4 Kit cámara Micasense RedEdge-M. Fuente autor.

- **Sensor de luz descendente (DLS):** El sensor de luz descendente (DLS) es un dispositivo de medición de 5 bandas que se conecta directamente a la cámara MicaSense RedEdge-M. Durante un vuelo, el DLS capta la luz ambiental de cada una de las cinco bandas espectrales de la cámara y almacena esta información en los metadatos de las imágenes que la cámara captura. Si se instala y calibra correctamente, la información recopilada por el DLS puede usarse para corregir los cambios de iluminación que pueden ocurrir durante el vuelo, como cuando las nubes obstruyen el sol [62]. El sensor de luz descendente (DLS) se puede apreciar en la figura 5.



Figura 5 Sensor de luz descendente (DLS) de la cámara Micasense RedEdge-M. Fuente autor.

- **Módulo GPS:** El módulo GPS, como se muestra en la figura 6, desempeña un papel crucial al proporcionar información de ubicación precisa, como latitud, longitud y altitud, a la cámara. Estos datos se guardan en los metadatos de cada imagen capturada en las distintas bandas. Además, el módulo GPS cuenta con un magnetómetro de tres ejes que mide la dirección magnética y proporciona datos sobre el campo magnético. Es importante realizar una calibración precisa del magnetómetro para asegurar la exactitud de los datos de dirección y evitar cualquier interferencia causada por los campos electromagnéticos presentes en la aeronave [63].



Figura 6 Modulo GPS de la cámara MicaSense RedEdge-M. Fuente autor.

- **Panel de reflectancia calibrada (CRP) modelo RP04:**
El Panel de Reflectancia Calibrada (CRP), representado en la figura 7, desempeña un papel fundamental en la calibración de las imágenes capturadas por la cámara. Este panel utiliza curvas de calibración específicas asociadas a cada CRP en el espectro visible e infrarrojo cercano. Estas curvas permiten obtener valores de reflectancia absoluta para cada longitud de onda, que abarcan el rango de 400 nm a 850 nm con incrementos de 1 nm. Estos valores de reflectancia, que se encuentran en un rango de 0.0 a 1.0, proporcionan una calibración precisa y confiable para las imágenes capturadas [64].



Figura 7 Panel de reflectancia calibrada CRP modelo RP04 de la cámara MicaSense RedEdge-M. Fuente autor.

3.3.2 CÁMARA MICASENSE REDEGE-MX BLUE

La cámara multispectral Micasense RedEdge-Mx Blue (ver figura 8) posee accesorios como lo son un sensor de luz descendente (DLS 2), panel de reflectancia y un estuche robusto.



Figura 8 Cámara multispectral Micasense RedEdge-Mx Blue. Fuente autor.

Las características de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 Características de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue. Fuente [65].

Especificación	Descripción
Peso	231,9 g (Cámara más DLS 2)
Dimensiones	8.3 cmx5.9cmx4.54cm
Alimentación externa	4.0 V DC – 15.8V DC 4W Nominal, 8,5W Pico
Bandas espectrales	Azul Costero 444(28), Verde 531(14), Rojo 650(16), Red Edge 705(10), Red Edge 740(18)
Salida Color RGB	3.6 MP (Obturador global, alineado con todas las bandas)
Distancia de muestra desde el suelo (GSD)	Mínimo: 4 cm por píxel (por banda) a 60 m Máximo: 8 cm por píxel (por banda) a 120 m
Velocidad de captura	Mínimo una captura por segundo (todas las bandas), RAW 12 bits
Interfaces	Serial, Ethernet 10/100/1000, Wi-Fi exorable, disparador externo, GPS, SDHC
Campo de visión	47.2° HFOV
Opciones de disparo	Modo de temporizador, modo de superposición, modo de disparo externo (PWM, GPIO, serie y opciones de Ethernet), modo de captura manual
Temperaturas de función	De 50 °C a 122 °C
Ancho del sensor	4.8 milímetros por banda
Alto del sensor	3.6 milímetros por banda
Distancia focal	5.4 milímetros por banda
Resolución	Ancho 1280 pixeles, Alto 960 pixeles

3.3.2.1 Accesorios de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue

- **Sensor de luz descendente (DLS 2):** El Sensor de Luz Descendente (DLS 2) es un sensor avanzado de luz incidente que se conecta directamente al sensor MicaSense (RedEdge 3, RedEdge-M, RedEdge-MX y Altum). Durante una misión, el DLS 2 registra la intensidad de la luz ambiente y el ángulo solar para cada una de las cinco bandas de la cámara. Estos datos se guardan en los metadatos de las imágenes TIFF capturadas por la cámara. Esta información puede utilizarse en herramientas especializadas de procesamiento, como Pix4Dmapper, para corregir cambios globales en la iluminación durante el vuelo, como los causados por la presencia de nubes que ocultan el sol. Además, el DLS 2 puede proporcionar datos GPS al

sensor MicaSense, a menos que ya se estén recibiendo datos GPS de una fuente externa [66]. Como se puede apreciar en la figura 9.



Figura 9 Sensor de luz descendente (DLS 2). Fuente autor.

- **Panel de reflectancia calibrada (CRP) modelo RP06:** El Panel de Reflectancia Calibrada (CRP), representado en la figura 10, desempeña un papel fundamental en la calibración de las imágenes capturadas por la cámara. Este panel utiliza curvas de calibración específicas asociadas a cada CRP en el espectro visible e infrarrojo cercano. Estas curvas permiten obtener valores de reflectancia absoluta para cada longitud de onda, que abarcan el rango de 400 nm a 850 nm con incrementos de 1 nm. Estos valores de reflectancia, que se encuentran en un rango de 0.0 a 1.0, proporcionan una calibración precisa y confiable para las imágenes capturadas [67].



Figura 10 Panel de reflectancia calibrada CRP modelo RP06 de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue.
 Fuente autor.

3.3.3 DRONE DJI PHANTOM 4

El dron Phantom 4, que se muestra en la figura 11, cuenta con características destacadas. Su sistema de transmisión Ocu Sync HD permite un cambio automático de frecuencia dual para una conexión estable y confiable. Además, está equipado con un sensor de 20 megapíxeles de tamaño de 1 pulgada, lo que le permite capturar imágenes de alta calidad y grabar videos en resolución 4K a una velocidad de 60 fotogramas por segundo. También ofrece un modo de ráfaga a una velocidad de 14 fotogramas por segundo.

Para una mayor seguridad durante el vuelo, el Phantom 4 cuenta con un sistema de Flight Autonomy que incluye sensores duales de visión trasera y sistemas de detección infrarroja. Estos sensores permiten la detección de obstáculos en cinco direcciones y evitan colisiones en cuatro direcciones, mejorando así la navegación y la prevención de accidentes durante el vuelo [68].



Figura 11 Drone Phantom 4. Fuente autor.

3.3.4 CLOROFILÓMETRO TYS-A

El medidor TYS-A de clorofila vegetal (figura 12) es capaz de evaluar el contenido de clorofila relativa en las plantas, expresado en unidades SPAD, lo que proporciona información sobre su nivel de "suavidad". Esto permite comprender las necesidades reales de nitrógeno de la planta y determinar si hay una deficiencia o exceso de este elemento en el suelo. Este instrumento es útil para optimizar la utilización de fertilizantes de nitrógeno y proteger el medio ambiente al evitar la aplicación excesiva de fertilizantes que puedan contaminar el entorno, especialmente las fuentes de agua [69].



Figura 12 Clorofilometro TYS A. Fuente autor.

El clorofilómetro TYS A cuenta con las siguientes especificaciones (ver tabla 5).

Tabla 5 Especificaciones Clorofilometro TYS A. Fuente [70].

Especificación	Descripción
Área de medición	10 mm
Modo de medición	Diferencia de concentración de 2 longitudes de onda de métodos ópticos
Sensores	Sensores
Modo de visualización: valor de medición	Pantalla de cristal líquido de 2 dígitos
Intervalo de medición mínimo	$< 2s$
Rango de medición	$0,0 - 99,9 \text{ SPAD}, -10 \sim 99,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Precisión	$\pm 3.0 \text{ SPAD}, -10 \sim 99,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Repetir	$\pm 0.3 \text{ SPAD}, \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura de funcionamiento	$-20 - 55^{\circ}\text{C}$
Potencia	Batería Li recargable de 4,2 V-2000 m Ah
Capacidad de memoria	30 datos, calcula automáticamente y muestra el promedio

3.3.5 ESPECTROFOTÓMETRO GENESYS™ 20

El espectrofotómetro GENESYS™ 20 (ver ilustración 13) es un instrumento fácil de usar que ejecuta mediciones de absorbancia, porcentaje de transmitancia y concentración dentro del rango de longitud de onda de 325 a 1100 nanómetros [71].



Figura 13 Espectrofotómetro GENESYS™ 20. Fuente autor.

Las especificaciones del espectrofotómetro GENESYS™ 20 se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6 Especificaciones Espectrofotómetro GENESYS™ 20. Fuente [72].

Especificaciones	Descripción
Longitud de onda	325 a 1100 nm
Ranura espectral	#8 mm
Estabilidad	#3 mA/hora
Energía parásita radiante	#0.1 %T, mediante a 320 y 400 nm
Repetibilidad de longitud de onda	√0.5nm
Exactitud de onda	√2.0nm
Ruido (@ 500 nm)	#1 mA a 0A y 2 mA 2 ^a pico-a-pico (15 segundos)
Exactitud fotométrica 0.0 a 0.3 A 0.3 A a 2.5 A	0.003 A 1.0 %
Rango fotométrico	0-125%T, -0.1-2.5A, 0-1999C
Vida de la lámpara	Visible: ~1000 horas
Rejilla de difracción	1200 líneas/mm
Salida de datos	∃ Pantalla de cristal líquido de dos líneas, 20-caracteres ∃ Salida RS232C ∃ Salida Centronica
Dimensiones	30 cm (12") An. X 33 cm (13") P. x 19 cm (7") Al.
Requisitos eléctricos	Seleccionados automáticamente; 100 a 240 Volts; 50 a 60 Hz, 1.0 Amp.

3.3.6 INSTRUMENTOS INFORMÁTICOS

Los instrumentos informáticos son aquellas aplicaciones y/o softwares necesarios para desarrollar el proyecto, como lo son:

- **SolidWorks:** Se trata de un programa informático de diseño asistido por computadora (CAD) diseñado específicamente para el modelado de componentes y ensamblajes mecánicos en dos y tres dimensiones. Esta herramienta también incluye paquetes de simulación que permiten analizar los esfuerzos mecánicos en las piezas o simular el movimiento de los

ensamblajes, con el fin de estudiar y validar el diseño antes de llevarlo a la fabricación [73].

- **Micasense Camera App:** Es una aplicación desarrollada por la empresa MicaSense que permite conectarse a las diferentes cámaras que fabrican, esta aplicación se puede utilizar desde un dispositivo móvil o computador, conectar, la aplicación ayuda a configurar el tiempo de obturación de la cámara, tiene indicadores de funcionamiento de los sensores y los accesorios de la cámara, además cuenta con una opción de Streaming donde se puede observar en vivo cada banda para verificar que todo esté funcionando correctamente [74].
- **DJI Go 4:** Esta aplicación facilita la conexión con drones fabricados por DJI a través de dispositivos móviles. Permite supervisar diversas características del dron, como el estado de la batería, la brújula, el número de satélites GPS y el cambio entre los modos manual y automático. Además, muestra la imagen de la cámara en la pantalla. Al utilizar por primera vez un dron de DJI, la aplicación proporciona asistencia para calibrar la brújula y garantizar un funcionamiento adecuado del dron [75].
- **DJI GS Pro:** Esta aplicación, desarrollada por DJI, comparte similitudes con la aplicación DJI Go4. Permite supervisar el estado del dron, llevar a cabo su calibración y controlarlo de manera efectiva. Además, ofrece la capacidad de diseñar misiones de vuelo o rutas automatizadas, incluso sin una conexión física al dron. Es posible crear y guardar múltiples misiones que se cargan en el dron para que éste las ejecute de manera autónoma. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta aplicación solo está disponible para dispositivos móviles con sistema operativo iOS [76].
- **PIX4D fields:** Es un software avanzado de mapeo agrícola para análisis aéreo de cultivos y agricultura digital [77].
- **RStudio:** Es una plataforma de desarrollo integrado (IDE) diseñada específicamente para el lenguaje de programación R, utilizado principalmente en análisis estadísticos y gráficos. Este entorno de trabajo ofrece una consola interactiva, un editor de código con resaltado de sintaxis y soporte para la ejecución de comandos, así como herramientas para trazar gráficos, depurar código y administrar el espacio de trabajo.

RStudio está disponible para diferentes sistemas operativos, como Windows, Mac y Linux, así como en navegadores web que se conectan a RStudio Server o RStudio Server Pro en sistemas Debian/Ubuntu, RedHat/CentOS y SUSE Linux.

La misión principal de RStudio es proporcionar un entorno informático completo para el lenguaje R, permitiendo a los usuarios realizar análisis de datos y desarrollar aplicaciones utilizando R de manera accesible y eficiente [78].

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE ACOUPLE PARA LOS SENSORES MULTIESPECTRALES AL VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

Primeramente, se requiere realizar una adaptación de las cámaras multiespectrales Micasense RedEdge-M y Micasense RedEdge-Mx Blue al dron Phantom 4, que originalmente no está diseñado para aplicaciones de agricultura de precisión. Para lograr esto, se utiliza el software de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks en su versión 2020.

Durante el proceso de adaptación, es crucial considerar aspectos fundamentales para garantizar un vuelo adecuado. Se debe respetar el centro de masa del dron y evitar obstruir los sensores de proximidad incorporados en el equipo. Para llevar a cabo esta adaptación, se recopiló información sobre un proyecto similar realizado previamente en la Corporación Universitaria ComfacaUCA UnicomfacaUCA.

En gran medida, se utiliza el diseño propuesto por [79] para la adaptación de la cámara multiespectral Micasense RedEdge-M, Micasense RedEdge-Mx Blue y sus accesorios. Sin embargo, se realizan modificaciones específicas para adaptar el DLS 2² de la cámara multiespectral Micasense RedEdge-Mx Blue.

- **CONEXIÓN Y ALIMENTACIÓN DE LAS CÁMARAS MULTIESPECTRALES:** Para asegurar el adecuado desempeño de la cámara Micasense RedEdge-M, es necesario conectarla al sensor DLS y al módulo GPS, según se ilustra en la figura 14.



Figura 14 Conexión sistema Micasense RedEdge M. Fuente [81].

² El sensor de luz descendente (DLS 2) es una tecnología avanzada que se conecta directamente a los sensores MicaSense, como RedEdge 3, RedEdge-M, RedEdge-MX y Altum. Durante el vuelo, el DLS 2 mide la luz ambiental y el ángulo solar para cada banda de la cámara, registrando estos datos en los metadatos de las imágenes TIFF capturadas [80].

Para garantizar el correcto funcionamiento de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue, es esencial conectarla al sensor DLS 2, como se muestra en la figura 15.

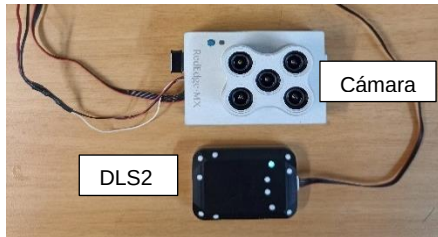


Figura 15 Conexión sistema Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.

Para garantizar un rendimiento óptimo, se decidió alimentar tanto la cámara multiespectral como el DLS 2 de forma externa, evitando así aumentar la carga nominal de la batería del drone.

Con este fin, se utilizó una batería lipo de 9.9 V y se implementó un módulo regulador DC-DC LM2596 para proteger los componentes, tal como se especifica en el trabajo del cual se recopiló la mayor parte de la información (ver figura 16 y 17).

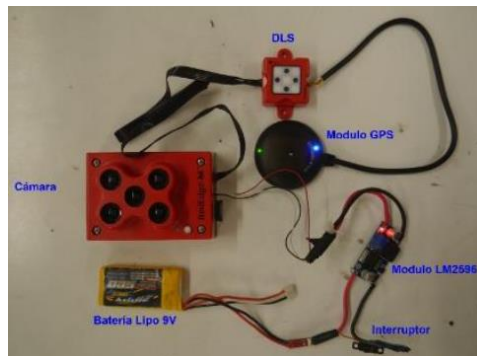


Figura 16 Montaje del circuito de alimentación con el sistema Micasense M. Fuente [82].

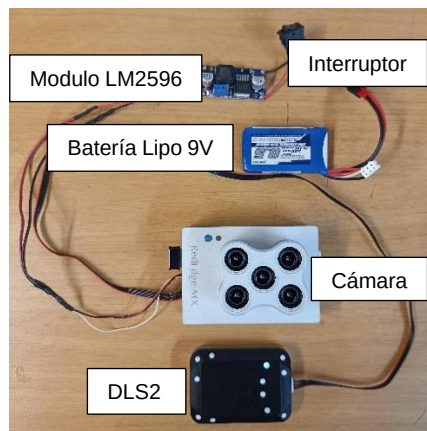


Figura 17 Montaje del circuito de alimentación con el sistema Micasense Mx Blue. Fuente autor.

- **SISTEMA TREN DE ATERRIZAJE:** Basado en el diseño implementado por [83] se hace la revisión del mismo (figura 18), para luego realizar la impresión 3D en material PLA 1.75 mm (figura 19), esto con el fin de evitar roces de la cámara con el suelo al momento del despegue y aterrizaje.

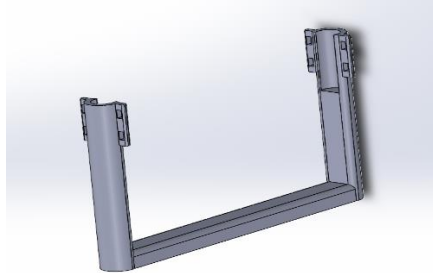


Figura 18 Diseño extensión sistema de aterrizaje para drone Phantom 4. Fuente autor.



Figura 19 Extensión sistema de aterrizaje para drone Phantom 4. Fuente autor.

- **SOPORTE CÁMARA MULTIESPECTRAL (M-Mx Blue):** Basado en el diseño implementado por [84] se hace la revisión del mismo (figura 20), posteriormente se realiza la creación del diseño en la cortadora láser (figura 21), para esto el material utilizado fue MDF 5 mm, es necesario este soporte ya que el drone no viene diseñado para incorporar cámaras.

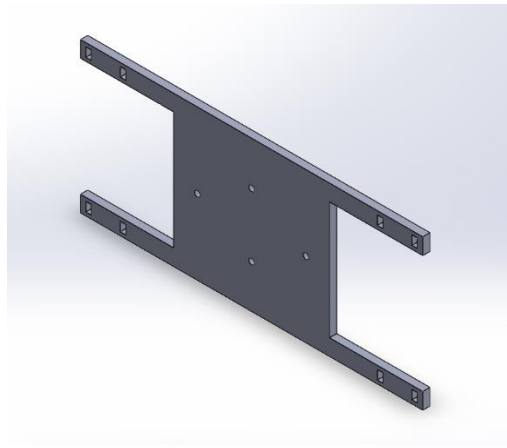


Figura 20 Diseño soporte cámara multiespectral. Fuente autor.

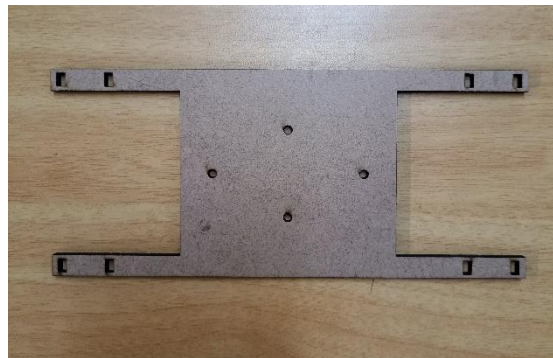


Figura 21 Soporte cámara multiespectral. Fuente autor.

- SOPORTE SENSOR DLS, DLS 2, MÓDULO LM2596, MÓDULO GPS Y BATERÍA LIPO:** Utilizando el diseño propuesto por [85] como base (figura 22), se realizó una modificación en la sección superior donde se encuentra el DLS 2 (figura 23). Posteriormente, se llevó a cabo la impresión 3D del diseño utilizando el material PLA de 1.75 mm (figura 24 y 25).

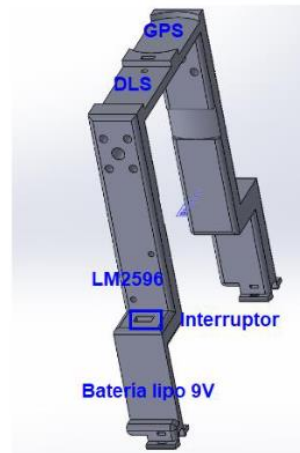


Figura 22 Diseño soporte sensor DLS y módulo GPS. Fuente [86].

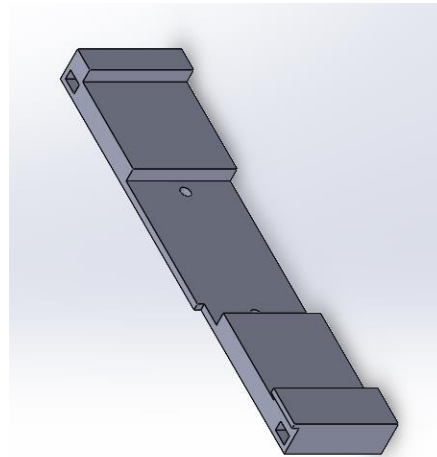


Figura 23 Diseño soporte sensor DLS 2. Fuente autor.



Figura 24 Soporte sensor DLS y módulo GPS. Fuente [87]

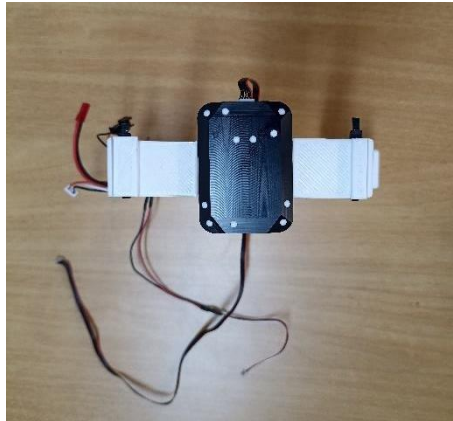


Figura 25 Soporte sensor DLS 2. Fuente autor.

Posteriormente en la figura 26 se aprecian los soportes utilizados de base en conjunto con la modificación realizada a la parte superior del diseño

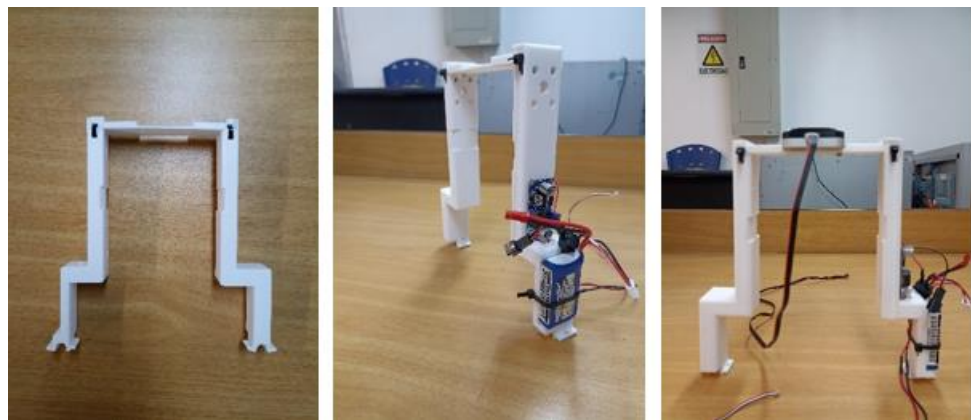


Figura 26 Soporte DLS 2, módulo LM2596 y batería lipo 9.9v. Fuente autor.

3.5 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE ADAPTACIÓN PARA LAS CÁMARAS MULTIESPECTRALES

Para el ensamble del sistema de acople al drone se desarrolló de la siguiente manera:

- **Instalación del sistema de aterrizaje:** Inicialmente, se coloca la extensión del tren de aterrizaje en el dron DJI Phantom 4, utilizando amarras plásticas para fijar la pieza al tren de aterrizaje, conforme se muestra en la figura 27.



Figura 27 Instalación sistema de aterrizaje. Fuente autor.

- **Montaje cámaras multispectrales al drone:** Para colocar las cámaras multispectrales al drone, inicialmente se fija la cámara a la segunda parte del acople utilizando los tornillos proporcionados, según se muestra en la figura 28 y 29.



Figura 28 Ensamble cámara Micasense RedEdge Mx Blue a la base de sujeción. Fuente autor.



Figura 29 Ensamble cámara Micasense RedEdge M a la base de sujeción. Fuente [88].

Después de completar este paso, se asegura la segunda pieza al tren de aterrizaje del dron, de manera que las cámaras multispectrales queden posicionadas debajo de la cámara del dron sin afectar su movimiento, como se muestra en la figura 30 y 31.



Figura 30 Instalación cámara Micasense Red Edge Mx Blue al dron. Fuente autor.

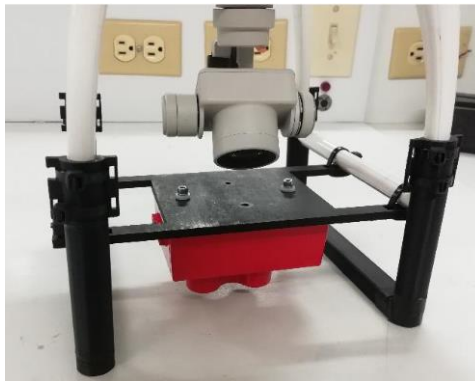


Figura 31 Instalación cámara Micasense Red Edge M al dron. Fuente [89].

- **Montaje del circuito de alimentación:** El montaje implica la unión de los elementos del circuito de alimentación en conjunto con las cámaras multispectrales y sus elementos adicionales (DLS y Modulo GPS para la cámara Micasense RedEdge M y DLS 2 para la cámara Micasense RedEdge Mx Blue) a la tercera parte del sistema de acople. En primer lugar, se coloca el interruptor, el módulo LM2596 y la batería lipo de 9V en la parte tres del sistema de acople, según se ilustra en la figura 32.

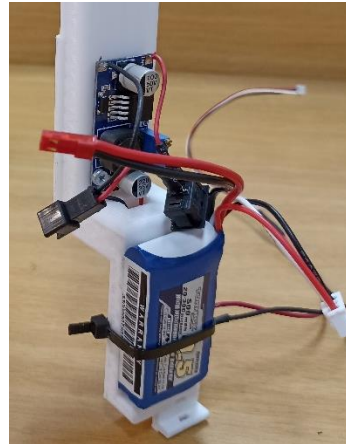


Figura 32 Instalación del circuito de alimentación externa. Fuente autor.

Seguidamente se instalan el sensor DLS, modulo GPS y DLS 2 en sus respectivos soportes para posteriormente ubicarlos en el drone teniendo en cuenta que al momento de la instalación se deben posicionar los soportes de tal manera que no choquen las hélices del drone con los soportes (ver figura 33, 34, 35 y 36).



Figura 33 Instalación circuito de alimentación para cámara Micasense RedEdge Mx Blue al drone. Fuente autor.



Figura 34 Ensamble completo de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue al drone. Fuente autor.



Figura 35 Instalación circuito de alimentación para cámara Micasense RedEdge M al drone. Fuente [90].



Figura 36 Ensamble completo para la cámara Micasense RedEdge M al drone. Fuente [91].

Para el desarrollo del proyecto en su totalidad, la toma de datos desempeña un papel fundamental. La calidad y la efectividad de la toma de datos pueden tener un impacto significativo en los resultados y conclusiones que se obtienen. Existen dos enfoques principales para recopilar datos: técnicas directas e indirectas.

3.6 TOMA DE DATOS MEDIANTE TÉCNICA INDIRECTA

3.6.1 DISEÑO DEL PLAN DE VUELO

La etapa de planificación del vuelo se realiza como preparación previa a la adquisición de información durante el vuelo. Esta etapa comienza identificando la zona de vuelo, es decir, el área del cultivo que se debe cubrir. Además, se establecen los parámetros de vuelo y variables relevantes, como la altitud, el solapamiento entre imágenes, el número de líneas de vuelo y la resolución esperada en las imágenes.

Estos valores se introducen en la herramienta informática DJI GS Pro, la cual se encarga de generar un plan de vuelo óptimo para el cultivo en estudio.

- **Zona de Vuelo**

Dado que el lote donde se llevó a cabo el estudio tiene una forma irregular, se decidió tomar las medidas máximas de dos lados con el fin de obtener un área rectangular que abarque todo el terreno, tal como se muestra en la figura 37.



Figura 37 Zona de vuelo. Fuente autor.

● Parámetros de vuelo

Al establecer la zona de vuelo, se llevan a cabo cálculos de diversos parámetros, que incluyen las rutas de vuelo, la altitud de vuelo, la velocidad del dron, la cobertura del terreno en las imágenes y la superposición entre ellas.

El primer parámetro que se determina es la Resolución Espacial en el Terreno (GSD, por sus siglas en inglés) de las cámaras MicaSense RedEdge-M y MicaSense RedEdge-Mx Blue, a alturas específicas para cada cámara. En este caso, se utilizó la altura mínima recomendada para cada cámara (30m para MicaSense RedEdge-M y 60m para MicaSense RedEdge-Mx Blue), lo cual garantiza un GSD de 2.1 cm por píxel para la cámara MicaSense RedEdge-M y un GSD de 4.2 cm por píxel para la cámara MicaSense RedEdge-Mx Blue.

Para corroborar lo anterior se aplica la ecuación 1 descrita por [92] con los parámetros de cada cámara (ver tablas 3 y 4).

$$GSD = \frac{4.8 \text{ mm} * 30 \text{ m} * 100}{5.4 \text{ mm} * 1280 \text{ pixel}} = 2.1 \text{ cm/pixel}$$

$$GSD = \frac{4.8 \text{ mm} * 60 \text{ m} * 100}{5.4 \text{ mm} * 1280 \text{ pixel}} = 4.2 \text{ cm/pixel}$$

Después de haber determinado el GSD para ambas cámaras, se lleva a cabo el cálculo del ancho y alto de huella utilizando las ecuaciones 2 y 3 [93].

$$\text{Ancho de huella} = \frac{2.1 \frac{\text{cm}}{\text{pixel}} * 1280 \text{ pixel}}{100} = 26.88 \text{ m}$$

$$\text{Alto de huella} = \frac{2.1 \frac{\text{cm}}{\text{pixel}} * 960 \text{ pixeles}}{100} = 20.16 \text{ m}$$

$$\text{Ancho de huella} = \frac{4.2 \frac{\text{cm}}{\text{pixel}} * 1280 \text{ pixel}}{100} = 53.76 \text{ m}$$

$$\text{Alto de huella} = \frac{4.2 \frac{\text{cm}}{\text{pixel}} * 960 \text{ pixeles}}{100} = 40.32 \text{ m}$$

Los datos arrojados indican que cada imagen tomada por la cámara Micasense RedEdge-M tendrán una huella de **26.88m*20.16 m** y **53.76m*40.32 m** para la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue.

Al tener un área de estudio pequeña para facilitar el muestreo en campo se abarca un área mayor con los vuelos para de esta manera aprovechar tanto el ancho como el alto de huella para ambas cámaras, de igual modo se toma el ancho y alto de huella mayor el cual es de la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue.

Siguiendo las pautas de [94] al determinar las líneas de vuelo, se considera tanto la huella del terreno como el nivel de solapamiento deseado. En este estudio, se estableció un solapamiento estándar del 75%, lo que implica que las imágenes capturadas compartirán un 75% de información común. En este caso, al considerar los valores de ancho y alto más grandes entre las dos cámaras, se opta por proponer un área específica en la cual la altura de la huella cubra la altura del terreno a estudiar. Esto permite que solo sea necesaria una línea de vuelo ubicada en el centro del terreno. Sin embargo, si se tratara de un terreno con un área de estudio más amplia, se aplicaría la siguiente ecuación:

$$\text{Separación de líneas} = \text{Ancho huella}(m) * \left(1 - \left(\frac{\% \text{ de solapamiento lateral}}{100} \right) \right)$$

Esta ecuación permitirá determinar la distancia entre las líneas de vuelo y el número de líneas necesarias, según el solapamiento declarado.

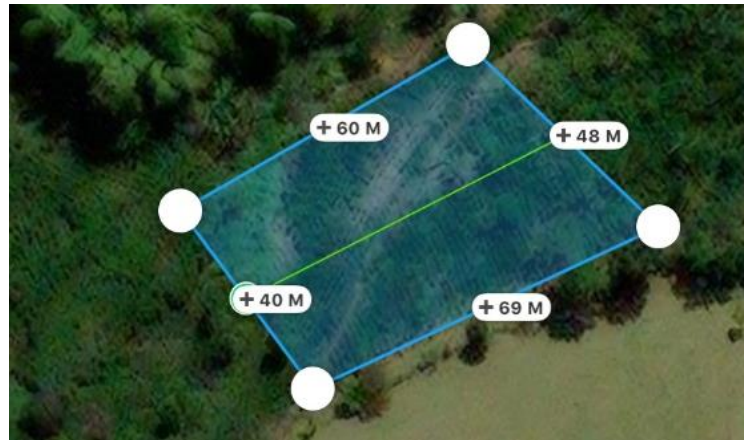


Ilustración 24 Línea de vuelo. Fuente autor.

Para determinar la velocidad de vuelo, se considera la altura de la huella de la imagen, el solapamiento previamente establecido del 75% y el tiempo de obturación de las imágenes. Se debe aplicar la ecuación de Base en el aire para determinar la distancia que hay entre la toma de cada imagen.

$$Base\ en\ el\ Aire = 40\ m * \left(1 - \left(\frac{75\%}{100}\right)\right) = 10\ m$$

Utilizando la base en el aire entre las imágenes, se aplica la ecuación velocidad de vuelo. Para este proceso, se estableció un tiempo de obturación de 2 segundos, lo que arroja el siguiente valor calculado.

$$Velocidad\ de\ vuelo\ \left(\frac{m}{s}\right) = \frac{10\ m}{2\ s} = 5\ m/s$$

- **Desarrollo del plan de vuelo**

Para elaborar el plan de vuelo, es fundamental contar con la georreferencia precisa de la zona de muestreo. En este caso, se obtuvieron los datos GPS de diez árboles seleccionados al azar (ver figura 38), a partir de su ubicación se determinó el área que será cubierta durante el vuelo.

1. Puntos GPS



Figura 38 Ubicación georreferenciada de árboles estudiados. Fuente autor.

Como se puede apreciar en la ilustración 25, se asignó un código a cada árbol con el fin de realizar un seguimiento de las muestras tomadas a lo largo de todo el proceso.

A cada árbol con su respectivo código se le tomó la ubicación geográfica, la cual se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7 Coordenadas árboles. Fuente autor

Árbol	Latitud	Longitud
240	2.4547835	-76.6772355
316	2.4548302	-76.6772364
318	2.4547476	-76.6772648
461	2.4548236	-76.6772779
664	2.4548041	-76.6772057
684	2.4547895	-76.6772942
845	2.4547559	-76.6773024
965	2.4547070	-76.6772897
1544	2.4548035	-76.6772616
1807	2.4547546	-76.6772172

2. Diseño misión de vuelo en aplicación DJI GS Pro

Para crear la misión, se empleó la aplicación DJI GS Pro. El procedimiento se describe a detalle en el anexo 2.

3.6.1.1 Ejecución del vuelo

Al realizar la planificación de la misión de vuelo en la aplicación DJI GS Pro, se genera la Tabla 8 que muestra los parámetros definitivos de las ejecuciones del vuelo.

Tabla 8 Parámetros definitivos de vuelo. Fuente autor.

Parámetro	Valor
Altura de vuelo	30 y 60 m
Velocidad de vuelo	2.5 y 5 m/s
Solapamiento	75%
GSD	2.1 y 4.2 cm/pixel
Hora de vuelo	12:00-12:30 pm y 12:40-1:10 pm

Se estableció un horario de vuelo entre las 12:00 y las 1:10 pm aproximadamente, basándose en la ubicación del sol con menor sombra. Esta elección se hizo con el objetivo de capturar imágenes del cultivo de estudio con la menor cantidad de sombras posible, lo que permitiría obtener resultados más precisos. Además, se consideró el tiempo necesario para realizar el cambio de cámaras en el dron.

El proceso de implementación del plan de vuelo comienza con la calibración del dron DJI Phantom 4, el procedimiento se describe a detalle en el anexo 3.

Posteriormente, se lleva a cabo la instalación de la cámara Micasense RedEdge-MX Blue y Micasense RedEdge M, el proceso de instalación se debe hacer para una cámara por vuelo.

Utilizando el sistema de acoplamiento diseñado específicamente para el dron, al finalizar este proceso, se encienden las cámaras y se establece la conexión con la aplicación web Micasense Camera App para comprobar que todo esté correctamente conectado y funcionando adecuadamente (figura 39).

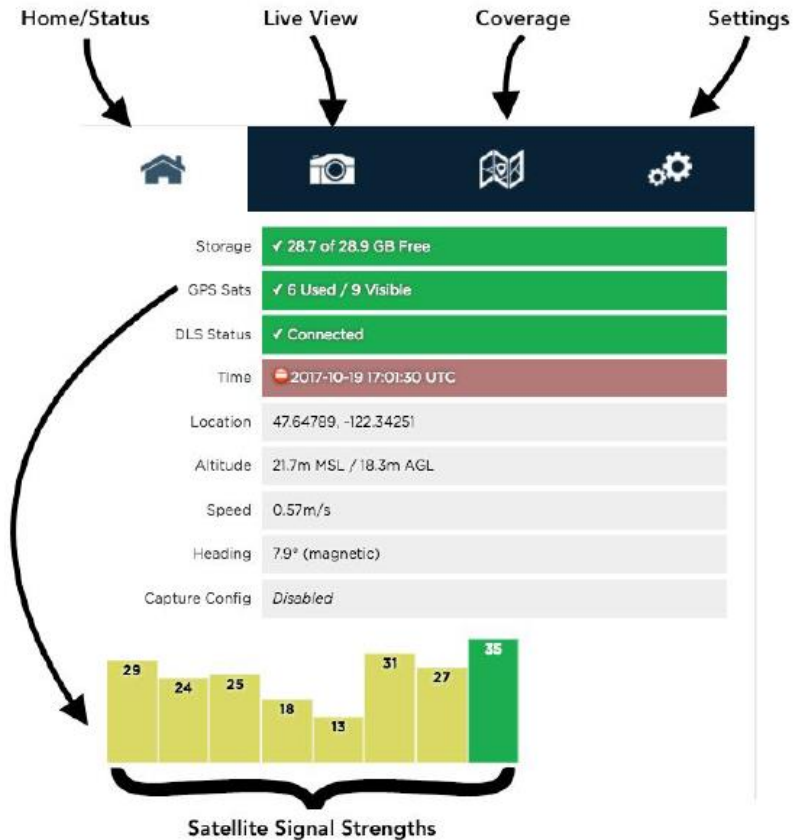


Figura 39 Página Home Micasense Camera App. Fuente [95].

Una vez instalada la cámara en el drone DJI Phantom 4, se toman fotografías del panel de reflectancia calibrada, tal y como se ilustra en la figura 40, antes de iniciar el vuelo. Estas imágenes son indispensables para llevar a cabo la corrección radiométrica de las imágenes capturadas durante el vuelo, lo cual es crucial para lograr un procesamiento y tratamiento adecuado de las mismas.



Figura 40 Captura del panel de reflectancia. Fuente [96].

Después, se procede a ajustar la configuración del tiempo de exposición de la cámara Micasense Red Edge M y MX Blue a través de la aplicación web Micasense Camera App, tal y como se indica en la figura 41. Una vez configurado, se guarda la configuración pulsando el botón "Save" y se inicia la captura de imágenes al presionar el botón "Start".

The image shows the 'Basic Configuration' screen of the Micasense Camera App. At the top, there is a dark blue navigation bar with four icons: a house, a camera, a map, and a gear. Below the navigation bar, the title 'Basic Configuration' is displayed with an upward arrow. The main configuration area has a light gray background. It includes a dropdown menu for 'Auto-Capture Mode' set to 'Timer', a text input for 'Timer Period (sec)' set to '2', and a checkbox for 'Manual Exposure' which is currently unchecked. A green 'Save' button is located to the right of the 'Manual Exposure' checkbox. At the bottom, it shows 'Timer Autocapture: Not Running' and a green 'Start' button with a right-pointing arrow.

Figura 41 Configuración cámara Micasense. Fuente: autor.

Una vez que la cámara ha sido configurada e iniciada, se enciende el drone DJI Phantom 4 y se despega utilizando la aplicación DJI GS Pro hasta alcanzar una altura aproximada de 10 metros. Mientras el drone se encuentra en vuelo, se activa el modo automático para enviar la misión al drone, simplemente presionando el icono "Fly" en la aplicación.

Después, la aplicación realiza una verificación para asegurarse de que todo esté funcionando correctamente en el drone, tal y como se muestra en la figura 42. Una vez confirmado, se presiona el botón "Start to fly". Esto permitirá que el drone lleve a cabo la misión de manera segura y sin contratiempos.

Prepare for flight		
✓ Phantom 4	P Mode Obstacle avoidance is enabled	Disable obstacle avoidance
✓ Dist. from flight area	Approx 358.6 M	
⚠ GPS	No.: 12 Level: Good This mission is located inside of the Restricted Area, please enable the Area in Fly Zone Manager, or contact with flysafe@dji.com	Fly Zone Manager
✓ Compass & IMU	Normal	
✓ Battery	1 Battery connected, 93% (16.75V), 44°C	
✓ Gimbal	Current: -89.9°, Target: -90.0°	
✓ Camera	Phantom 4 Camera (AUTO 1/100) Please mind the Exposure Mode	
✓ SD Card	Remaining: 749 Mission will capture: 351 approx.	
✓ End-Mission Action	Go Home Altitude is 100 M	
✓ Waypoint	Data transmitted	
Cancel		Start to fly

Figura 42 Ventana de verificación estado drone.. Fuente autor.

Una vez finalizada la misión, el drone regresa automáticamente al punto de despegue, también conocido como "retorno a casa". Sin embargo, en este caso se ha asignado que el drone se quede a la misma altura tras finalizar el vuelo para evitar posibles colisiones con los árboles en la zona de estudio. En este momento, se vuelve a la aplicación DJI GS Pro y se cambia al modo manual para realizar un aterrizaje seguro. A continuación, se retira la cámara Micasense RedEdge M o MX Blue del drone DJI Phantom 4 y se extrae la información capturada. (ver figura 43 y 44).



Figura 43 Evidencia de vuelo ejecutado. Fuente autor.



Figura 44 Evidencia de vuelo ejecutado. Fuente autor.

3.7 TOMA DE DATOS MEDIANTE TÉCNICAS DIRECTAS

3.7.1 MUESTREO MEDIANTE CLOROFILOMETRO

Después de finalizar los vuelos y realizar la captura de imágenes mediante cámaras multiespectrales, se llevó a cabo la medición de la clorofila presente en 10 árboles seleccionados al azar, tal como se muestra en la figura 45. Siguiendo la metodología usada por Solís y Luna en [97].



Figura 45 Ubicación georreferenciada de árboles a muestrear. Fuente autor.

En el proceso de muestreo, se conformó un grupo de árboles seleccionados para llevar a cabo el estudio. Estos árboles se mantuvieron consistentes a lo largo de todo el procedimiento, asegurando así la uniformidad de las especies muestreadas. No obstante, se garantizó que en cada ocasión no se tomarán muestras de las mismas hojas, con el fin de obtener una representación más completa y diversa de los árboles seleccionados.

Para cada árbol incluido en el muestreo, se recolectaron tres datos diferentes, uno correspondiente a cada hoja seleccionada. Estos datos se obtuvieron durante dos días específicos a la semana, durante un período continuo de cuatro semanas. Este enfoque temporal permitió recopilar información en diferentes momentos,

abarcando así posibles variaciones que pudieran influir en los resultados del estudio.

Durante el proceso de muestreo, se utilizó un clorofilómetro para registrar la información relevante. En cada día de muestreo, se seleccionó el mismo árbol para tomar las muestras, pero se eligieron hojas diferentes en cada ocasión. Este enfoque aseguró que se considerará la variabilidad intrínseca entre las hojas del mismo árbol y evitó sesgos que pudieran afectar la calidad de los datos recopilados.

El clorofilómetro fue una herramienta esencial para medir y registrar los niveles de clorofila en las hojas, lo cual proporcionó información valiosa sobre la salud y el estado fisiológico de los árboles muestreados. Esta información, junto con los datos recolectados de las diferentes hojas, se utilizó posteriormente para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

Finalmente, el procedimiento de muestreo consistió en seleccionar un conjunto de árboles, mantenerlos constantes durante todo el proceso, recolectar tres datos diferentes por cada árbol a muestrear, uno por hoja, durante dos días a la semana durante un período de cuatro semanas. Además, se utilizó un clorofilómetro para registrar la información pertinente, considerando siempre diferentes hojas del mismo árbol en cada día de muestreo. Esta metodología rigurosa permitió obtener datos confiables y representativos para el estudio en cuestión.

3.7.2 MUESTREO MEDIANTE LABORATORIO

Después de completar la toma de datos con el clorofilómetro, el siguiente paso consiste en recolectar tres hojas adicionales por árbol, diferentes de las previamente muestreadas. Estas hojas deben empacarse en bolsas ziploc junto con agua destilada y colocadas en una nevera de icopor a una temperatura de 4 °C. De esta manera, se logra mantener la frescura y las propiedades de las hojas durante el traslado al laboratorio, donde se llevará a cabo el procesamiento mediante espectrofotometría.

En este proceso, se siguieron las directrices proporcionadas por [6], que se basan en [55]. El procedimiento consistió en triturar el tejido vegetal utilizando acetona al 90% y luego realizar una centrifugación. A continuación, se tomaron 50 mg de la muestra del tejido vegetal y se añadieron 15 ml de acetona al 90%. Después de macerar la muestra, se ajustó el volumen a 6,5 ml con el mismo solvente. Se tuvo especial cuidado en evitar muestras que contuvieran la nervadura principal y se seleccionaron aquellas con el menor número de ramificaciones secundarias en las hojas. Seguidamente, se midió la absorbancia (E) de las muestras a diferentes longitudes de onda: 644 nm, 661 nm, 664 nm y 647 nm. Posteriormente, utilizando

las ecuaciones adecuadas descritas en [98], se calculó el contenido de clorofila a (Chl A) y clorofila b (Chl B) de cada muestra en $\mu\text{g/ml}$.

$$\text{Chl } a \left(\frac{\text{mg}}{\text{ml}} \right) = 11.93E_{644} - 1.93E_{647}$$

$$\text{Chl } b \left(\frac{\text{mg}}{\text{ml}} \right) = 20.36E_{647} - 5.50E_{664}$$

Al igual que con el muestreo anterior, este procedimiento se llevó a cabo durante dos días a la semana, durante cuatro semanas. De esta manera, se estableció una secuencia lineal de los procesos, que se inician con la toma de imágenes multiespectrales, seguidas de la toma directa de datos con el clorofilómetro, y finalizando con el procedimiento de laboratorio.

3.8 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Después de finalizar los vuelos, muestreo en campo y procesamiento en laboratorio, se realiza el procesamiento de las imágenes multiespectrales utilizando el software Pix4D Fields. Este software permite cargar las imágenes capturadas por las cámaras Micasense RedEdge M y MX Blue en su interfaz, lo que facilita la obtención de índices normalizados de vegetación.

El proceso resulta ser muy dinámico y amigable para el usuario, ya que Pix4D Fields ofrece una experiencia de uso intuitiva. Para iniciar el proceso, simplemente se abre el icono de Pix4D Fields, tal como se muestra en la figura 53.

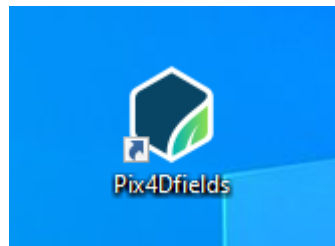


Figura 46 Pix4D Fields. Fuente autor.

Al iniciar el programa, se mostrará la interfaz principal (figura 46), donde el primer paso consiste en hacer clic en "Nuevo proyecto".

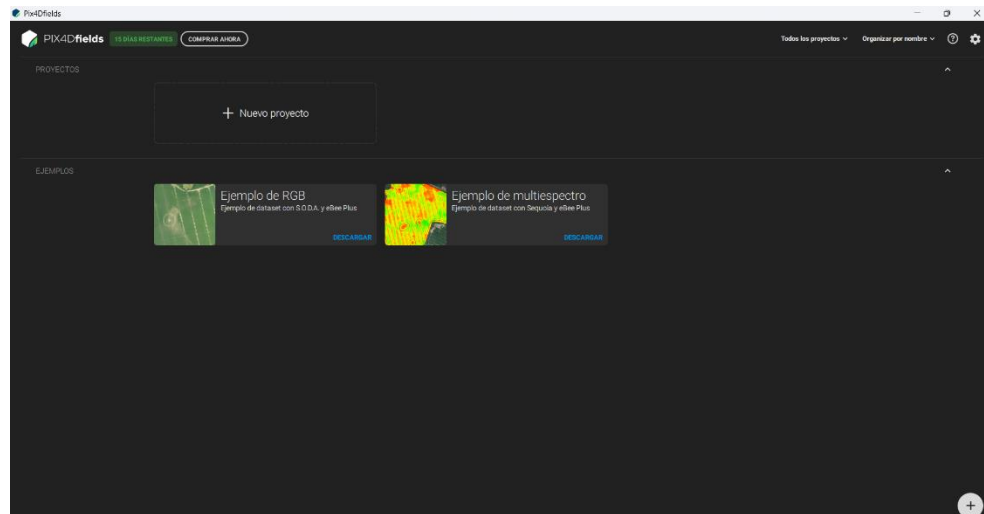


Figura 47 Interfaz principal Pix4D. Fuente autor.

A continuación, aparecerá la sección de carga de archivos (figura 48), en la cual debemos seleccionar el ítem que mejor se adapte a nuestro proyecto. Dado que las fotos fueron tomadas con drones, se elige la opción "Capturado por dron".

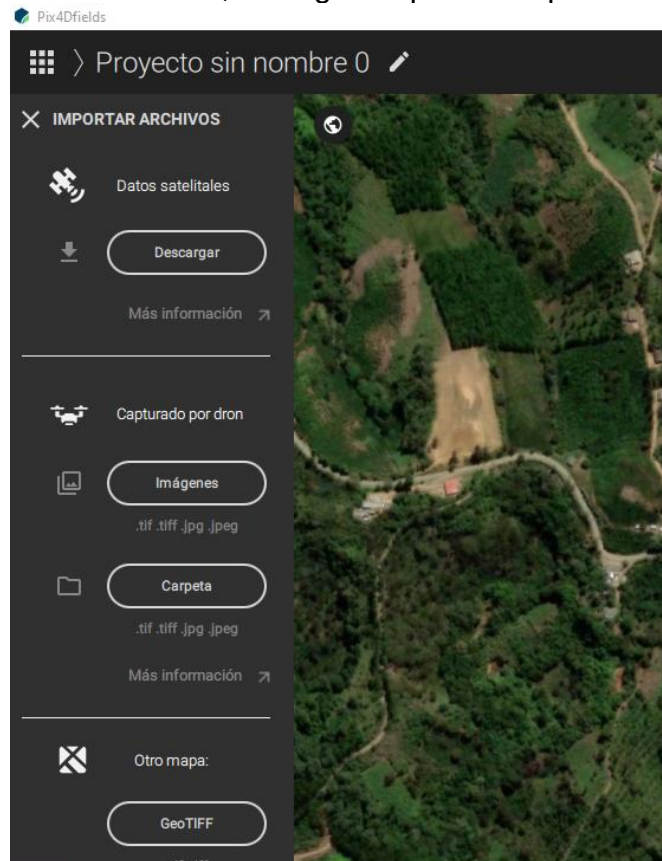


Figura 48 Cargar imágenes. Fuente autor.

Es importante destacar que el programa debe contar con las imágenes del panel de reflectancia capturadas al inicio de cada vuelo. Estas imágenes son esenciales para llevar a cabo la calibración radiométrica correspondiente de manera automática. Esta calibración automática mejora significativamente la precisión y calidad de los resultados obtenidos durante el proceso de análisis y procesamiento de datos.

Una vez cargadas las imágenes el software muestra una ventana (figura 49) donde se deben configurar las opciones de procesamiento según los requerimientos del usuario.

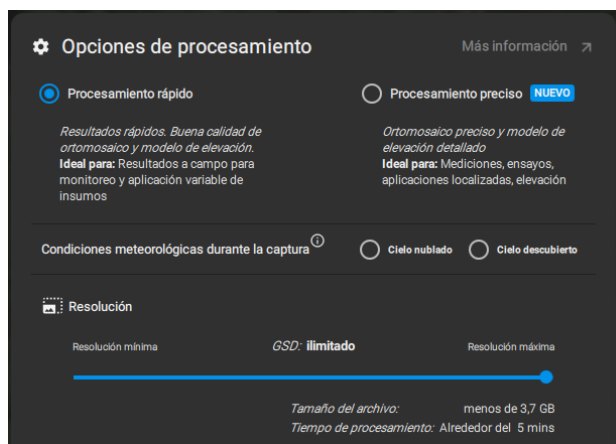


Figura 49 Opciones de procesamiento. Fuente autor.

Una vez que se hayan configurado las opciones de procesamiento de acuerdo a las necesidades del usuario, el tiempo de procesamiento de las imágenes dependerá de los parámetros seleccionados y la cantidad de imágenes cargadas en el programa. Al finalizar el proceso, se obtendrá el ortomosaico y la interfaz para generar los índices normalizados de vegetación. Esta interfaz permite utilizar los índices predeterminados que proporciona el software, así como la posibilidad de generar índices personalizados según las preferencias del usuario. El software también permite seleccionar una zona determinada y fijar unos puntos guiados por coordenadas como se muestra en la figura 50.



Figura 50 Interfaz de trabajo Pix4D. Fuente autor.

En la ilustración 57, en la parte superior izquierda, se encuentra una sección denominada "Índice". Esta sección permite la aplicación de índices normalizados de vegetación al ortomosaico que ha sido previamente cargado. Aquí se presentan algunos índices predeterminados, los cuales pueden ser utilizados según las necesidades del usuario. Además, el software ofrece la posibilidad de generar nuevos índices, como se muestra en las figuras 51 y 52.

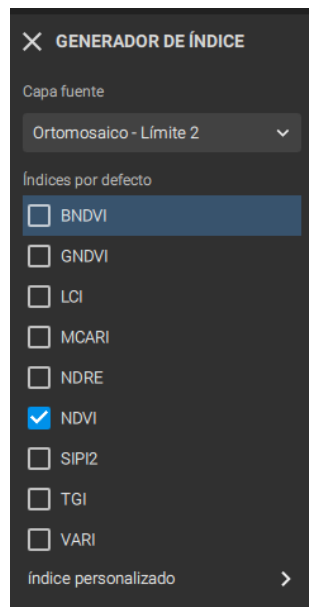


Figura 51 Generador de Índice Fuente autor.

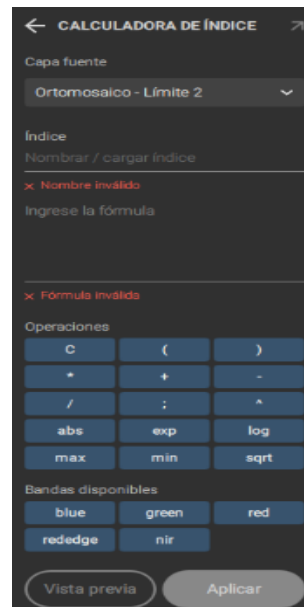


Figura 52 Índice personalizado. Fuente autor.

En la figura 50, se encuentra en la parte superior derecha una opción para exportar diversos elementos (figura 53) una vez que el trabajo de aplicar los índices requeridos y ajustar los parámetros necesarios ha sido completado satisfactoriamente.

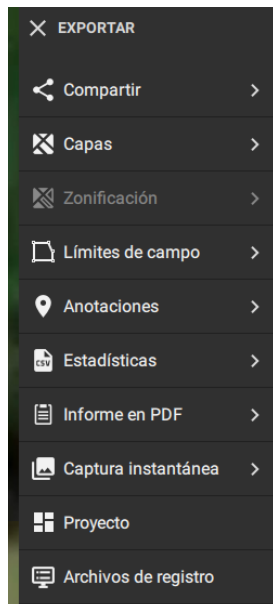


Figura 53 Exportar Pix4D. Fuente autor.

Para este proyecto, se generaron informes en formato PDF correspondientes a cada vuelo realizado, lo que resultó en un total de 16 informes. De estos, 8 informes se refieren a la cámara Micasense RedEdge M, mientras que los otros 8 informes corresponden a la cámara Micasense RedEdge MX Blue. El resultado final fue la creación de una base de datos que contiene información sobre 18 índices normalizados de vegetación para cada cámara, obtenidos durante cada vuelo individual realizado con ellas.

4 CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE CLOROFILA PARA DETERMINAR LAS CORRELACIONES ENTRE LAS TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN

Se llevó a cabo un análisis estadístico preliminar de los datos obtenidos, que incluyó la eliminación de valores atípicos, el preprocesado de datos y un análisis descriptivo. Primeramente, se debe hacer un análisis de normalidad en los datos, para verificar dicha normalidad, se utilizó la prueba de Kolmogórov-Smirnov³ (KS) puesto que el tamaño de la muestra es superior a 50 observaciones [99].

Cabe mencionar que, la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) se utiliza para determinar si una muestra de datos sigue una distribución específica o si difiere significativamente de ella, es una prueba estadística que se utiliza para evaluar la adhesión de los datos a una distribución teórica, lo que se conoce como prueba de bondad de ajuste; ésta ayuda a determinar si los datos se ajustan a una distribución teórica o si hay diferencias significativas entre los datos observados y los esperados según esa distribución. Esta prueba, también se ha utilizado en otras investigaciones [100].

Al finalizar la prueba de normalidad de los datos se obtuvo como resultado las siguientes tablas. En la tabla 9, que corresponde a la normalidad observada por la cámara Micasense RedEdge M se evidencia un comportamiento no normal de los índices de vegetación NDVI, ARVI 2, BNDVI, IPVI y SIPI.

Tabla 9 Tabla de normalidad cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.

Micasense RedEdge M			
Variable de estudio	Valor p	Estadístico de prueba KS	Tipo de normalidad
NDVI	0,0008	0,21803	No normal
GNDVI	0,35051	0,10214	Normal
GVRI	0,98701	0,04854	Normal
NDRE	0,51759	0,08929	Normal
ARVI	0,00929	0,1807	Normal
ARVI 2	0,00078	0,21848	No normal

3

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es comúnmente empleada para evaluar la normalidad de datos de muestra. Se utiliza de manera especialmente beneficiosa en situaciones de procesos físicos que son no lineales e interactivos. Estos procesos tienden a generar distribuciones no gaussianas, y al examinar la distribución de las variables seleccionadas, es posible obtener una comprensión más precisa del mecanismo generador de dichos procesos [101].

BNDVI	0,00679	0,18592	No normal
CIG	0,98701	0,04854	Normal
DVI	0,35299	0,10192	Normal
EVI	0,15992	0,12354	Normal
GARI	0,38621	0,09913	Normal
GEMI	0,07087	0,14228	Normal
GLI	0,68297	0,07818	Normal
GRNDVI	0,08086	0,13942	Normal
IPVI	< 0,00001	0,31414	No normal
LCI	0,21927	0,11544	Normal
MCARI	0,31231	0,10558	Normal
SIPI	0,00528	0,19	No normal
Promedio SPAD	0,74348	0,07411	Normal
Promedio Clorofila A	0,92428	0,05939	Normal
Promedio Clorofila B	0,6265	0,08192	Normal

En la tabla 10, que corresponde a la de normalidad observada por la cámara Micasense RedEdge Mx Blue, se muestra un comportamiento no normal de las variables NDVI, ARVI, ARVI 2, BNDVI, IPVI, LCI Y SIPI. Existiendo sólo una diferencia en la variable ARVI y manteniendo comportamiento homogéneo en el resto de las variables.

Tabla 10 Tabla de normalidad cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.

Micasense RedEdge Mx Blue			
Variable de estudio	Valor p	Estadístico de prueba KS	Tipo de normalidad
NDVI	0,00038	0,22825	No normal
GNDVI	0,14795	0,12545	Normal
GVRI	0,85874	0,0656	Normal
NDRE	0,11054	0,13238	Normal
ARVI	0,00123	0,21201	No normal
ARVI 2	0,00093	0,21591	No normal
BNDVI	0,00427	0,19338	No normal
CIG	0,85874	0,0656	Normal
DVI	0,73675	0,07457	Normal
EVI	0,66953	0,07907	Normal
GARI	0,3409	0,10298	Normal
GEMI	0,57843	0,08513	Normal

GLI	0,82001	0,06865	Normal
GRNDVI	0,06723	0,14341	Normal
IPVI	< ,00001	0,31087	No normal
LCI	0,04322	0,15255	No normal
MCARI	0,364	0,10098	Normal
SIPI	0,00002	0,26171	No normal
Promedio SPAD	0,74348	0,07411	Normal
Promedio Clorofila A	0,92428	0,05939	Normal
Promedio Clorofila B	0,6265	0,08192	Normal

Teniendo en cuenta las tablas anteriores, donde arrojan la normalidad de los datos se utiliza la correlación de Spearman puesto que es una medida no paramétrica de asociación que evalúa la fuerza y la dirección de una relación monótona entre dos variables, no supone normalidad y es robusto frente a valores atípicos [102]. Esta medida estadística se basa en los rangos de los datos en lugar de los valores exactos, para luego calcular el coeficiente de correlación, que puede variar entre -1 y 1, donde un valor positivo indica una correlación positiva, un valor negativo indica una correlación negativa y un valor cercano a cero indica una correlación débil o inexistente [103].

La correlación de Spearman es especialmente útil al estimar la relación entre los métodos de cuantificación de clorofila directos e indirectos en la agricultura de precisión con cultivos de café debido a varias razones, entre ellas que no requiere supuestos sobre la distribución de los datos, siendo esto especialmente relevante cuando se trabaja con variables que no siguen una distribución normal, como puede ser el caso en la agricultura de precisión con cultivos de café. Así, la medición tampoco se ve afectada por valores atípicos, ya que –como se dijo antes– la correlación de Spearman se basa en los rangos de los datos en lugar de los valores exactos [104], lo que implica que los valores atípicos tienen menos impacto en la medida de correlación, lo cual es beneficioso cuando se trabaja con datos que pueden contener valores extremos o inusuales. Esto permite una evaluación más precisa de la relación entre las variables y puede ayudar a mejorar los métodos de cuantificación de clorofila y su aplicación en la agricultura de precisión con cultivos de café.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del proyecto y la conclusión de la toma de muestras en campo, se observó que el prototipo de acople diseñado para las cámaras Micasense RedEdge M y Mx Blue mostró un desempeño óptimo. Su fácil instalación en el dron permitió cambiar rápidamente entre las dos cámaras, facilitando la adaptación a las condiciones variables del entorno. A pesar de las fuertes corrientes de aire en algunos vuelos, el dron se mantuvo estable, indicando que el diseño del prototipo fue eficiente en términos de posicionamiento en el dron. Este posicionamiento ideal aseguró que no afectará el centro de masa del dron, garantizando así su estabilidad durante el vuelo y evitando posibles colisiones o pérdidas de control.

Con este logro, se cumplió con el primer objetivo específico del proyecto, que consistía en diseñar y fabricar un sistema de acople funcional para las cámaras multiespectrales.

Posteriormente, al analizar los datos proporcionados por las cámaras multiespectrales, obtenidos mediante la técnica indirecta, y realizar la cuantificación de clorofila a través de la toma de muestras en campo y su procesamiento en laboratorio, utilizando técnicas directas, se logra cumplir con el segundo objetivo específico del proyecto. Además, el procesamiento de las imágenes con el software Pix4D fields permitió la determinación de índices normalizados de vegetación, consolidando así la aplicación de técnicas directas e indirectas.

Como último paso, se crearon dos datasets, uno para cada cámara, que se utilizarán en conjunto con los datos de campo y laboratorio. Estos datasets serán fundamentales para evaluar las técnicas estadísticas que permitan establecer la correlación entre los diferentes métodos de estimación de clorofila, cumpliendo de esta manera con el tercer y último objetivo específico del proyecto.

A continuación, se procede a interpretar los resultados obtenidos tras la recopilación de muestras, la tabulación de datos y su posterior comparación. En particular, se explorará su relevancia en el contexto de la agricultura en el cultivo de café, con el objetivo de identificar patrones, tendencias y relaciones de importancia significativa entre los diversos métodos de cuantificación de clorofila.

Para llevar a cabo este análisis de datos, se empleó el coeficiente de correlación entre las variables de estudio. Según Lahura [105], el coeficiente de correlación es una herramienta estadística que proporciona información acerca de la relación lineal existente entre dos variables cualesquiera. En esencia, esta métrica arroja luz sobre dos aspectos fundamentales de la relación lineal: su dirección o tendencia, y la proximidad o intensidad de esta conexión.

En este contexto, las siguientes matrices de correlación representan los índices de vegetación obtenidos de las cámaras Micasense RedEdge M y Micasense RedEdge

MX Blue en cada uno de los días de vuelo llevados a cabo. El resultado es la generación de una base de datos que alberga información relativa a 18 índices normalizados de vegetación para cada cámara.

De esta forma, se procedió a segmentar las matrices de correlación en datos recolectados diariamente para cada cámara y en un enfoque global que abarcó el período completo de estudio, el cual tuvo una duración de cuatro semanas. Este enfoque se adoptó con el propósito de evaluar la correlación a lo largo del tiempo entre los índices de vegetación, así como las otras variables asociadas al estudio.

ÍNDICES DIARIOS

Primeramente, se hace la adecuación de la información con la cual se implementarán las matrices de correlación, esto indicará si cada índice espectral tiene una consistencia en el tiempo, para esto se generan tres tablas (tabla 11, tabla 12 y tabla 13) con los valores resultantes del estudio para la cámara multiespectral Micasense RedEdge M, Micasense RedEdge Mx Blue, Clorofilometro y procesamiento de laboratorio.

Tabla 11 Datos obtenidos mediante técnica indirecta con la cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.

Fecha	NDVI	GNDVI	GVRI	NDRE	ARVI	ARVI2	BNDVI	CIG	DVI	EVI	GARI	GEMI	GLI	GRNDVI	IPVI	LCI	MCARI	SIPI
7/03/2023	0,920	0,833	11,389	0,549	0,853	0,896	0,929	10,389	0,390	0,677	0,273	0,273	0,416	0,767	1,015	0,680	0,859	0,948
9/03/2023	0,951	0,858	13,296	0,592	0,906	0,932	0,955	12,296	0,494	0,816	0,391	0,329	0,516	0,816	1,012	0,724	1,014	0,947
14/03/2023	0,938	0,827	11,281	0,552	0,884	0,917	0,952	10,281	0,430	0,720	0,302	0,290	0,553	0,776	1,013	0,687	0,857	0,934
16/03/2023	0,928	0,817	10,440	0,531	0,867	0,906	0,935	9,440	0,415	0,715	0,283	0,289	0,477	0,759	1,015	0,667	0,891	0,934
21/03/2023	0,933	0,819	10,267	0,511	0,874	0,909	0,936	9,267	0,396	0,695	0,268	0,280	0,492	0,763	1,013	0,652	0,864	0,933
23/03/2023	0,924	0,820	10,988	0,538	0,862	0,901	0,942	9,988	0,464	0,764	0,329	0,308	0,520	0,759	1,017	0,672	0,967	0,937
28/03/2023	0,920	0,801	9,175	0,481	0,854	0,897	0,918	8,175	0,424	0,735	0,283	0,298	0,463	0,736	1,018	0,623	0,944	0,928
30/03/2023	0,945	0,836	11,650	0,557	0,896	0,926	0,946	10,650	0,528	0,853	0,405	0,344	0,524	0,790	1,015	0,694	1,026	0,937

Tabla 12 Datos obtenidos mediante técnica indirecta con la cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.

Fecha	NDVI	GNDVI	GVRI	NDRE	ARVI	ARVI2	BNDVI	CIG	DVI	EVI	GARI	GEMI	GLI	GRNDVI	IPVI	LCI	MCARI	SIPI
7/03/2023	0,855	0,784	8,457	0,564	0,743	0,821	0,907	7,457	0,210	0,415	0,069	0,167	0,317	0,669	1,017	0,669	0,145	1,032
9/03/2023	0,862	0,780	8,475	0,542	0,754	0,829	0,910	7,475	0,284	0,521	0,146	0,210	0,338	0,671	1,021	0,654	0,241	1,029
14/03/2023	0,860	0,779	8,214	0,549	0,753	0,826	0,904	7,214	0,239	0,457	0,113	0,185	0,342	0,668	1,017	0,659	0,202	1,027
16/03/2023	0,869	0,788	8,674	0,569	0,766	0,837	0,903	7,674	0,294	0,542	0,151	0,219	0,324	0,684	1,021	0,677	0,228	1,020
21/03/2023	0,856	0,766	7,722	0,530	0,745	0,821	0,895	6,722	0,310	0,556	0,162	0,225	0,334	0,654	1,024	0,642	0,271	1,024
23/03/2023	0,854	0,783	8,619	0,556	0,743	0,820	0,900	7,619	0,230	0,441	0,109	0,178	0,307	0,668	1,018	0,662	0,170	1,029
28/03/2023	0,861	0,788	8,773	0,555	0,751	0,827	0,906	7,773	0,253	0,467	0,114	0,189	0,314	0,677	1,021	0,663	0,204	1,028
30/03/2023	0,847	0,775	8,203	0,533	0,731	0,811	0,900	7,203	0,310	0,550	0,155	0,223	0,311	0,655	1,027	0,641	0,249	1,033

La revisión de las Tablas 11 y 12 revela que, en términos generales, los valores de cada índice de vegetación no experimentaron variaciones significativas a lo largo del tiempo, salvo por los índices **GVRI** y **CIG**, los cuales mostraron cambios notables para la cámara Micasense RedEdge M. En contraste, la cámara Micasense RedEdge Mx Blue exhibió una estabilidad considerable durante el muestreo.

Es importante destacar que, aunque se están evaluando los mismos índices de vegetación, es evidente que los datos generados por cada cámara presentan diferencias, aunque se mantienen en proximidad, debido a las particularidades de las bandas espectrales disponibles en cada una. Por ejemplo, la cámara Micasense RedEdge M incorpora la banda del infrarrojo cercano (NIR) [106], necesaria para la mayoría de las fórmulas indicadas en los parámetros de vuelo.

Es aceptado en la literatura que la banda espectral (**NIR**) es la que mejor capta la reflectancia de la clorofila en las hojas del cultivo [107], a su vez la cámara Micasense RedEdge Mx Blue, aunque comparte las bandas Blue, Green, Red y dos bandas Red Edge con su contraparte, presenta diferencias en los rangos espectrales de estas bandas [108].

Para superar esta limitación, se optó por sustituir el **NIR** por el **Red Edge 740(18)**, dando como resultado la Tabla 12. Aunque los valores de los índices varían ligeramente entre las cámaras, los índices **GVRI**, **ARVI**, **CIG**, **DVI**, **EVI**, **GARI**, **GLI** y **MCARI** muestran discrepancias más sustanciales entre una cámara y otra.

En la tabla 13 la cual contiene los datos obtenidos haciendo uso de las técnicas directas arrojan una consistencia durante todo el periodo de muestreo dando a entender que los resultados obtenidos tienen una frecuencia constante en el tiempo.

Tabla 13 Datos obtenidos mediante técnicas directas (Clorofilometro y Procesamiento de laboratorio). Fuente autor.

Fecha	SPAD	Ch A	Ch B
7/03/2023	38,863	13,370	4,712
9/03/2023	45,513	13,094	4,883
14/03/2023	45,133	14,141	4,320
16/03/2023	42,941	13,367	5,053
21/03/2023	38,146	14,710	4,688
23/03/2023	42,853	14,515	4,733
28/03/2023	37,106	15,634	4,777
30/03/2023	38,963	13,936	4,813

Seguidamente se generaron matrices de correlación para cada día de muestreo, las cuales dejaron como resultado 16 gráficas de correlación para las técnicas directas y la técnica indirecta. Al ser un gran número de gráficas se opta por dejar las gráficas al iniciar el estudio, en un punto intermedio y al finalizar el estudio. Esto con el fin de visualizar de manera parcial las correlaciones obtenidas durante el ciclo de muestreo y obtención de datos.

Como se aprecia a continuación las figuras 54 y 55 presentan la matriz de correlación obtenida haciendo uso de los datos recopilados el 7 de marzo de 2023, las figuras 56 y 57 la correlación obtenida con los datos del 16 de marzo de 2023 y las figuras 58 y 59 las matrices de correlación obtenidas con los datos del 30 de marzo.

Las demás figuras que van desde la 62 hasta la 71 se pueden observar en el anexo 1 las cuales corresponden a las muestras tomadas desde el 9 de marzo hasta el 28 de marzo excluyendo el 16 de marzo.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones para las fechas descritas anteriormente con las dos cámaras en las que se puede observar que independientemente de las diferentes muestras tomadas, se ha mantenido una alta correlación tanto positiva como negativa de manera constante entre las variables. Esto significa que existe una fuerte relación o dependencia entre los 18 índices usados, lo que implica que un cambio en una variable está asociado con un cambio en la otra variable de manera previsible y coherente. En otras palabras, cuando una variable aumenta, la otra también tiende a aumentar, o cuando una variable disminuye, la otra también tiende a disminuir [109].

Esta consistencia en los altos coeficientes de correlación sugiere que existe una relación sólida (positiva y negativa) entre los diferentes índices de vegetación en todas las muestras analizadas, ya que están estrechamente relacionados entre sí y tienden a cambiar de manera similar en diferentes muestras. Esto implica que los resultados obtenidos a través de estos métodos son consistentes y pueden proporcionar información valiosa sobre la salud y el estado de los cultivos de café.

Al conocer esta consistencia en los coeficientes de correlación, los agricultores y los investigadores pueden confiar en los resultados obtenidos a través de estos métodos de cuantificación de clorofila. Esto les permite tomar decisiones informadas sobre el manejo de los cultivos de café, como la aplicación de fertilizantes, el control de plagas y enfermedades, y la optimización de los recursos hídricos. Además, esta información puede ayudar a identificar patrones y tendencias en la relación entre la cuantificación de clorofila y otros factores que afectan el crecimiento y la productividad de los cultivos de café.

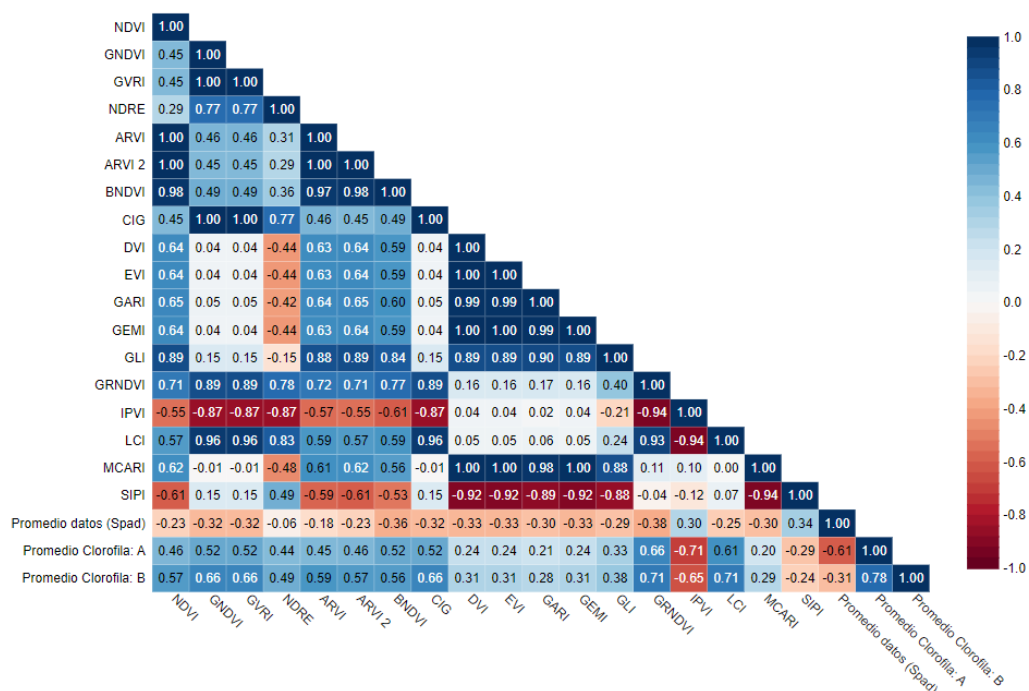


Figura 54 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 07/03/2023. Fuente autor.

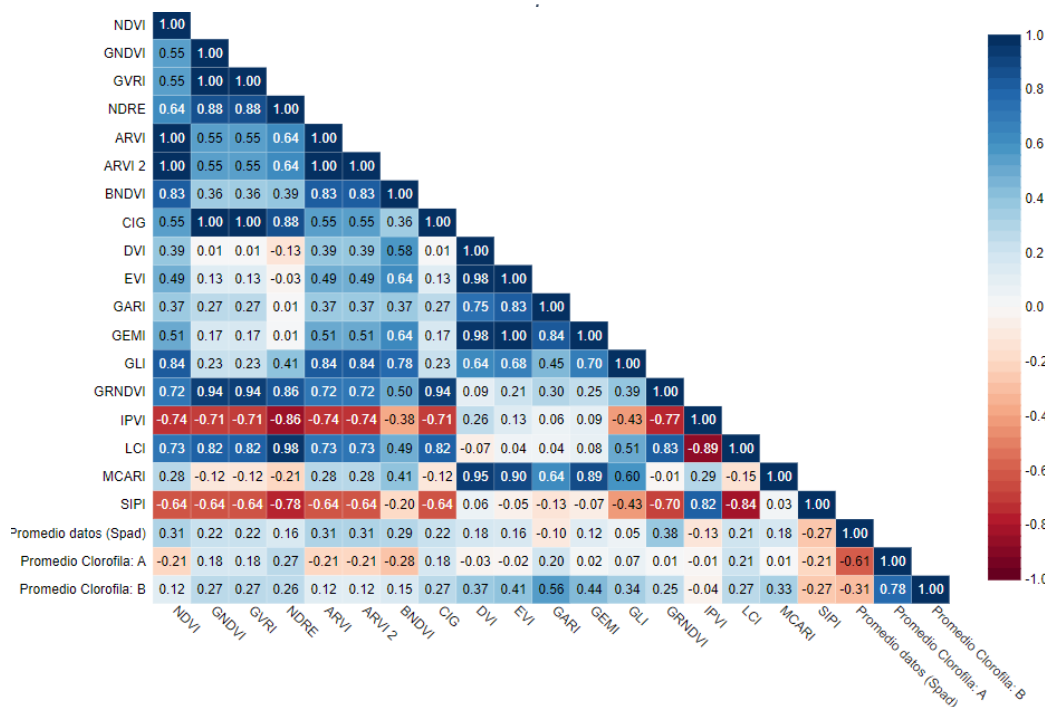


Figura 55 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 07/03/2023. Fuente autor.

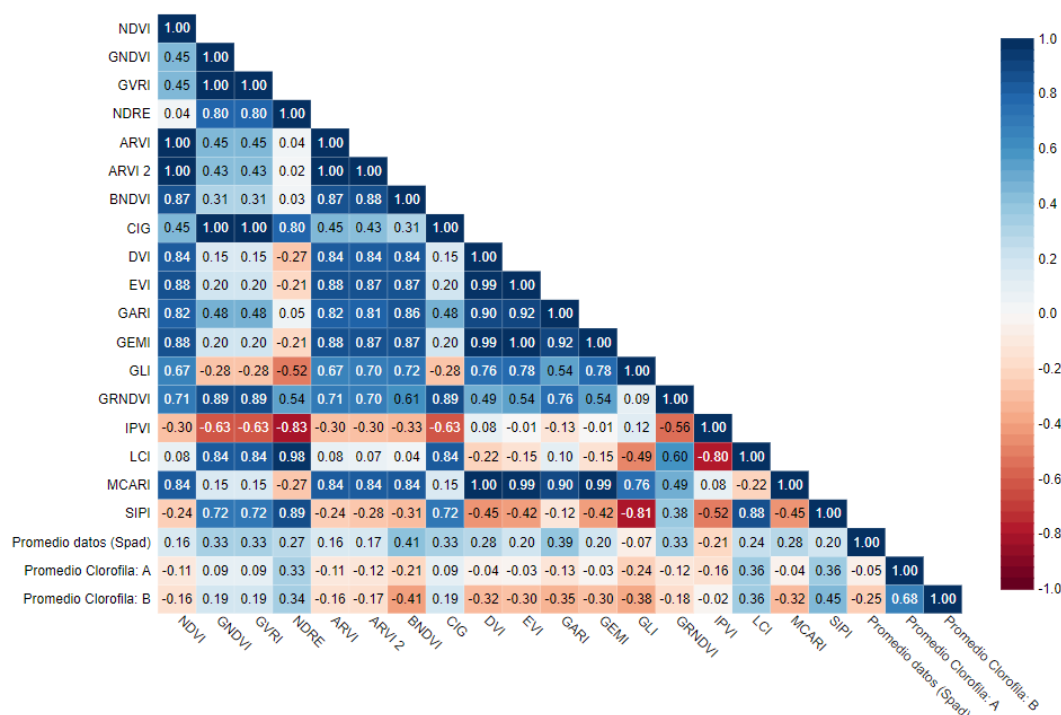


Figura 56 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 16/03/2023. Fuente autor.

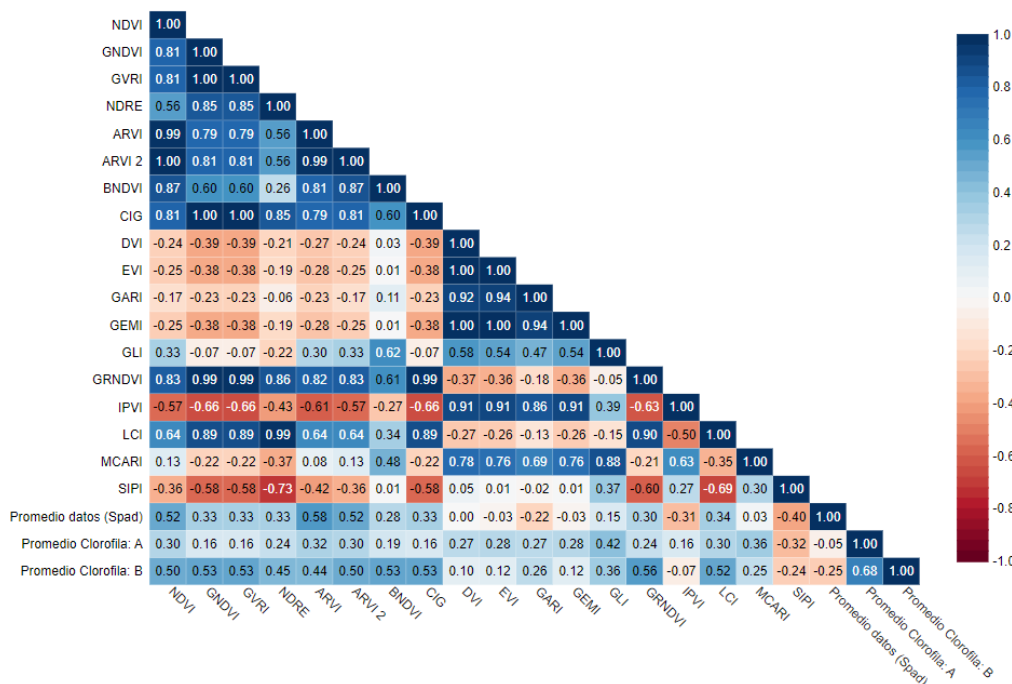


Figura 57 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 16/03/2023. Fuente autor.

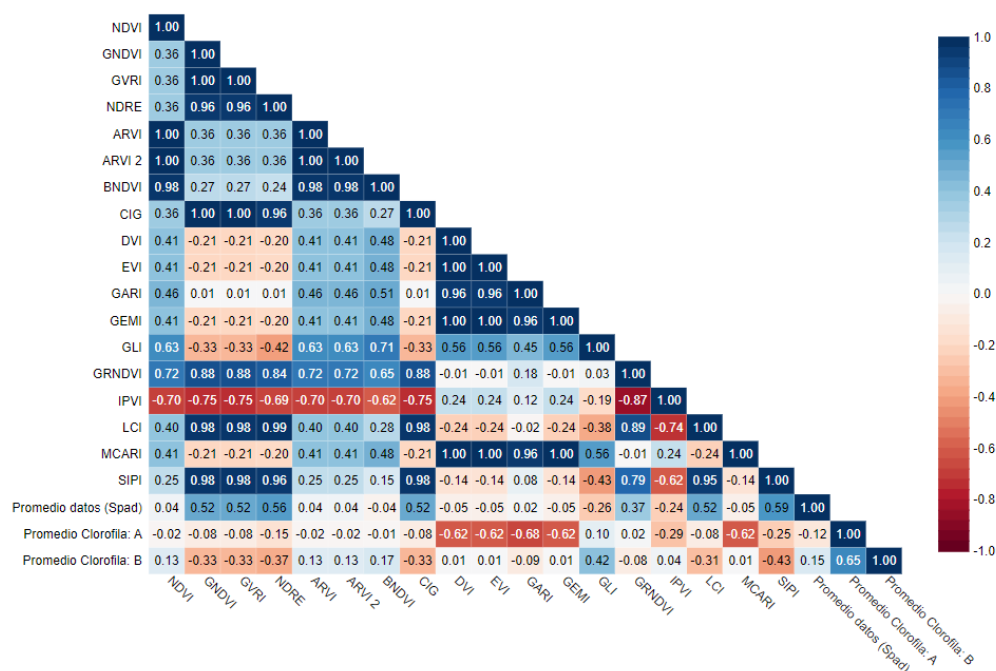


Figura 58 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M del 30/03/2023. Fuente autor.

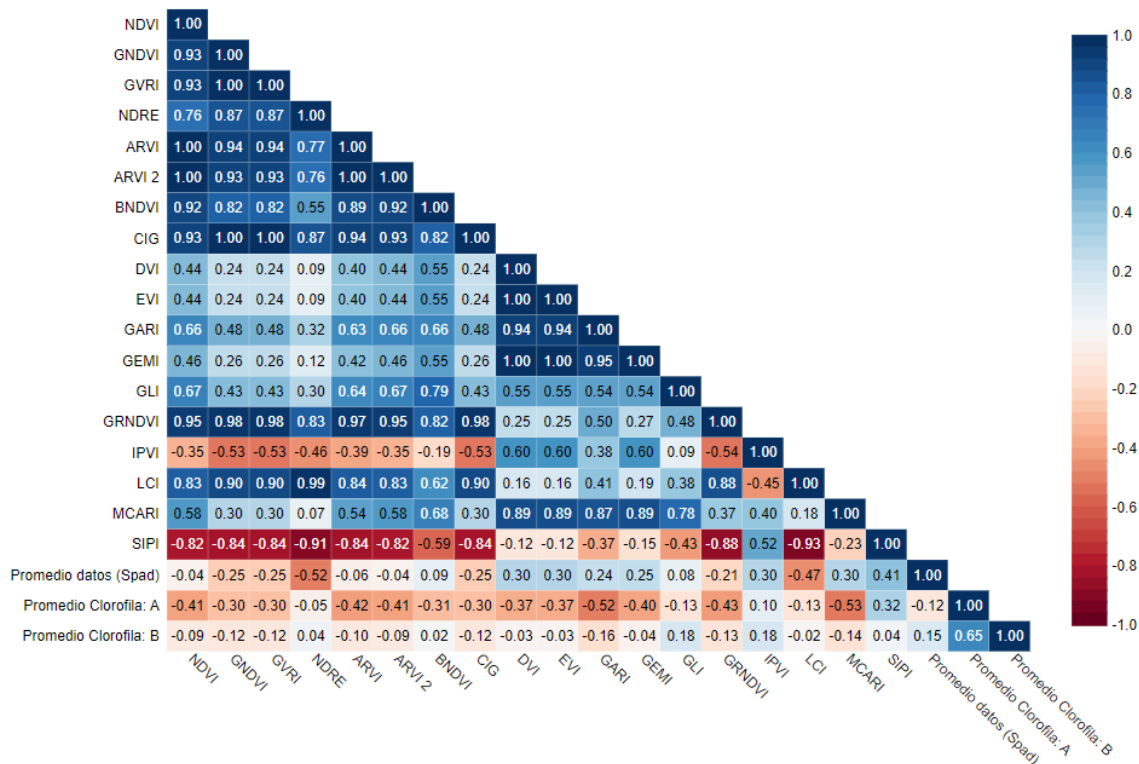


Figura 59 Correlación de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 30/03/2023. Fuente autor.

Como se puede observar en las anteriores matrices de correlación, aunque se tomaron distintas muestras se mantiene constantes los altos coeficientes de correlación entre las variables, teniendo en cuenta que alto es superior a 0.5 para una relación positiva y menores que 0,5 para una relación negativa, estos como parámetros de referencia sin implicar que sean valores estrictos, ya que pueden variar según el tamaño de la muestra, tal como lo explica García en [110].

ÍNDICES GENERALES

Es fundamental no solo observar las matrices de correlación diarias obtenidas en un estudio, sino también realizar un análisis global de estas matrices. Esta evaluación a nivel global nos proporciona una visión más amplia y completa de los resultados obtenidos a lo largo del tiempo. Al examinar estas matrices en conjunto, podemos identificar tendencias, patrones y cambios generales que podrían no ser evidentes al observar únicamente datos diarios.

Al realizar un análisis global de las matrices de correlación, se vuelven visibles posibles variaciones estacionales, tendencias a largo plazo o cambios significativos en la relación entre las variables a lo largo de periodos específicos. Esto nos permite detectar comportamientos que pueden ser más sutiles en el análisis diario, proporcionando así una comprensión más profunda y precisa de las relaciones entre las variables estudiadas.

Esta evaluación más amplia también brinda la oportunidad de corroborar la consistencia de los patrones identificados a nivel diario. Al contrastar los resultados diarios con las tendencias globales, se puede verificar la estabilidad de las correlaciones a lo largo del tiempo y determinar si los hallazgos son consistentes en diferentes contextos o periodos.

A continuación, se presentan las matrices de correlación generales que promedian los resultados obtenidos diariamente y una matriz de correlación para los datos globales entre la cámara multispectral Micasense RedEdge M y Micasense RedEdge Mx Blue (ver figura 60).

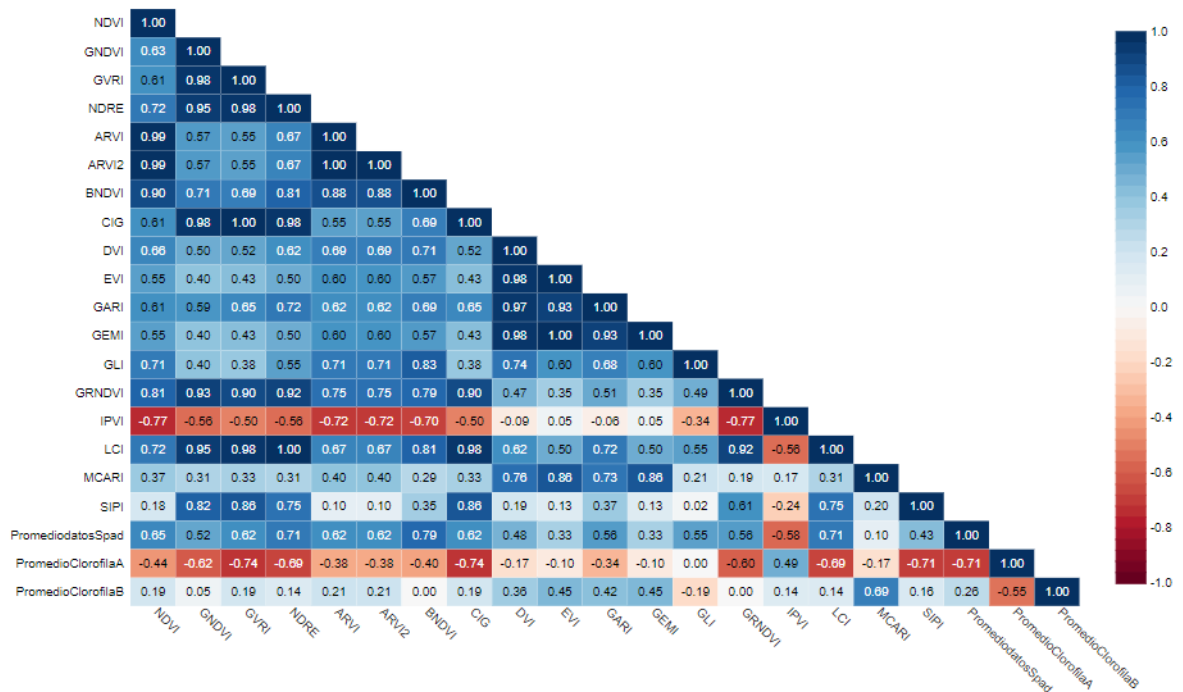


Figura 60 Correlación global de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge M. Fuente autor.

En la figura 60, se destaca una correlación positiva fuerte [111] (superior a 0.5) entre la mayoría de los índices espectrales y el promedio de clorofila (SPAD) para la cámara multiespectral Micasense RedEdge M. Este hallazgo sugiere que tanto la técnica directa (Clorofilometro) como la técnica indirecta (Vuelo con drones) ofrecen resultados cercanos para evaluar la salud de las plantas de café. Por otro lado, al analizar Ch a y Ch b junto con los índices de vegetación y el promedio de clorofila (SPAD), se revela una correlación negativa significativa (inferior a -0.5) entre Ch a, los índices de vegetación y el promedio de clorofila (SPAD). Se destacan excepciones, como los índices GLI y GRNDVI, los cuales muestran una correlación nula con el promedio de Ch a y Ch b, respectivamente.

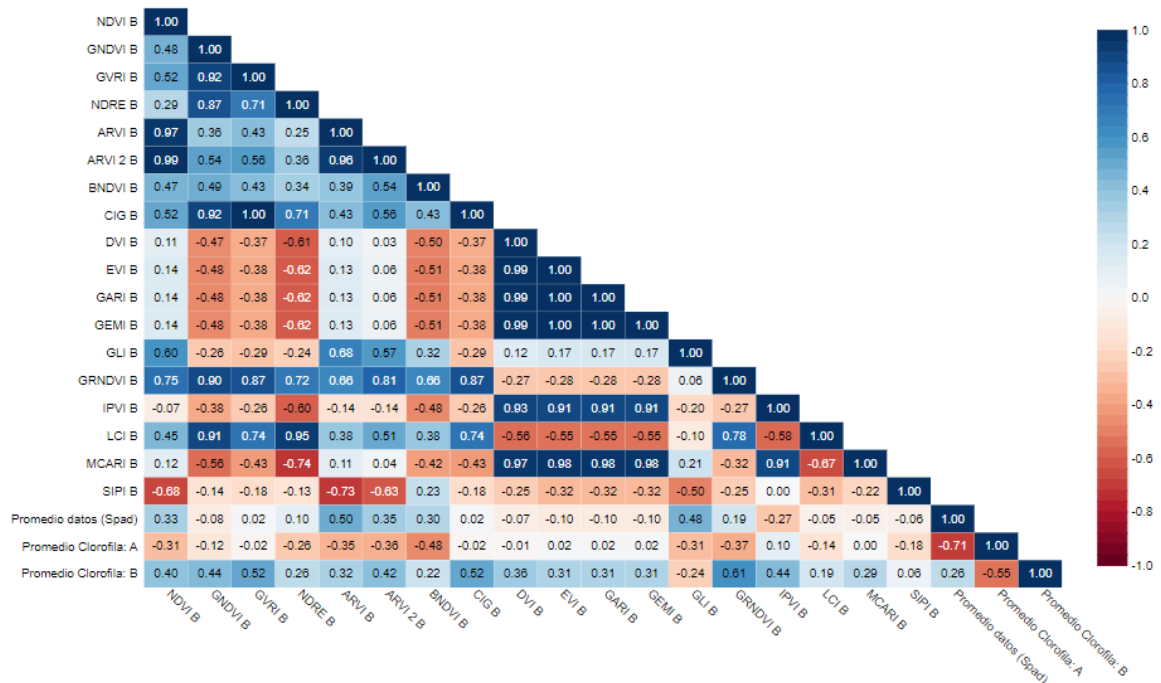


Figura 61 Correlación global de técnicas directas e indirectas de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue. Fuente autor.

En la figura 61, se destaca un cambio significativo en comparación con la Ilustración 60, ya que se evidencian correlaciones predominantes altamente negativas (inferior a -0.5) entre los índices espectrales. Este contraste respecto a la matriz de correlación anterior resalta una alteración substancial en las relaciones entre las variables analizadas.

Este cambio hacia correlaciones negativas altas sugiere una dinámica diferente entre los índices espectrales y los parámetros evaluados. Podría indicar una relación inversa entre ciertos índices espectrales y las mediciones de clorofila, que difiere notoriamente de la tendencia previamente observada.

Por último, teniendo en cuenta la relación con el contenido de clorofila evaluado a través de los dos métodos de medición, no se aprecian diferencias relevantes en los resultados de las mediciones de cámara Micasense RedEdge M y las mediciones de la cámara Micasense RedEdge Mx Blue en lo que respecta a los promedios de clorofila A y los promedios de clorofila B, se puede inferir que la medición de la clorofila tiene una independencia lineal de las variables aun cuando se cambie el método de medición. Lo anterior, significa que, si varían los índices de la vegetación que está captando el instrumento, los promedios calculados parecen no estar correlacionados con esos índices, esto es, los promedios mantienen su independencia lineal.

Resultado contrario al obtenido por Gilabert en [112], quien ante un estudio de comportamiento espectral pudo observar que la reflectividad de la vegetación mostró un mínimo relativo en el color rojo – que es la banda de absorción de la clorofila– y luego alcanza un máximo absoluto en el infrarrojo cercano, explicando que esto se debe a las dispersiones múltiples de la radiación dentro de la estructura celular de las plantas.

La relación del índice SIPI con otros índices sí varía de un instrumento de medición a otro, pasando de una relación fuerte positiva según la cámara Micasense RedEdge M a fuerte negativa con la cámara Micasense RedEdge Mx. Se debe tener en cuenta que un aumento en el valor del índice de vegetación SIPI, con un alto nivel de carotenoides y bajo nivel de clorofila, puede ser una señal de la existencia de una enfermedad en los cultivos, lo cual puede tener consecuencias negativas en la salud y producción de las plantas. Un estudio del Instituto de Geografía de la UNAM [113] sobre zonas afectadas por incendios, demostró que la observación del índice SIPI (entre otros) permitió percibir mejor las diferencias entre las áreas quemadas y no quemadas. Por ello, es relevante focalizar los resultados del índice SIPI.

De igual manera se observa que hay una relación fuerte negativa entre IPVI y otros índices en la medición de cámara Micasense RedEdge M que disminuye al observar los resultados de la cámara Micasense RedEdge Mx. El IPVI puede ser clave en el análisis de cobertura de vegetaciones, por ejemplo, para detectar cuándo es baja, por ello tal como se señala en [114].

En contraste con los resultados encontrados por Solís y Revelo [115], este estudio revela diferencias significativas en el índice de vegetación analizado. En su investigación, el índice IPVI mostraba una correlación positiva alta (mayor a 0.5) con otros índices de vegetación, las correlaciones entre Ch a, Ch b y los índices de vegetación eran positivas y elevadas, en contraposición a las halladas en esta investigación.

Estas discrepancias podrían ser atribuibles al método de adquisición de las imágenes espectrales utilizado en el estudio anterior. En aquel estudio, las imágenes se capturaron manualmente a una altura de 1 metro, posiblemente desatendiendo consideraciones para el uso óptimo de la cámara, tal como se detalla en la Tabla 3. Además, en el muestreo de laboratorio, establecieron un mapeo específico para cada sección de las hojas, una práctica que no se replicó en el presente estudio.

Estas diferencias metodológicas podrían haber influenciado los resultados, ya que la captura manual de imágenes y la falta de un mapeo detallado en el análisis pueden haber introducido variaciones o sesgos en la adquisición de datos.

Además, al considerar el análisis realizado por Guañarita y Rivera [116], se aprecia una notable similitud entre las correlaciones obtenidas en su estudio y las halladas en esta investigación para los índices NDVI, GNDVI, NDRE y GVRI, tanto en la cámara Micasense RedEdge M como en la Micasense RedEdge Mx Blue. Esta coherencia sugiere una correspondencia significativa tanto en los métodos empleados para recabar información como en los resultados obtenidos.

La consistencia en las correlaciones entre ambos estudios refuerza la confiabilidad de los resultados y, posiblemente, indica la replicabilidad de las relaciones entre los índices de vegetación estudiados.

Esta congruencia entre investigaciones independientes subraya la importancia de establecer prácticas metodológicas robustas y estandarizadas en la adquisición de datos espectrales. Esta coherencia refuerza la confiabilidad de los resultados, promoviendo la posibilidad de validar y reafirmar conclusiones sobre la salud y desarrollo de la vegetación mediante la aplicación de metodologías consistentes y rigurosas.

De esta manera los resultados obtenidos demuestran la importancia de considerar diferentes índices en el estudio de la vegetación y su salud, cada uno de ellos proporciona información única y valiosa que ayuda al cumplimiento de los objetivos presentes en el actual proyecto, al posibilitar diagramar comportamientos a futuro de las plantas y diseñar estrategias de acción, pues el análisis estadístico de observaciones medibles permite capturar las características operativas de cada tipo de dato y variable, lo que resulta en una evaluación más precisa del progreso y desarrollo de las plantas. También, este tipo de análisis contribuye a comprender mejor las dinámicas ambientales y el desarrollo sostenible, siendo clave para la gestión y política pública en términos de impacto ambiental y sostenibilidad.

4.4 AMENAZAS DE VALIDEZ

Para asegurar la autenticidad de los hallazgos del caso estudiado y prevenir la influencia del juicio subjetivo del investigador, se han identificado y abordado diversas amenazas de validez y posibles riesgos para su integridad a la investigación. Estos aspectos fueron contemplados y minimizados durante la concepción y desarrollo de la investigación. Por consiguiente, este proyecto ha priorizado la validez de constructo, interna y externa como enfoques para garantizar la solidez y credibilidad de los resultados obtenidos.

Validez de constructo: Una de las amenazas a la validez es la diferencia en las cámaras espectrales ya que poseen distintos parámetros (bandas espectrales, alturas óptimas para toma de datos, entre otras) una de la otra por lo cual los datos arrojados por cada una difieren entre sí, por lo que la información captada puede diferir entre cada uno de los equipos. Para mitigar esta amenaza, se plantea el uso de técnicas estadísticas que eliminen la dimensión de los datos, por lo que son comparables entre sí.

Validez interna: Una de las amenazas a la validez es que no todos los días muestreados el clima estaba en las mismas condiciones por causa de la zona donde se realizó el estudio, por lo cual se definió una hora específica (12 pm - 1:30 pm), sin embargo, no en todas las ocasiones el cielo estuvo despejado y las corrientes de aire eran bajas. Por lo que, al momento de hacer los vuelos en las diferentes jornadas y hacer el procesamiento de imágenes haciendo la corrección radiométrica mediante un “blanco” propio de los equipos. Otra amenaza identificada es la cantidad de muestras tomadas y el periodo de muestreo el cual si es más prolongado podría generar un cambio en los resultados del proyecto.

Validez externa: Una amenaza a la validez en el estudio radica en la cantidad de muestras a procesar, ya que el muestreo indirecto mediante vuelos con drones cubre un área considerable en comparación con el muestreo directo realizado con el clorofilómetro y el procesamiento en laboratorio que son técnicas de poco muestreo espacial. Con el objetivo de agilizar la recolección de datos directos, se tomó una muestra reducida de la población. Por otra parte, la toma de muestras para su respectivo análisis en laboratorio se hizo de manera aleatoria.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación reflejan la aplicación habilidosa y efectiva de los conocimientos adquiridos durante el recorrido académico. Este proceso culminó en la adaptación exitosa de equipos con funciones diversas para unificarlos en un propósito común, beneficiando la investigación de manera significativa como lo fue la fabricación de un soporte específico para lograr una buena sinergia con el drone Phantom 4, originalmente no concebido para tareas de agricultura de precisión, con las cámaras multiespectrales Micasense RedEdge M y Mx Blue. Esta iniciativa no solo representa un logro técnico, sino también un avance innovador al fusionar tecnologías dispares para su aplicación específica en el ámbito agrícola, proporcionando al investigador una herramienta poderosa y adaptada a sus necesidades.

La combinación estratégica del drone DJI Phantom 4 con las cámaras Micasense RedEdge M y Mx Blue ofrece nuevas posibilidades para la captura de imágenes multiespectrales en plantaciones de café. Esta integración marca un avance significativo en la recolección de datos agrícolas, proporcionando un sistema efectivo para el estudio y monitoreo del desarrollo de los cultivos.

La versatilidad del Phantom 4, junto con la calidad y capacidad de la cámara RedEdge M, proporciona al contexto investigativo una herramienta de alta calidad para obtener imágenes aéreas que revelan de manera detallada y precisa la salud y condiciones de los cultivos de café. Este avance tecnológico no solo mejora la recolección de datos, sino que también establece una sólida base para investigaciones y análisis detallados en el campo de la agricultura de precisión, especialmente en cultivos específicos como el café.

Paralelamente, el uso preciso de técnicas tanto directas como indirectas en el terreno proporcionó datos esenciales como los valores de cada índice de vegetación, nivel SPAD y nivel de clorofila mediante proceso de laboratorio durante cada día muestreado para así poder tomar un promedio general de los datos recolectados. Estas metodologías fueron fundamentales para obtener información valiosa mediante técnicas estadísticas que permite evaluar la correlación entre los diferentes métodos de estimación de clorofila dependiendo de las distribuciones de los datos y su cantidad.

Para garantizar una adquisición óptima de imágenes aéreas multiespectrales, es importante tener en cuenta las características geográficas específicas de la región. Resulta esencial determinar con precisión el momento ideal de vuelo para minimizar las sombras proyectadas sobre el cultivo, aprovechando así las condiciones lumínicas más favorables. Además, comprender las variaciones estacionales, como los períodos de lluvia y vientos predominantes, resulta fundamental para evitar dificultades operativas durante la captura de imágenes.

Estos factores geográficos y climáticos no solo impactan la calidad de los datos recolectados, sino que también influyen en la eficiencia y efectividad del proceso de adquisición, destacando la importancia de una planificación meticulosa y contextualizada en la obtención de información precisa en agricultura de precisión. Por lo tanto, haciendo el análisis de los resultados presentados se puede concluir que no se encontraron diferencias relevantes en los resultados de las mediciones de clorofila A y clorofila B entre los dos métodos de medición de las cámaras, ello sugiere que la medición de la clorofila es independiente de las variables incluso cuando se cambia el método de medición.

La relación del índice SIPI con otros índices varía según el instrumento de medición. La cámara Micasense RedEdge M muestra una relación fuerte positiva, mientras que la cámara Micasense RedEdge Mx muestra una relación fuerte negativa. Un aumento en el valor del índice SIPI puede indicar la presencia de enfermedades en los cultivos, lo cual puede tener consecuencias negativas en la salud y producción de las plantas.

El índice IPVI muestra una relación fuerte negativa con otros índices en la cámara Micasense RedEdge M, pero esta relación disminuye en la cámara Micasense RedEdge Mx. El IPVI puede ser clave en el análisis de cobertura de vegetaciones y puede ayudar a detectar cuándo es baja. Es importante considerar diferentes índices en el estudio de la vegetación y su salud, ya que cada uno proporciona información única y valiosa. Estos índices permiten comprender mejor las dinámicas ambientales, el desarrollo sostenible y contribuyen a la gestión y política pública en términos de impacto ambiental y sostenibilidad. Además, las conclusiones de la presente investigación permiten llevar a cabo una investigación más exhaustiva, en ella se podría incluir la recopilación de datos adicionales, la realización de análisis más detallados y la exploración de otras variables relevantes.

TRABAJOS FUTUROS

Para futuras investigaciones se recomienda desarrollar y validar una técnica de cuantificación de clorofila adaptada a los cultivos de café, evaluar la relación entre los niveles de clorofila y el rendimiento de los cultivos, y explorar la aplicabilidad práctica de la técnica en condiciones reales de cultivo. Esto permitirá avanzar en la agricultura de precisión y mejorar la productividad y sostenibilidad de los cultivos de café.

Además, sería viable llevar a cabo una validación más exhaustiva de los métodos de cuantificación de clorofila, tanto directos como indirectos, en el contexto de la agricultura de precisión aplicada a los cultivos de café. Esta validación podría incluir la comparación de los resultados obtenidos con mediciones de referencia, un análisis detallado de la precisión y confiabilidad de los métodos utilizados, así como el aumento en el número de muestras para fortalecer la validez integral del estudio. Por consiguiente, sería posible optimizar tanto las técnicas de cuantificación de clorofila directas como las indirectas específicamente para su aplicación en la agricultura de precisión en los cultivos de café. Esto implica adaptar métodos existentes o desarrollar nuevas técnicas que sean más precisas, eficientes y adecuadas para las características específicas de los cultivos de café.

Sería pertinente también evaluar la relación entre clorofila y rendimiento, investigando su impacto en los cultivos de café. Esto podría incluir el análisis de datos históricos, la realización de experimentos controlados y la evaluación de la influencia de otros factores, como la nutrición y el manejo agronómico, en esta relación.

También, puede abrirse el campo del desarrollo de modelos predictivos utilizando los resultados obtenidos para estimar el rendimiento de los cultivos de café en función de los niveles de clorofila. Modelos que, por ejemplo, ayudarían a tomar decisiones informadas en la agricultura de precisión optimizando el manejo de los cultivos.

Finalmente, en la práctica agrícola se pueden realizar estudios de campo para evaluar la viabilidad y la eficacia de los métodos de cuantificación de clorofila directos e indirectos en la agricultura de precisión con cultivos de café. Esto puede incluir la colaboración con agricultores y la implementación de técnicas en condiciones reales para evaluar su impacto en el rendimiento y la calidad de los cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. S. Parra, «IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES CAUSAS DE LA BAJA PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN EL MUNICIPIO DE ALMEIDA BOYACÁ.», nov. 2018, [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/21311>
- [2] L. F. Salazar, «CAPACITACIÓN EN BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS (BPA) PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ ESPECIAL PARA LOS CAFICULTORES DE LA VEREDA EL SALADO LAS ESTRELLAS MUNICIPIO DE SOTARÁ, DEPARTAMENTO DEL CAUCA.», 2018, [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/25246>
- [3] C. Dussán-Lubert, H. Duque-Orrego, y J. González-López, «CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE CAFICULTORES DE ECONOMÍA CAMPESINA, DE LOS PRINCIPALES MUNICIPIOS CAFETEROS DE COLOMBIA», 2006, [En línea]. Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057\(03\)167-186.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057(03)167-186.pdf)
- [4] C. E. Oliveros-Tascón y J. R. Sanz-Urbe, «INGENIERÍA Y CAFÉ EN COLOMBIA», Revista de Ingeniería, n.o 33, pp. 99-114, ene. 2011, doi: 10.16924/revinge.33.10.
- [5] F. E. R. Higueta, «TENDENCIAS MODERNAS EN LA FERTILIZACIÓN EFICIENTE DEL CAFETO PARA LA PRODUCCIÓN DE CAFÉS ESPECIALES», Suelos Ecuatoriales, vol. 45, n.o 2, Art. n.o 2, dic. 2015, doi: <https://doi.org/10.47864>.
- [6, 97, 115] A. F. Solís, D. A. R. Luna, D. A. C. Ceballos, y C. A. G. López, «CORRELACIÓN DEL CONTENIDO DE CLOROFILA FOLIAR DE LA ESPECIE COFFEA ARABICA CON ÍNDICES ESPECTRALES EN IMÁGENES», Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, vol. 19, n.o 2, Art. n.o 2, ene. 2021, doi: 10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536.
- [7] C. J. Pacheco Sosa y A. J. Ceballos Freire, «FACTORES SOCIALES Y ECONÓMICOS QUE INCIDEN EN LA ADOPCIÓN TECNOLÓGICA EN EL CULTIVO DE CAFÉ COMO ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE LOCAL. CASO DE LA VEREDA SAN PEDRO. MUNICIPIO PIENDAMÓ-CAUCA», Universidad Autónoma de Manizales, 2012, Accedido: 27 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.autonoma.edu.co/handle/11182/226>
- [8] FNC, «PRODUCCIÓN DE CAFÉ DE COLOMBIA CAE 16% EN FEBRERO», Federación Nacional de Cafeteros. Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cae-16-en-febrero/>

[9, 20] FNC, «CAFÉ DE CAUCA», Federación Nacional de Cafeteros Cauca. Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cauca.federaciondecafeteros.org/cafe-de-cauca/>

[10] F. A. Jiménez, «CAMBIO CLIMÁTICO AMENAZA PRODUCCIÓN CAFETERA EN COLOMBIA», www.elcolombiano.com. Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.elcolombiano.com/negocios/precio-del-cafe-en-colombia-es-alto-pero-preocupa-la-produccion-IE15999717>

[11] F. E. Osorio Criollo, «PROYECTO PRODUCTIVO APLICADO A LA COMERCIALIZACIÓN DE CAFÉ ESPECIAL EN EL MUNICIPIO DE TARQUI HUILA.», reponame: Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, may 2014, Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/2463>

[12] FNC, «FNC HACE LLAMADO A CAFETEROS PARA CONTINUAR EL SEGUIMIENTO DE BROCA Y ROYA», Federación Nacional de Cafeteros. Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/fnc-hace-llamado-a-cafeteros-para-continuar-el-seguimiento-de-broca-y-roya/>

[13] A. Aguirre Cortés, «UN CAFÉ TECNIFICADO: EL PAPEL DE LA TECNOLOGÍA EN LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO ENTRE LOS CAFICULTORES DE NEIRA, CALDAS», 2015, Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/14457>

[14, 50] V. M. Chaves Arias, CARACTERIZACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS CAFETALEROS DE COSTA RICA, 1. edición. ICAFE, 2014.

[15] F. N. de Cafeteros, «COMITÉ DEPARTAMENTAL DE CAFETEROS DEL CAUCA», p. 10.

[16] F. J. Briceño Valera, O. Fernández, A. Peña, y E. Faccin, «EVALUACIÓN AGRONÓMICA CON TÉCNICAS DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN PARCELAS DE CAFÉ(Coffea arabica) EN LA CUENCA DEL RÍO CASTÁN. ESTADOTRUJILLO», Agronomic evaluation with technical of agriculture of precision in coffee (arabica coffea) crop fields in the castan river basin. Trujillo state, jun. 2011, Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/33356>

[17, 53] V. E. Oliva, J. L. Blanco, J. C. Nieto, y M. Á. M. Alfaro, «PATRONES ESPACIALES DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL ÁREA CAFETALERA DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA», may 2009.

- [18] A. Perdomo Barajas, «EL USO DE DRONES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN», ANEIA - Universidad de Los Andes. Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2015/08/el-uso-de-drones-en-la-agricultura-de-precision/>
- [19, 26, 55, 57] V. Berrío Meneses, J. Mosquera, y D. Alzate, «USO DE DRONES PARA EL ANALISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN», vol. 13, may 2015, doi: 10.24054/16927125.v1.n1.2015.1647.
- [21, 23, 43, 44, 45, 49] Díaz García-Cervigón y Díaz García-Cervigón, «ESTUDIO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES AÉREAS TOMADAS DESDE UAS/RPAS Y APLICACIONES DE ESTOS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.» Accedido: 16 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/>
- [22] C. García, «MONITOREO DE CULTIVOS USO DE DRONES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN», Centro de Desarrollo Agrobiotecnológico de Innovación e Integración Territorial CEDAIT, jun. 2021, [En línea]. Disponible en: <https://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/2ab5c4ad-31f7-4b8d-8387-cfb413c9266f/Boletín+monitoreo+de+praderas+ganadería+de+leche.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nGbolB3#:~:text=Una%20de%20las%20funciones%20principales,sofisticadas%20cámaras%20y%20sensores%20que>
- [25, 27, 28, 29, 31, 34, 42, 61, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91] J. M. G. Castillo y D. F. R. Vásquez, «ANÁLISIS DE ÍNDICES NORMALIZADOS DE VEGETACIÓN EN CULTIVOS DE CAFÉ TIPO CASTILLA, HACIENDO USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES ADQUIRIDAS POR UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV)», CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA, POPAYÁN, CAUCA, 2019.
- [30] R. H. Al Shidi, L. Kumar, y S. A. H. Al-Khatri, «DETECTING DUBAS BUG INFESTATIONS USING HIGH RESOLUTION MULTISPECTRAL SATELLITE DATA IN OMAN», Computers and Electronics in Agriculture, vol. 157, pp. 1-11, feb. 2019, doi: 10.1016/j.compag.2018.12.037.
- [32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 92, 93, 94] E. R. R. Rodríguez, «METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN VUELO FOTOGRAFÉMICO USANDO UAV'S», 2018, [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13097/Ria?sequence=1>
- [40] D. Revelo Luna et al., «ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN NDVI, GNDVI Y NDRE PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DE CAFÉ

(COFFEA ARABICA)», Ingeniería y Desarrollo, vol. 38, n.o 2, pp. 298-312, dic. 2020, doi: 10.14482/inde.38.2.628.

[41] E. F. Avila-Vélez y B. Royero-Benavides, «APLICACIÓN DE ÍNDICES VEGETALES EN CAFÉ (COFFEA ARABICA L.)», Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, vol. 24, n.o 2, Art. n.o 2, nov. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24.n2.2021.1584.

[46] B. Benoit, «INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES DE VISIÓN. UN CASO PARA LA AUTOMATIZACIÓN CON VISIÓN ARTIFICIAL», p. 12, 2019.

[47] P. Caldentey Aventín, «UTILIZACIÓN DE SENSORES MULTIESPECTRALES E HYPERESPECTRALES EMBARCADOS EN RPAS CON EL OBJETIVO DE DOSIFICAR ABONOS EN CULTIVOS.», Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017. Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/108362>

[48] A. Ariza, IGAC, y UNSPIDER, DESCRIPCIÓN Y CORRECCIÓN DE PRODUCTOS LANDSAT 8 LDCM. 2013. doi: 10.13140/RG.2.2.21308.44167.

[51] V. Ramírez Builes, A. Moreno, y J. C. Lopez, «EVALUACIÓN TEMPRANA DE LA DEFICIENCIA DE NITRÓGENO EN CAFÉ Y APLICACIONES.», Avances Técnicos Cenicafé, vol. 420, p. 8p, jun. 2012.

[52] J. Liendro, J. G. Roa, y L. Segovia, «EVALUACIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL PARA EL CULTIVO DE CAFÉ (COFFEA ARABICA) EN LA MICROCUENCA DEL RÍO MONAICITO, ESTADO TRUJILLO, VENEZUELA», Spatial evaluation of the potentiality of growing coffee (Coffea arabica) in Monaicito river basin, Trujillo State, Venezuela, 2012, Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/44926>

[54, 56] I. Lizarazo, «CARACTERIZACIÓN DE LA CONDICIÓN DE LA VEGETACIÓN USANDO SENSORES PRÓXIMOS Y REMOTOS». Accedido: 28 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/13303506-Characterizacion-de-la-condicion-de-la-vegetacion-usando-sensores-proximos-y-remotos.html>

[58] J. M. Peña, J. Torres-Sánchez, A. Serrano-Pérez, y F. López-Granados, «DETECCIÓN DE MALAS HIERBAS EN GIRASOL EN FASE TEMPRANA MEDIANTE IMÁGENES TOMADAS CON UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV)», en Revista de Teledetección, Universitat Politècnica de València, dic. 2014, pp. 39-48. doi: 10.4995/raet.2014.3148.

- [59] G. Alvarado-Alvarado, H. E. Posada-Suárez, y H. A. Cortina, «CASTILLO: NUEVA VARIEDAD DE CAFÉ CON RESISTENCIA A LA ROYA.», AVT, vol. 337, pp. 1-8, may 2005, doi: 10.38141/10779/0337.
- [60, 74, 95, 96, 106] «REDEGE-M USER MANUAL», MicaSense Knowledge Base. [En línea]. Disponible en: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115003537673-RedEdge-M-User-Manual-PDF-Legacy>
- [62, 63, 66, 80] «DLS INTEGRATION GUIDE», MicaSense Knowledge Base. Accedido: 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/225775007-DLS-Integration-Guide-Overview>
- [64, 67] «USE OF CALIBRATED REFLECTANCE PANELS FOR MICASENSE DATA», MicaSense Knowledge Base. Accedido: 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115000765514-Use-of-Calibrated-Reflectance-Panels-For-MicaSense-Data>
- [65, 108] «REDEGE-MX DUAL CAMERA». [En línea]. Disponible en: https://www.geosysteming.com/wp-content/uploads/2020/06/RedEdge-MX-Dual-Camera_com.pdf
- [68] «PHANTOM 4 MANUAL DE USUARIO». [En línea]. Disponible en: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/es/Phantom_4_User_Manual_v1.2_es_20160624.pdf
- [69, 70] «MANUAL CLOROFILOMETRO TYS A». [En línea]. Disponible en: <https://www.myminstrumentostecnicos.com/wp-content/uploads/2020/04/TYS-A-Medidor-de-clorofila-4.pdf>
- [71, 72] «MANUAL DE OPERACIÓN GENESYS 20». [En línea]. Disponible en: [https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/Genesys%2020%20Op%20Manual%20\(2\).pdf](https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/Genesys%2020%20Op%20Manual%20(2).pdf)
- [73] «3D CAD DESING SOFTWARE | SOLIDWORKS». [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/home-page-2021>
- [75] J. P. M. Sánchez, «DJI GO 4 MANUAL: MANUAL DEL PILOTO», 2016.
- [76] «DJI GS PRO USER MANUAL VERSION 2.0». [En línea]. Disponible en: https://dl.djicdn.com/downloads/groundstation_pro/20181102/GS_Pro_User_Manual_v2.0_EN_201811.pdf

- [77] «PIX4DFIELDS», Pix4D. [En línea]. Disponible en: <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dfields>
- [78] «RSTUDIO», Wikipedia, la enciclopedia libre. 24 de febrero de 2023. Accedido: 10 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=RStudio&oldid=149496820>
- [98] S. W. Jeffrey y G. F. Humphrey, «NEW SPECTROPHOTOMETRIC EQUATIONS FOR DETERMINING CHLOROPHYLLS A, B, C1 AND C2 IN HIGHER PLANTS, ALGAE AND NATURAL PHYTOPLANKTON», Biochemie und Physiologie der Pflanzen, vol. 167, n.o 2, pp. 191-194, ene. 1975, doi: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
- [99, 101] C. E. F. Tapia y K. L. F. Cevallos, «PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS: ANDERSON-DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV», 2021.
- [100, 102] H. Akoglu, «USER'S GUIDE TO CORRELATION COEFFICIENTS», Turkish Journal of Emergency Medicine, vol. 18, n.o 3, pp. 91-93, sep. 2018, doi: 10.1016/j.tjem.2018.08.001.
- [103, 113] «CCG-UNAM, TEMA 8 - CORRELACIÓN: TEORÍA Y PRÁCTICA», [En línea]. Disponible en: https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion.html
- [104, 109] F. Mendivelso, «PRUEBA NO PARAMÉTRICA DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN», Revista Médica Sanitas, vol. 24, n.o 1, Art. n.o 1, 2021, doi: 10.26852/01234250.578.
- [105] E. Lahura, EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN Y CORRELACIONES ESPÚREAS, vol. 218. Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Economía, 2003. Accedido: 24 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24082w/S7_01.pdf
- [107, 111] Y. Zeng, G. Badgley, B. Dechant, Y. Ryu, M. Chen, y J. A. Berry, «A PRACTICAL APPROACH FOR ESTIMATING THE ESCAPE RATIO OF NEAR-INFRARED SOLAR-INDUCED CHLOROPHYLL FLUORESCENCE», Remote Sensing of Environment, vol. 232, p. 111209, oct. 2019, doi: 10.1016/j.rse.2019.05.028.
- [110] I. Roy-García et al., «CORRELACIÓN: NO TODA CORRELACIÓN IMPLICA CAUSALIDAD», Revista alergia México, vol. 66, n.o 3, pp. 354-360, sep. 2019, doi: 10.29262/ram.v66i3.651.

[112] «Acerca de los índices de vegetación». Accedido: 8 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion

[114] P. Muñoz Aguayo, «Apuntes de teledetección : índices de vegetación.», abr. 2013, Accedido: 8 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26389>

Mendivelso, F. & Rodríguez, M. «PRUEBA NO PARAMÉTRICA DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN», Revista médica Sanitas, vol. 24, n° 1, pp. 42-45, ene. 2021, doi: 10.26852/01234250.578.

ANEXOS

ANEXO 1: GRAFICAS DE CORRELACIÓN DESDE 09 DE MARZO HASTA 28 DE MARZO.

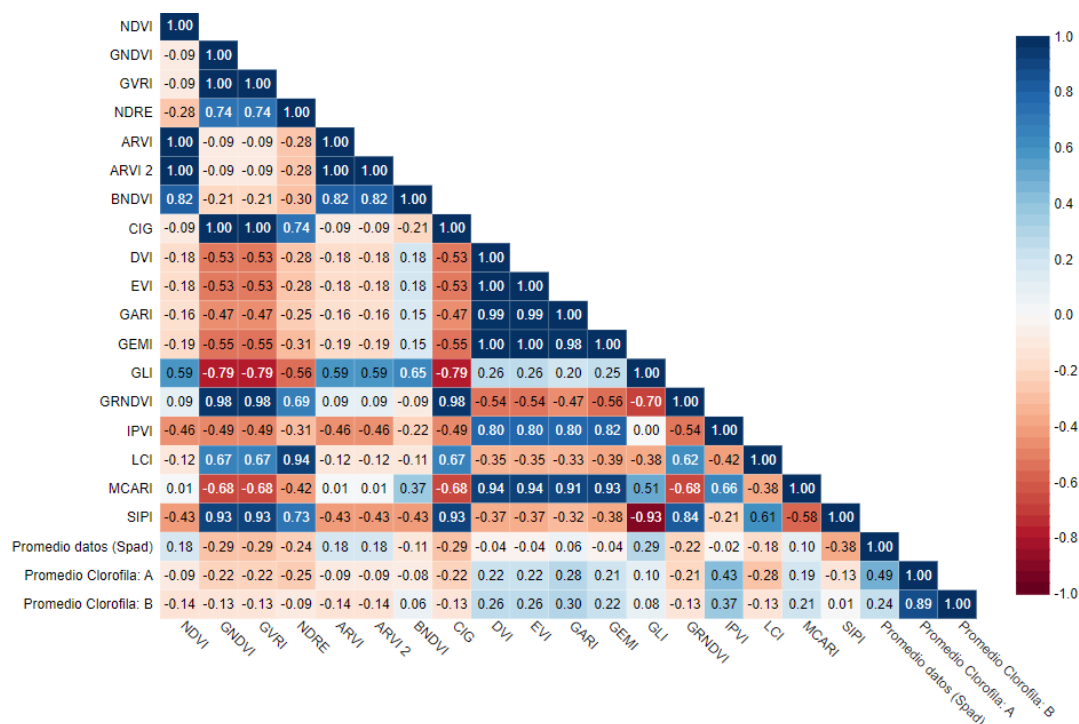


Figura 62 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 09/03/2023. Fuente autor.

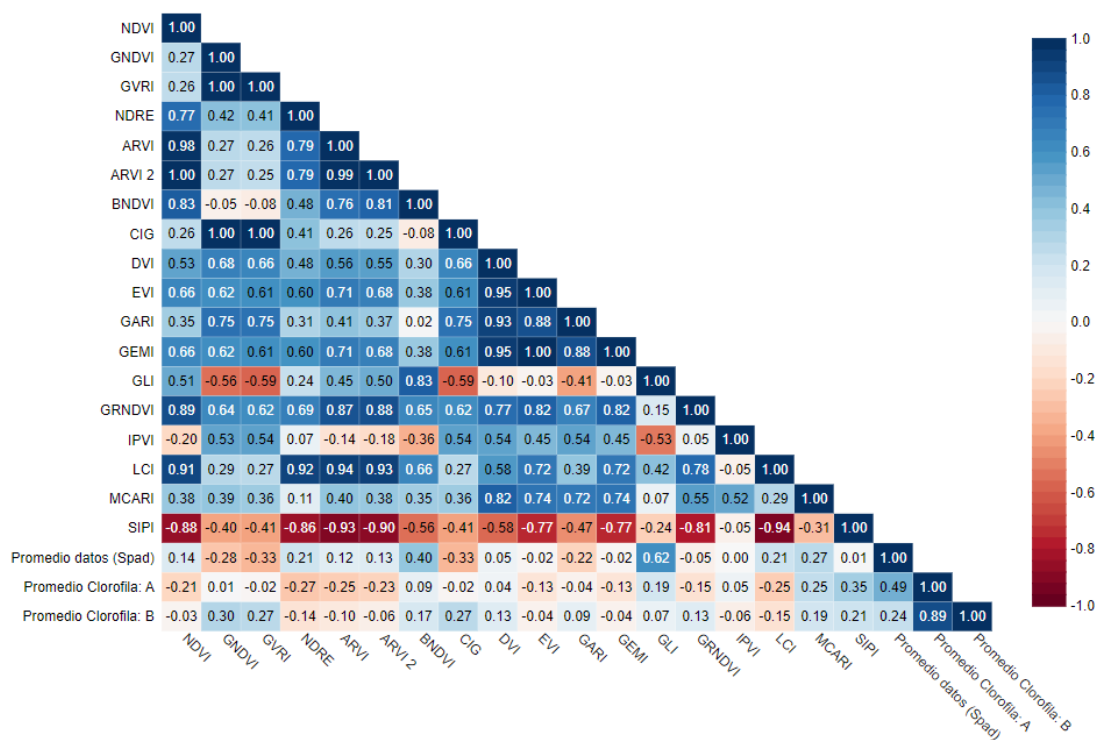


Figura 63 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 09/03/2023. Fuente autor.

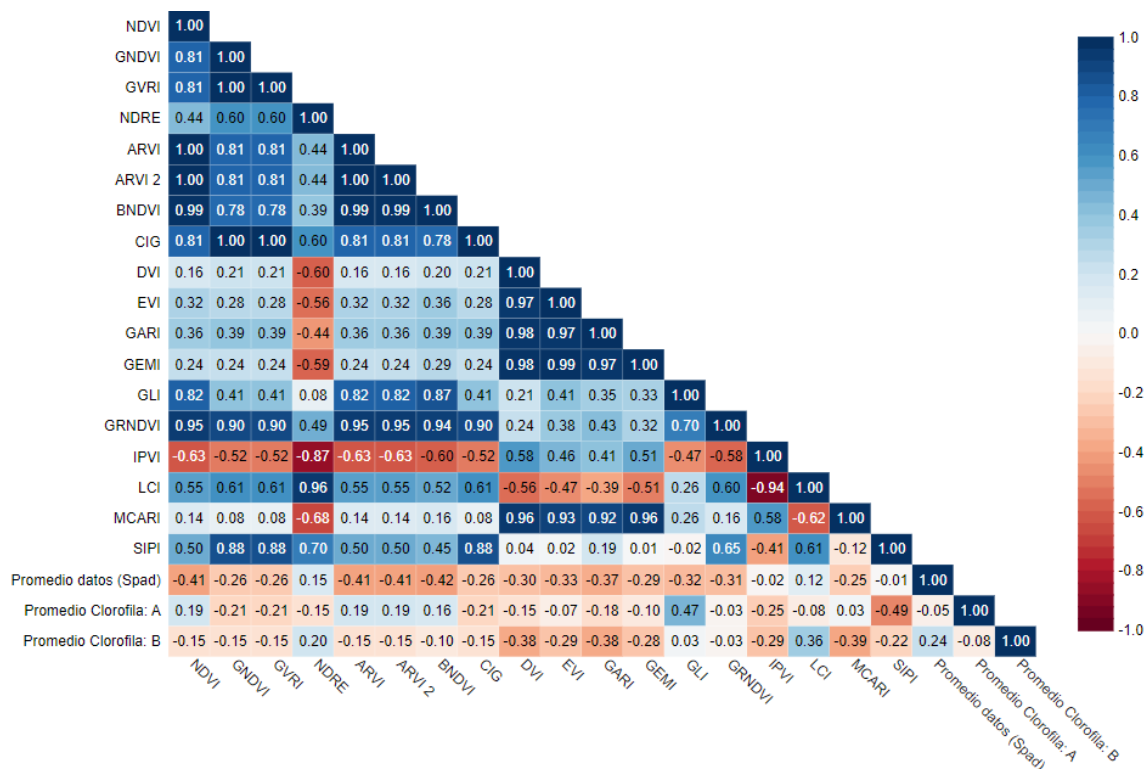


Figura 64 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 14/03/2023. Fuente autor.

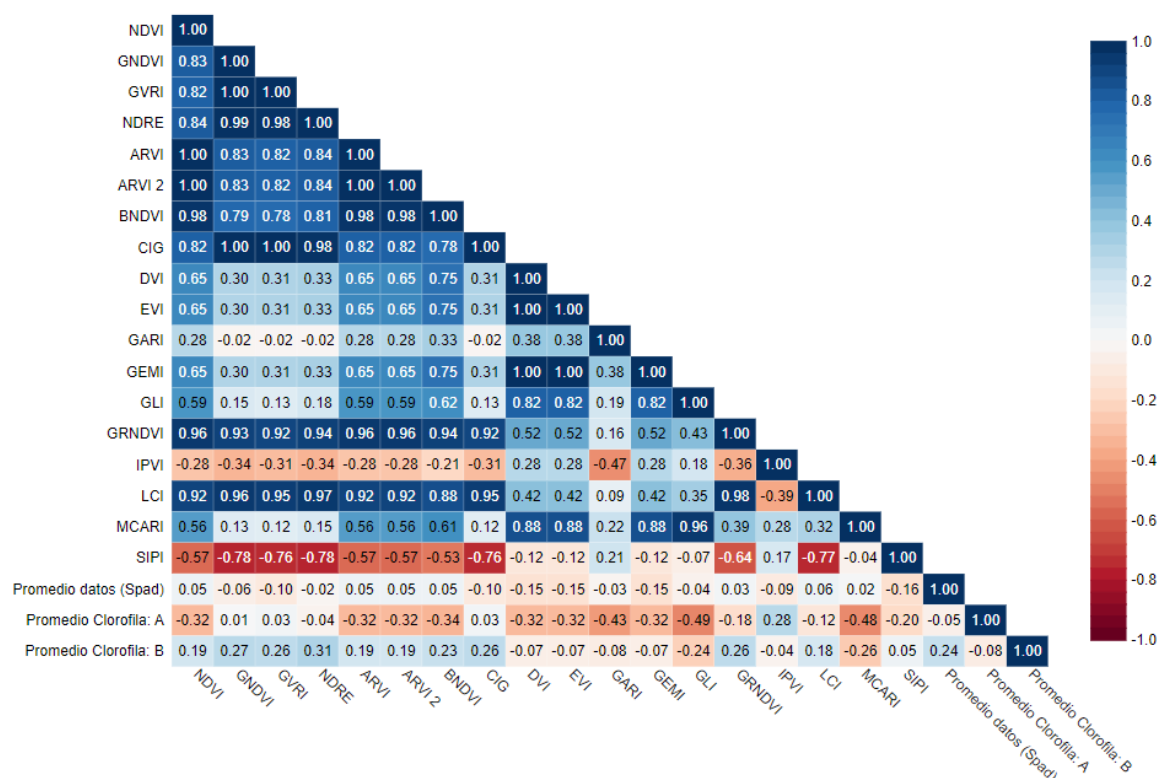


Figura 65 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 14/03/2023. Fuente autor.

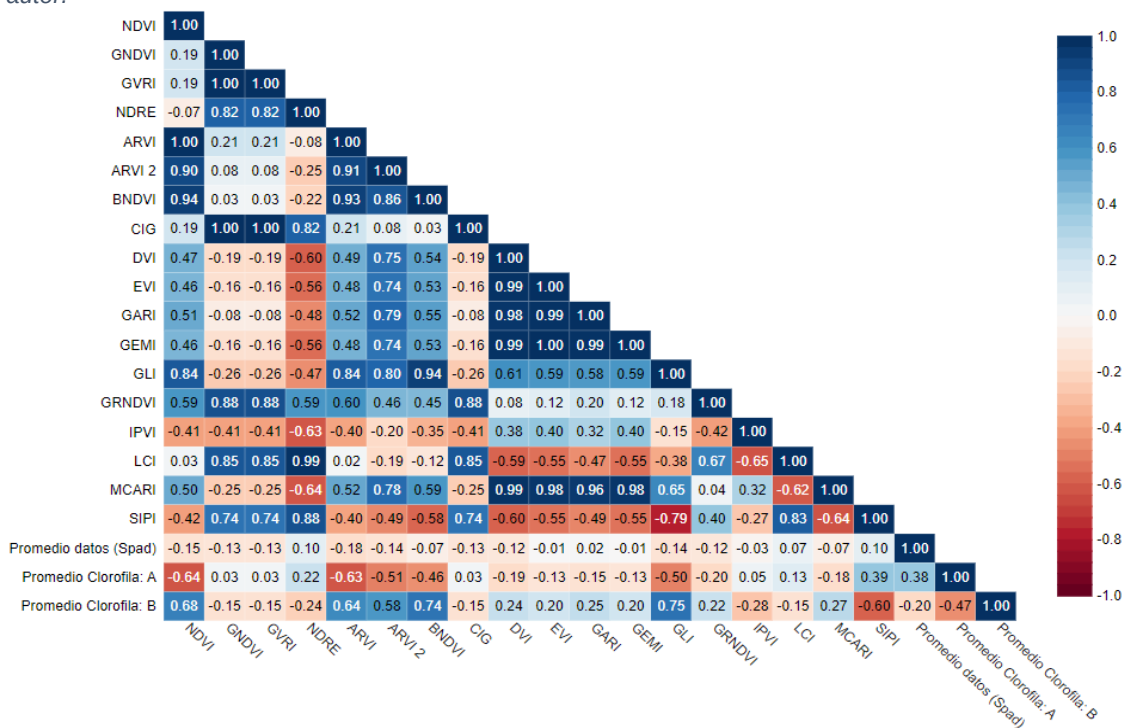


Figura 66 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 21/03/2023. Fuente autor.

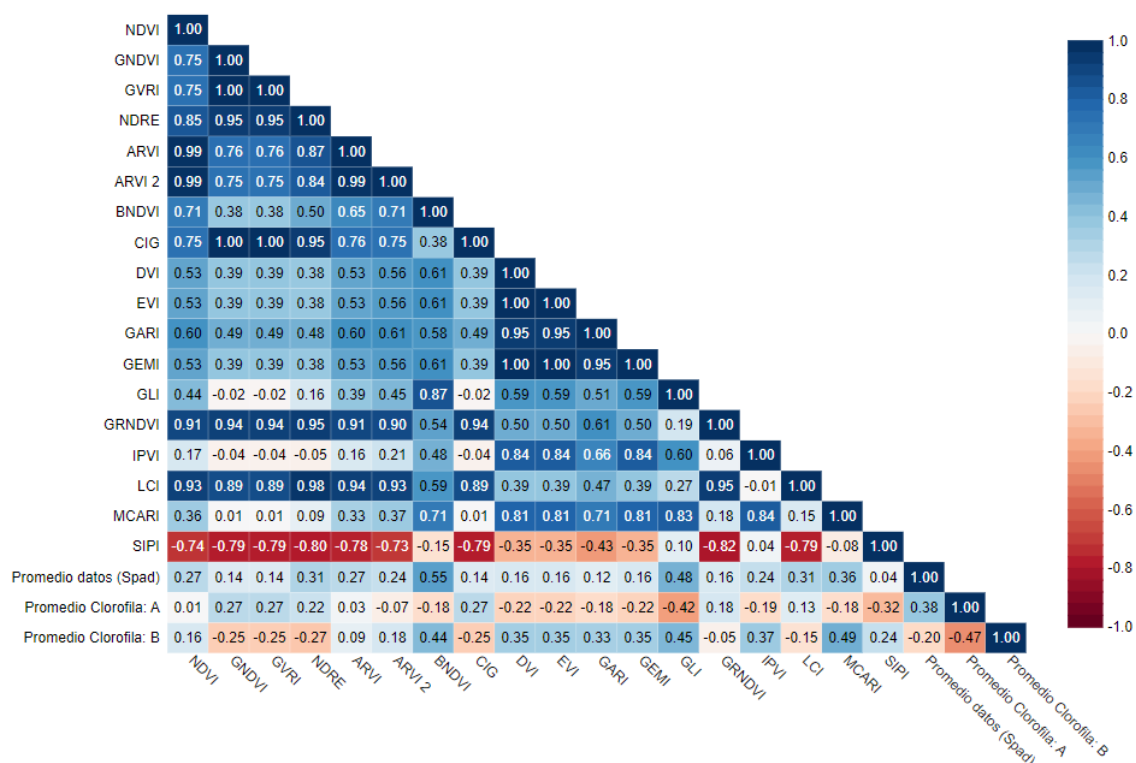


Figura 67 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 21/03/2023. Fuente autor

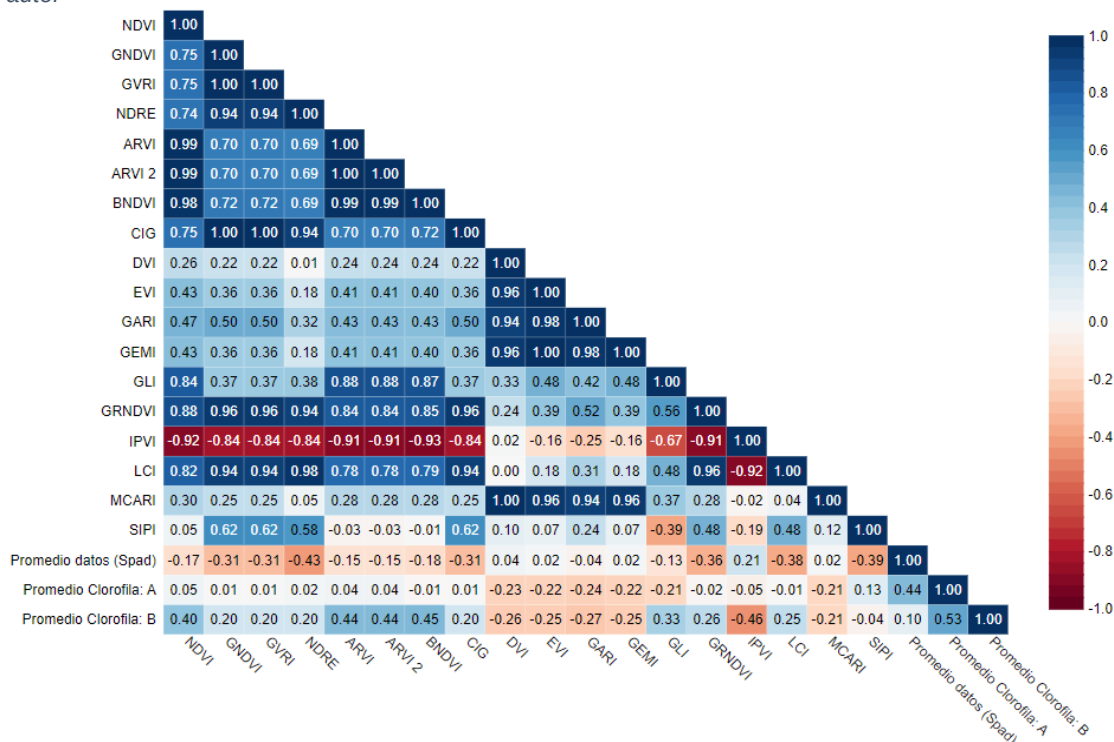


Figura 68 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 23/03/2023. Fuente autor.

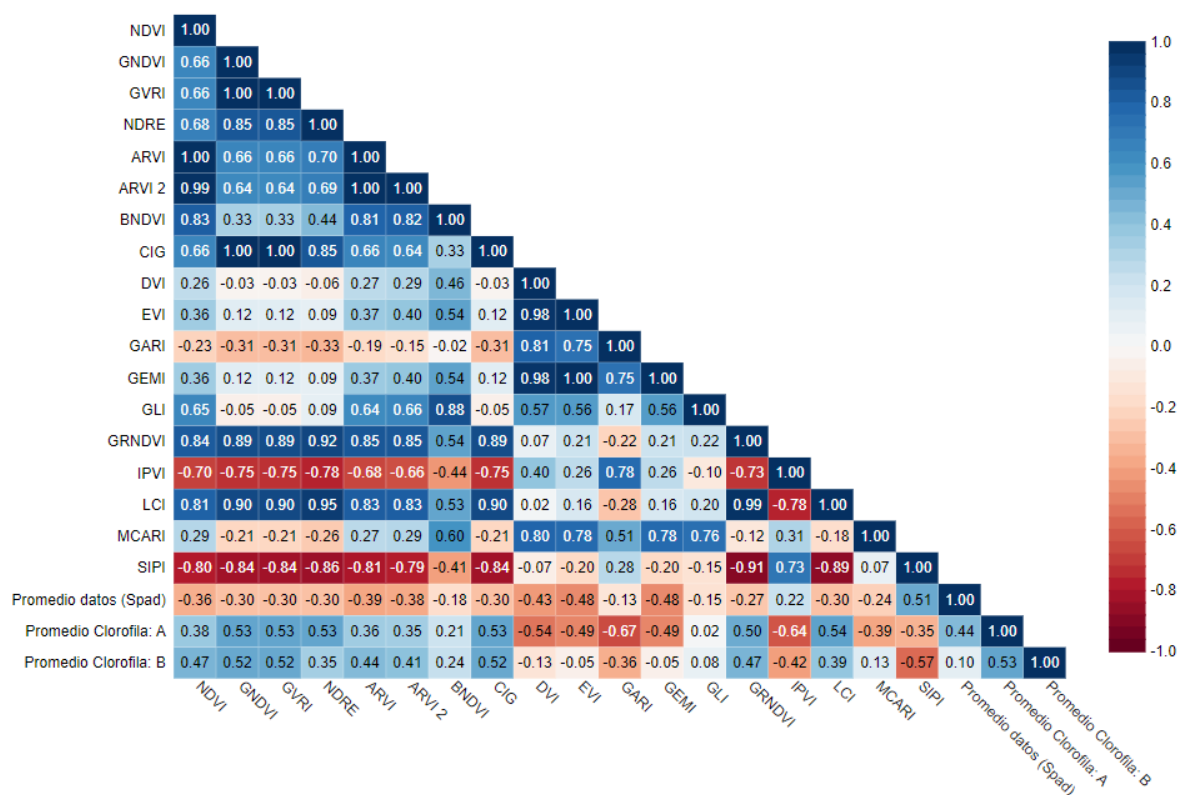


Figura 69 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 23/03/2023. Fuente autor.

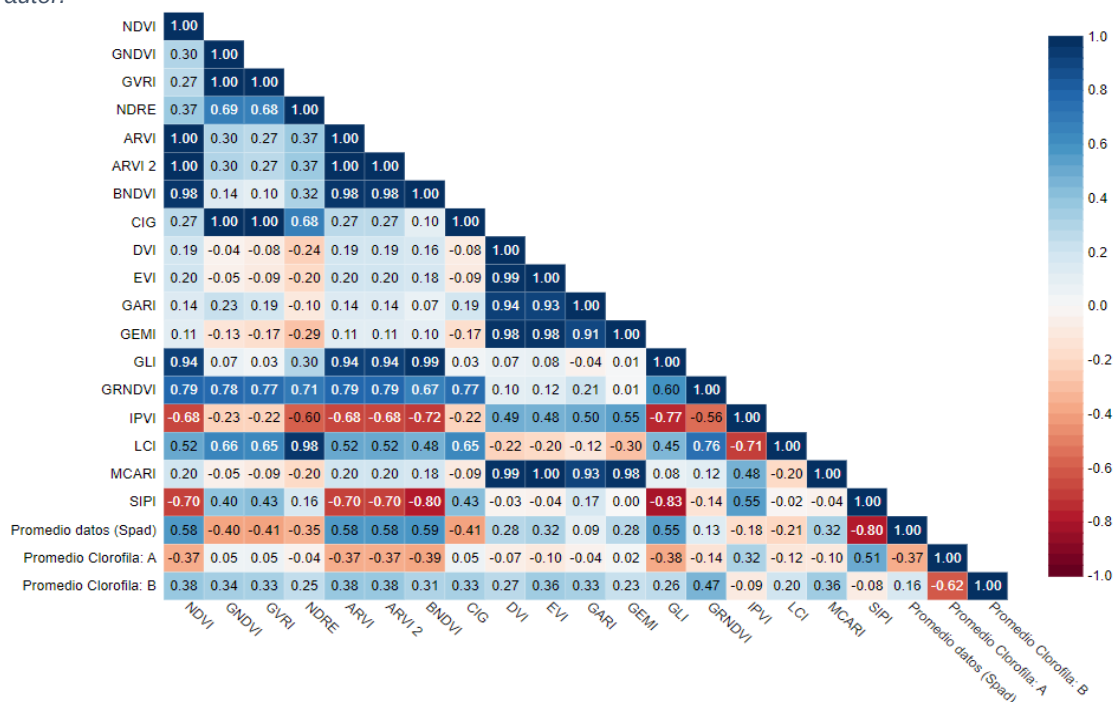


Figura 70 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge M del 28/03/2023. Fuente autor.

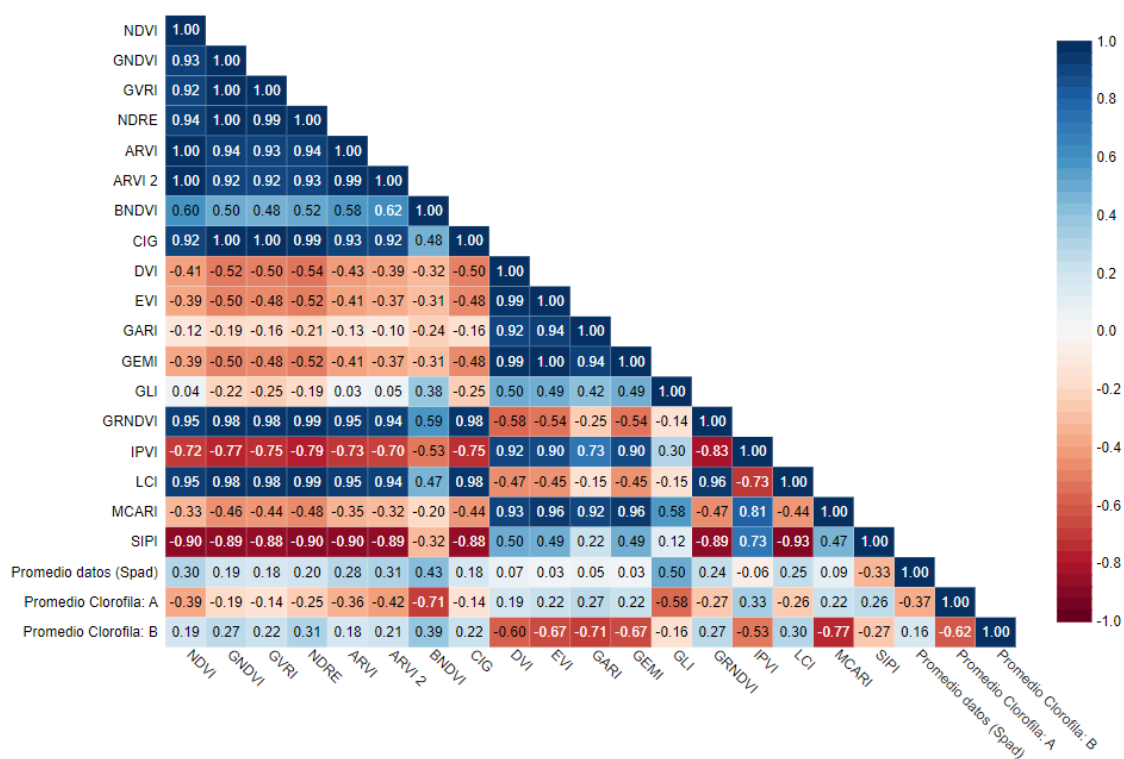


Figura 71 Correlación general con índices de cámara Micasense RedEdge Mx Blue del 28/03/2023. Fuente autor.

ANEXO 2: CONFIGURACIÓN DE APLICACIÓN DJI GS PRO

DISEÑO MISIÓN DE VUELO EN APLICACIÓN DJI GS PRO

Para crear la misión, se empleó la aplicación DJI GS Pro. El procedimiento inicia generando una nueva misión y seleccionando tanto el tipo de misión como el método de ajuste de puntos. El proceso se detalla en las figuras 72 a 86, donde se presentan los íconos que deben ser seleccionados de forma secuencial.



Figura 72 Aplicación DJI GS Pro. Fuente autor.

Primeramente, se abre la aplicación DJI GS Pro en un dispositivo que venga con sistema operativo iOS.

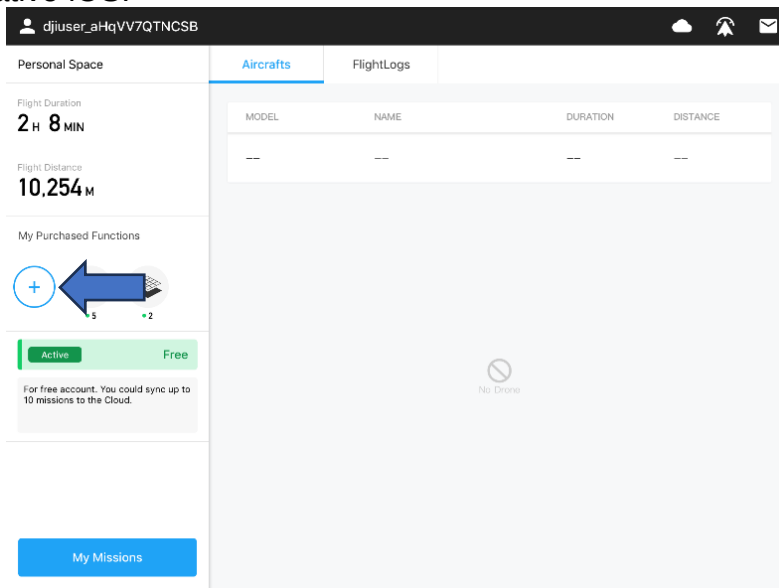


Figura 73 Selección icono de signo más. Fuente autor.

Después de abrir la aplicación, se mostrará la pantalla de inicio (figura 73), donde se deberá seleccionar el icono de signo más presionándolo.

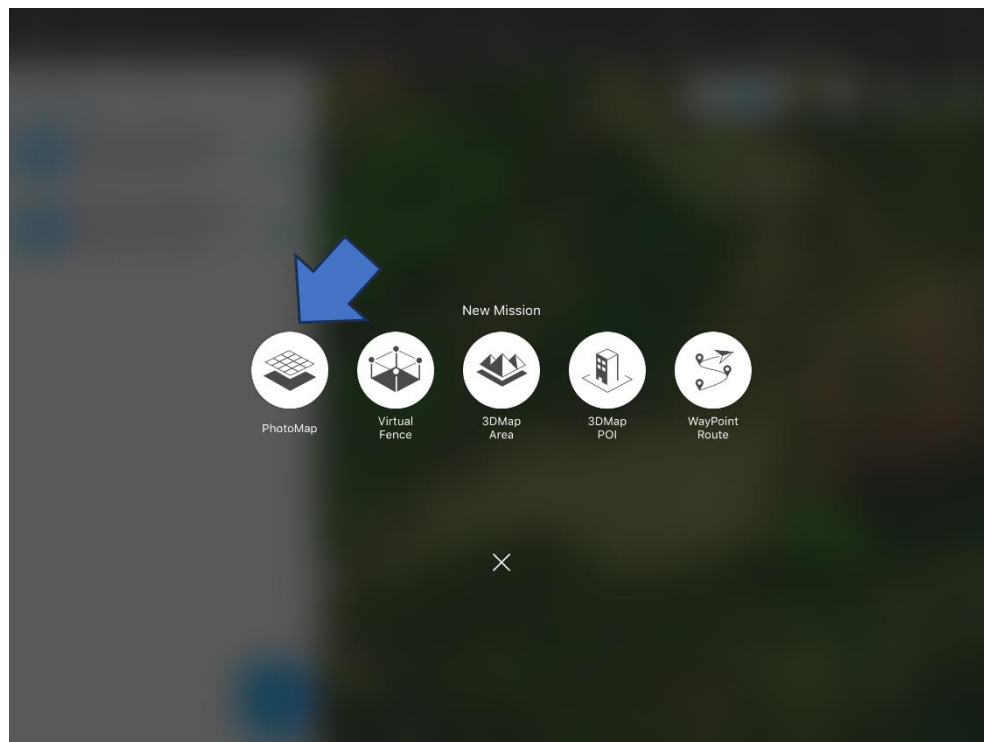


Figura 74 Icono PhotoMap. Fuente autor.

Después de presionar el icono de signo más, se desplegará un cuadro para seleccionar el nuevo tipo de misión (figura 74). En este caso, se debe elegir el icono denominado "PhotoMap".

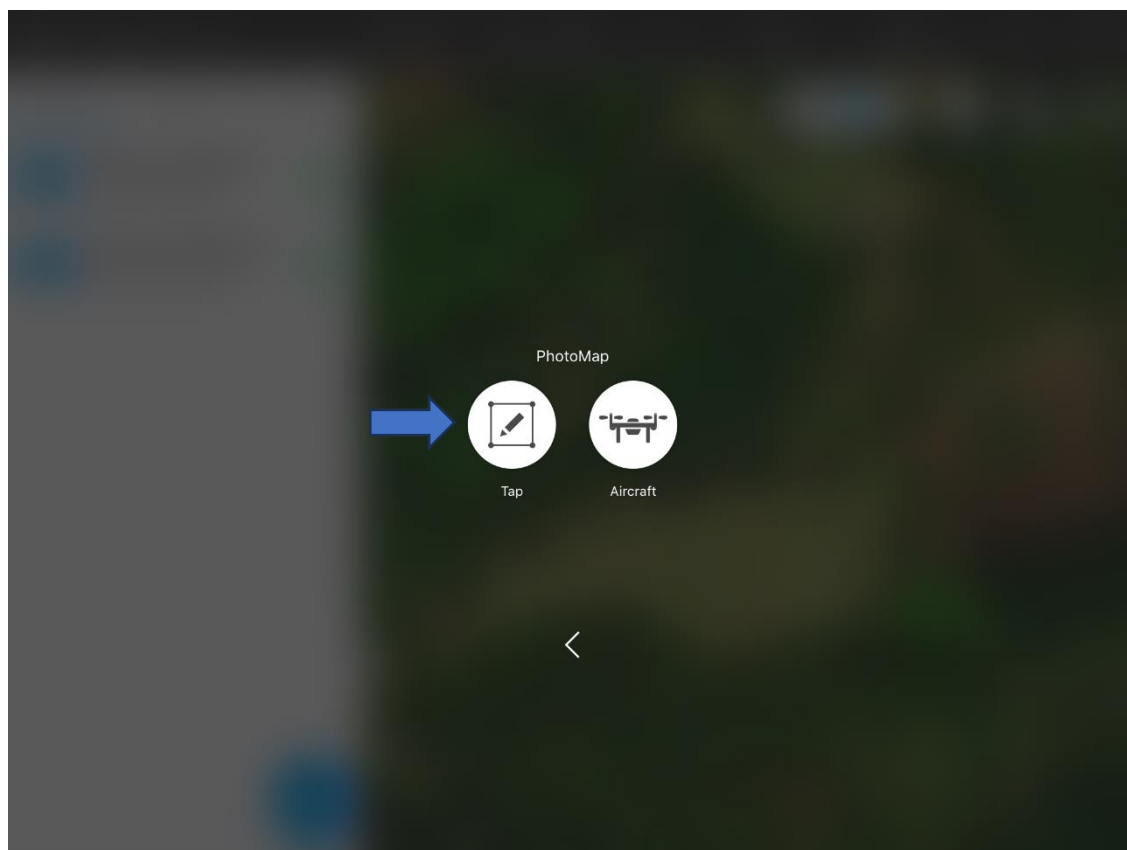


Figura 75 Icono Tap. Fuente autor.

Por último, se debe seleccionar el modo de mapeo a utilizar, y en este caso se eligió el modo "Tap" para poder delimitar un área específica donde se realizó el estudio.

De esta forma se delimitó la zona de trabajo, teniendo en cuenta los parámetros de vuelo y las coordenadas de los árboles seleccionados para el muestreo (figura 75).

Una vez que se haya optimizado la zona de vuelo, es necesario configurar las cámaras Micasense RedEdge-M y Micasense RedEdge-Mx Blue dentro de la aplicación DJI GS Pro. Esto se debe a que, al utilizar cámaras que no son de la marca DJI, es necesario añadirlas a la aplicación. A continuación, se detallan los pasos para llevar a cabo esta configuración.

Después de pulsar en "Tap" y delimitar la zona de vuelo, en la parte derecha (figura 73) aparecerán varios ítems que se pueden editar según las necesidades del vuelo. En la columna "Basic" se mostrarán el modelo de la cámara, el ángulo de vuelo, el modo de captura y el modo de curso de vuelo. Estos parámetros pueden ser ajustados de acuerdo a los requisitos específicos de la misión.

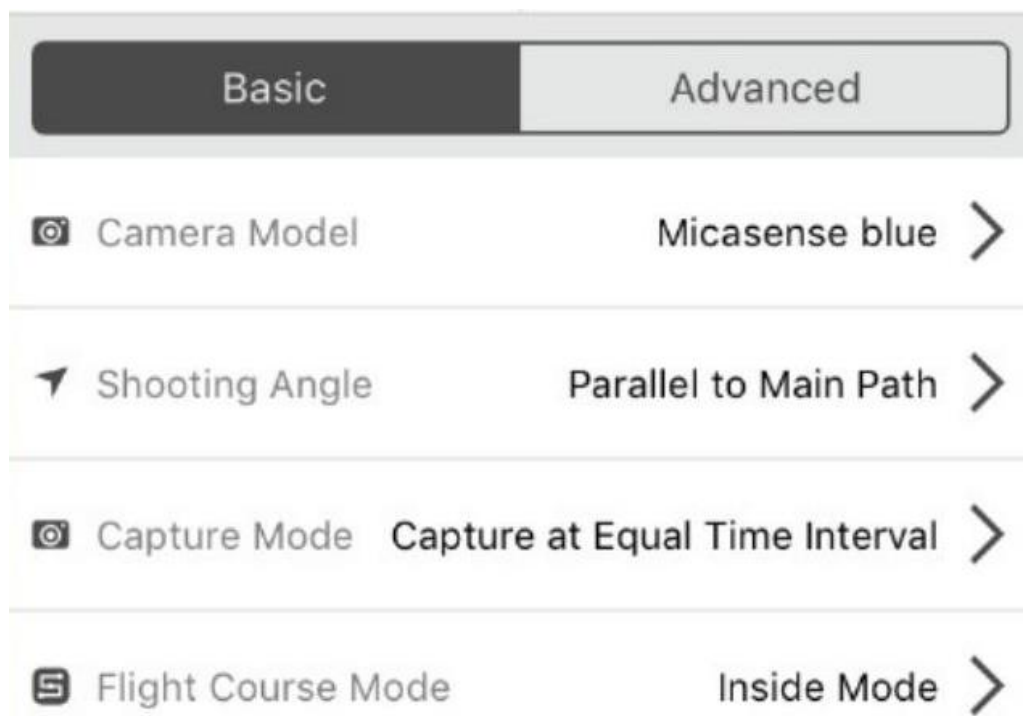


Figura 76 Configuración de Cámaras. Fuente autor.

Para acceder a las configuraciones de la cámara que se utilizará en el vuelo, el usuario debe hacer clic en "Camera Model" (figura 76). Una vez allí, deberá pulsar en "Change" para agregar una nueva cámara al sistema (figura 77). A continuación, se desplazará hacia abajo hasta encontrar la opción "Third Party Camera" (figura 78) y la seleccionará para acceder al menú donde podrá ingresar los parámetros de la cámara a utilizar. Finalmente, se pulsará en la opción "Add Camera" (figura 79) para guardar la configuración de la cámara. Este proceso deberá repetirse tanto para la cámara Micasense RedEdge-M como para la cámara Micasense RedEdge-Mx Blue, siguiendo los mismos pasos en ambos casos.

Micasense Rededge MX Blue

Waypoints Qty.
2 PTS

Flight Length
125 M

Course Count
1 Lines

Cover Area
0.27 HA

Micasense blue

Sensor Resolution
1280*960 px²

Sensor Size
4.8*3.6 mm²

Focus Length
5.4mm / Real

Capture Interval
1.0 - 2.0 s

Change

Edit

Figura 77 Camera Model. Fuente autor.

Zenmuse X5S

Zenmuse X7

Zenmuse Z3

Zenmuse XT

Zenmuse Z30

Hasselblad H6D-50c

Hasselblad H6D-100c

Hasselblad A6D-100c

Thrid Party Camera

Figura 78 Thrid Party Camera. Fuente autor.

Name	Micasense b...
Sensor Res. Width	1280
Sensor Res. Height	960
Sensor Width	4.8
Sensor Height	3.6
35mm Equ.	☐
Focus Length	5.4
Min Shutter Intv.	1.0
Max Shutter Intv.	2.0

Add Camera

Figura 79 Add Camera. Fuente autor.

Esto posibilita la verificación de los parámetros de la aplicación mediante cálculos matemáticos, como el GSD y la velocidad de vuelo. Para lograrlo, se deben configurar los parámetros de la ventana "Basic" de la siguiente manera.

Primero, se selecciona la opción de la cámara personalizada y se elige un ángulo de vuelo paralelo a la dirección de la cámara. A continuación, se configura el modo de captura en "por tiempo", lo que permite ingresar el valor de tiempo de obturación requerido. En este caso, se ingresó un valor de 2 segundos para este estudio. Luego, se ingresa la altura de vuelo, lo cual automáticamente genera en la aplicación los valores de GSD y velocidad de vuelo. En las figuras 80 y 81 se pueden

apreciar que los valores coinciden con los obtenidos en el diseño de vuelo, lo que indica un plan de vuelo correcto.

Micasense Rededge M	
Waypoints Qty. 2 PTS	Flight Length 95 M
Course Count 1 Lines	Cover Area 0.27 HA
Basic Advanced	
Camera Model	Micasense Rededge MX >
Shooting Angle	Parallel to Main Path >
Capture Mode	Capture at Equal Time Interval >
Flight Course Mode	Inside Mode >
Speed 5.0 M/S	Shutter Intv. 1.0 SEC
Height 30.0 M	Resolution 2.1 CM/PX

Figura 80 Ventana Basic M. Fuente autor.

Micasense Rededge MX Blue	
Waypoints Qty. 2 PTS	Flight Length 125 M
Course Count 1 Lines	Cover Area 0.27 HA
Basic Advanced	
Camera Model	Micasense blue >
Shooting Angle	Parallel to Main Path >
Capture Mode	Capture at Equal Time Interval >
Flight Course Mode	Inside Mode >
Speed 2.6 M/S	Shutter Intv. 1.0 SEC
Height 60.0 M	Resolution 4.2 CM/PX

Figura 81 Ventana Basic Mx Blue. Fuente autor.

Las opciones de configuración de las líneas de vuelo se encuentran en la ventana "Advanced" de la aplicación. En esta sección, se pueden ajustar el solapamiento longitudinal, el solapamiento lateral y el ángulo de curso, lo que permite lograr una orientación paralela entre las líneas de vuelo y la dirección del terreno. Esta configuración se pueden visualizar en las figuras 82 y 83, donde se observa que se ingresa un solapamiento frontal del 75%. Esto se realiza para asegurar que solo se genere una línea de vuelo en la aplicación.

Micasense Rededge MX Blue

Waypoints Qty.
2 PTS

Flight Length
125 M

Course Count
1 Lines

Cover Area
0.27 HA

Basic

Advanced

Front Overlap Ratio 75 %

Side Overlap Ratio 51 %

Course Angle 208 °

Margin 0.0 M

End-Mission Action

Hover >

Figura 82 Ventana Advanced Mx Blue. Fuente autor.

Micasense Rededge M

Waypoints Qty.
2 PTS

Flight Length
95 M

Course Count
1 Lines

Cover Area
0.27 HA

Basic

Advanced

Front Overlap Ratio 75 %

Side Overlap Ratio 10 %

Course Angle 207 °

Margin 0.0 M

End-Mission Action

Hover >

Figura 83 Ventana Advanced M. Fuente autor.

El diseño de las misiones en la aplicación DJI GS Pro estaría completo y listo para cargarse al DJI Phantom 4 (figura 84 y 85).

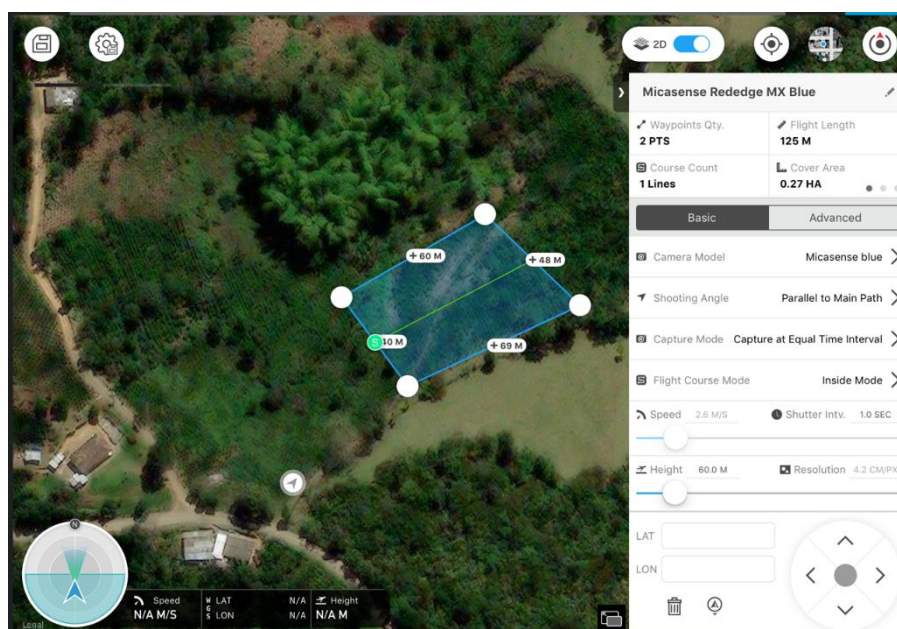


Figura 84 Misión completa Micasense Mx Blue. Fuente autor.

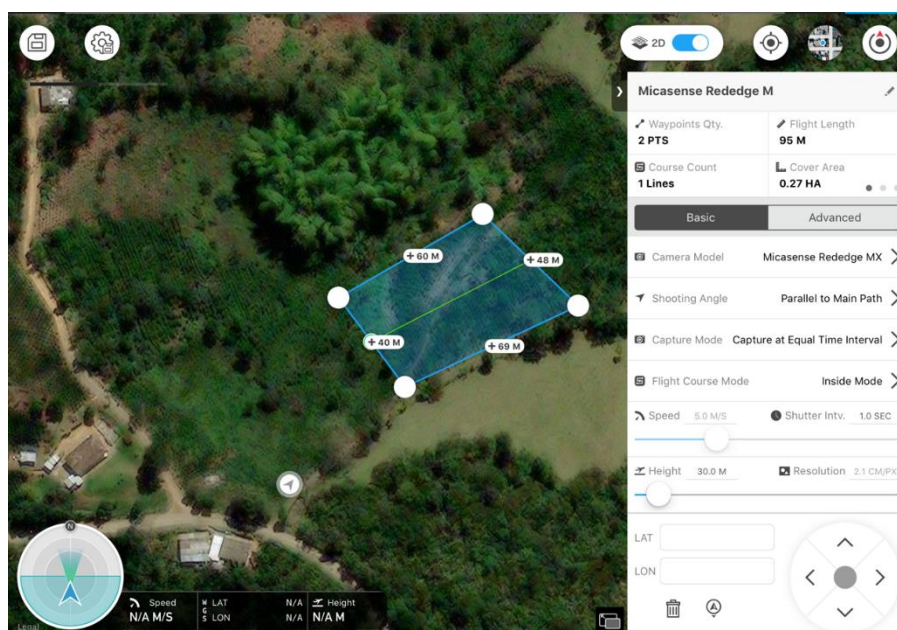


Figura 85 Misión completa Micasense M. Fuente autor.

ANEXO 3: CALIBRACIÓN DRONE PHANTOM 4

El proceso de implementación del plan de vuelo comienza con la calibración del dron DJI Phantom 4, utilizando la aplicación DJI Go 4 (figura 86).



Figura 86 Aplicación DJI GO 4. Fuente autor.

Esta calibración comienza con la calibración del IMU (Unidad de Medición Inercial) del dron, siguiendo los pasos proporcionados por la aplicación.

La calibración del IMU se realiza sin las hélices del dron. Consiste en colocar el dron en seis posiciones diferentes sobre una superficie plana, como se muestran en las figuras 87 y 88. Se debe mantener cada posición durante un tiempo específico antes de que la aplicación solicite cambiar a la siguiente posición. Este proceso se repite hasta completar las seis posiciones.

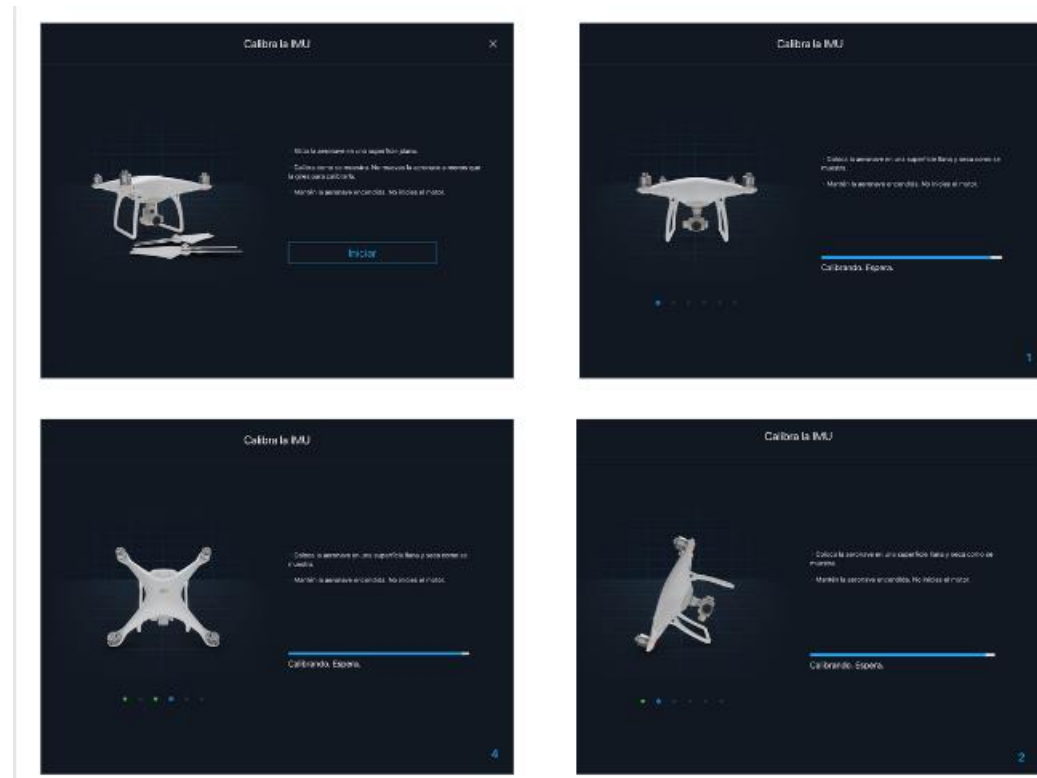


Figura 87 Calibración IMU. Fuente autor.

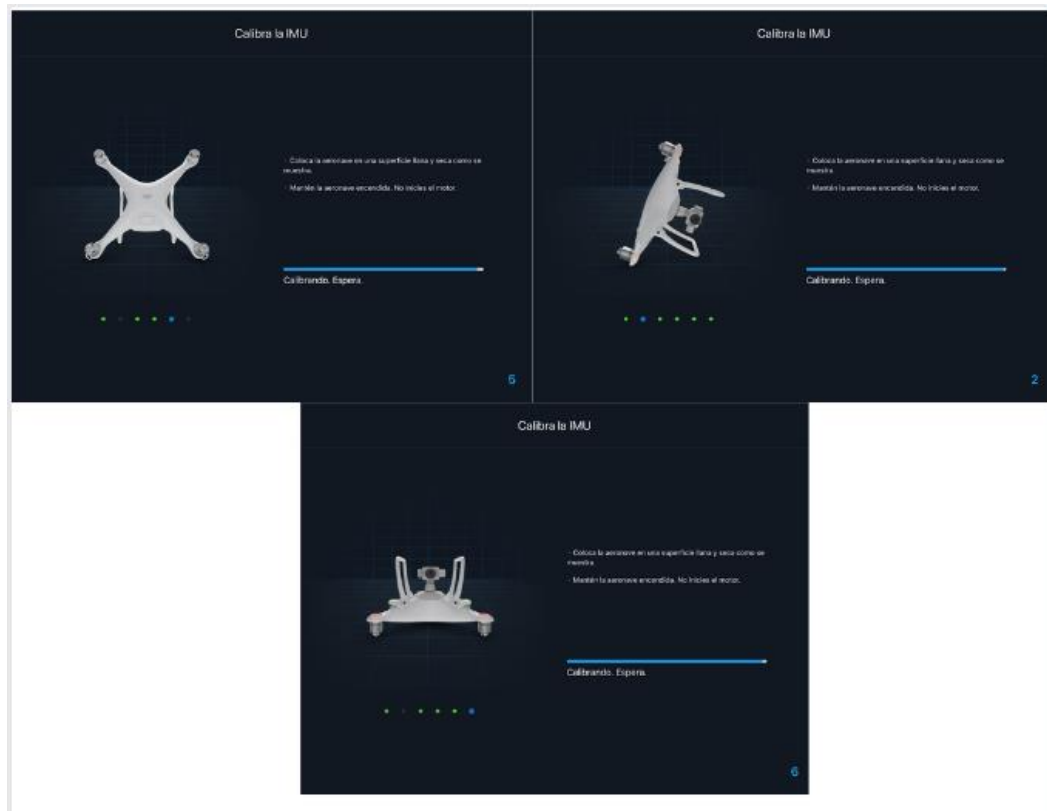


Figura 88 Calibración IMU. Fuente autor.

Al terminar los pasos anteriores aparecerá una notificación sobre la correcta calibración del IMU como se muestra en la figura 89.

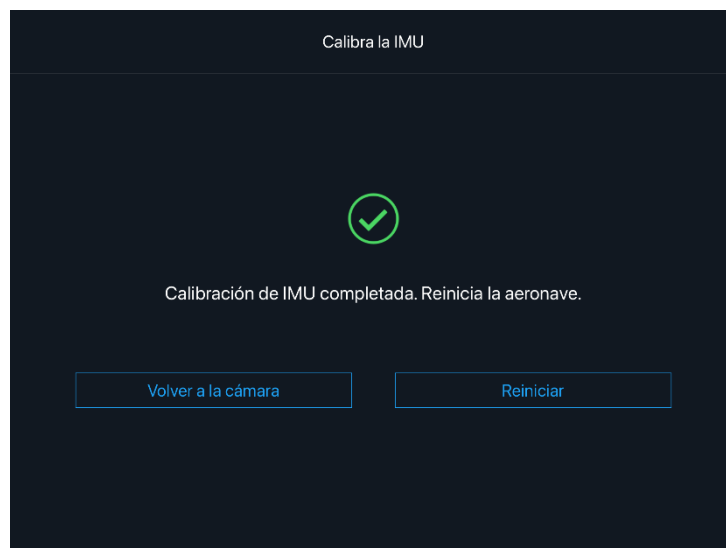


Figura 89 Notificación calibración IMU. Fuente autor.

Después de completar la calibración del IMU, se procede a calibrar la brújula del dron, la cual es responsable de determinar su orientación en relación al campo magnético terrestre para realizar sus movimientos de manera precisa. Este proceso consta de dos pasos, tal como se muestra en la figura 90. Básicamente, implica girar el dron 360 grados alrededor de su eje en posición horizontal, seguido de un segundo giro de 350 grados alrededor de su eje en posición vertical.



Figura 90 Pasos calibración brújula drone phantom 4. Fuente autor.

Una vez terminada la calibración de la brújula en la parte superior de la pantalla deberá indicar que el dron está listo para el despegue (figura 91).

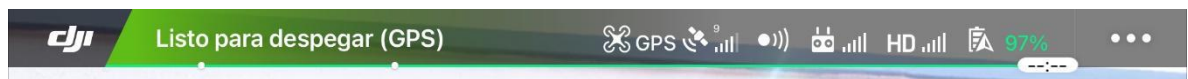


Figura 91 Listo para despegar. Fuente autor.

Esto asegurará que el DJI Phantom 4 pueda llevar a cabo la misión de vuelo de manera precisa.