

Anfruns España, Ll. (2023). Uso y aplicación de sensores RGB y multiespectral embarcados en dron para la monitorización del cultivo de café. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (Artículos), 31, 5-38. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.800>

USO Y APLICACIÓN DE SENSORES RGB Y MULTIESPECTRAL EMBARCADOS EN DRON PARA LA MONITORIZACIÓN DEL CULTIVO DE CAFÉ

Llorenç Anfruns España
ll_a_e@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo de este estudio es valorar la aplicabilidad del uso de los drones y sus respectivos sensores en el cultivo de café para una región productora del centro de Colombia, extrapolable y comparable al resto de zonas del país. Este proyecto pretende analizar los productos obtenidos con sensores RGB y multiespectral, evaluando la utilidad que puedan tener para los caficultores en su trabajo habitual a lo largo del año. Un primer análisis se centra a modo general en la elaboración de ortofotomapas, modelos digitales de elevaciones y productos derivados. En segundo lugar, se analiza la planificación de vuelos en zonas abruptas de fuertes pendientes para seleccionar el más apropiado a partir de varios vuelos a distintas alturas y condiciones de adquisición de datos. Los resultados de los datos multiespectrales obtenidos con las diferentes bandas muestran índices de vegetación e imágenes en falso color, de diversas tomas y en distintos días. La finalidad de esta parte del estudio es, además, proponer una metodología para conseguir un aproximado de la producción por parcela.

Palabras clave: dron; *Coffea arabica*; MDE; índices de vegetación; GARI.

USE AND IMPLEMENTATION OF RGB AND MULTISPECTRAL SENSORS INSTALLED IN DRONES FOR THE MONITORING OF COFFEE CROPS

ABSTRACT

The main goal of this study is to evaluate the applicability of drone usage and their respective sensors in coffee growing for a producing region in the centre of Colombia, which can be extrapolated and comparable to other zones in the country. This project aims to analyse the products obtained with RGB and multispectral sensors, evaluating the utility they may have for coffee growers in their regular work over the year. The first analysis is focused on the development of orthophotomaps, digital elevation models and derived products. Secondly, the analysis of flight planning over precipitous zones with important gradients has allowed to select which the most suitable configuration based on several flights at

different heights and data acquisition conditions. The results of multispectral imaging obtained data with the different bands, showed vegetation indexes and false colour imagery, from various campaigns on separate days. The objective of this part of the study is to also suggest a method to obtain an approximate value of the production of each smallholding.

Keywords: drone; *Coffea arabica*; DEM; vegetation indexes; GARI.

1. Introducción

El uso de los drones y su aplicabilidad presente y futura está cada vez más en extensión en diversos ámbitos. La mejora en sus sensores, la seguridad del vuelo y la adaptación que poco a poco va adquiriendo la legislación en torno a ellos, hace que muchos científicos y profesionales se planteen adquirirlo no sólo por afición sino a modo profesional.

El sector de la agricultura es uno de los que más fuertemente están apostando por su utilización, permitiendo la obtención regular de datos de sus cultivos a lo largo del ciclo fenológico y a partir de estos datos aplicar los insumos necesarios de manera más eficiente. En materia de café y para el campo colombiano, es el Centro Nacional de Investigaciones de Café –Cenicafé– perteneciente a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, uno de los que más investigaciones y trabajos lleva realizando a lo largo de su historia. Ejemplo de ellos son numerosas publicaciones como la que hace referencia a la fenología del café (Ramírez, 2014) o la que describe la nueva variedad de café Castillo con resistencia a la roya, fruto del cruce entre la Caturra e Híbrido de Tímor (Alvarado *et al.*, 2005), entre muchas otras.

La propia morfología del cafeto, su densidad de hojas y la topografía en la que normalmente se cultiva, hace que su análisis requiera un especial cuidado. Para la especie *Coffea arabica* –mayoritaria en Colombia– en recientes estudios se describe la correlación entre el contenido de clorofila foliar e índices espectrales (Solís *et al.*, 2021), se analizan los índices de vegetación *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI) y *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE) para la misma especie (Revelo *et al.*, 2020) y para la variedad Castillo, se estudia el procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el NDVI (Bonnaire *et al.*, 2021). Los citados artículos están elaborados por la Corporación Universitaria Comfacauca, Universidad del Cauca y Parque Tecnológico de Innovación del Café –Tecnicafé–.

La hipótesis de la presente investigación pretende demostrar la utilidad, aplicación y viabilidad del uso de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV) o drones en la caficultura del campo colombiano teniendo en cuenta que esta se desempeña de forma muy tradicional y manual en cada una de sus fases de producción.

2. Materiales y métodos

2.1 Datos preliminares

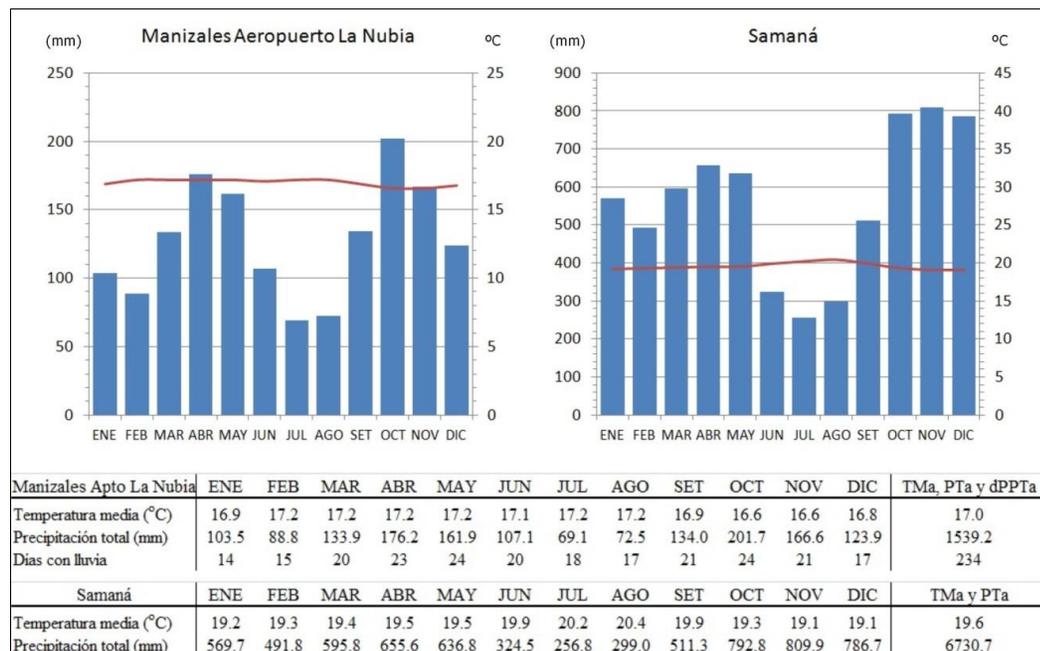
Previo al estudio presentado en esta investigación, se elaboró un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del territorio colombiano a 90 m de resolución espacial, y a 30 m por departamentos a partir de los datos obtenidos del proyecto conjunto entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA), denominado *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que orbitó y tomó datos de la Tierra entre el 11 y 22 de febrero del año 2000, para crear el primer conjunto casi global de elevaciones terrestres. Dichos datos obtenidos son útiles para estimar la exactitud vertical de grandes extensiones y valorar su aplicabilidad en regiones de fuerte topografía (Capachero *et al.*, 2015).

Tabla 1. Clasificación climática basada en pisos térmicos

Piso térmico	Rango elevación (m)	Rango temperaturas (°C)
Cálido	0 a 800	≥ 24
Templado	800 a 1800	24 a 18
Frío	1800 a 2800	18 a 12
Muy frío	2800 a 3700	12 a 6
Extremadamente frío	3700 a 4700	6 a 0
Nival	> 4700	< 0

Fuente. Clasificación de Caldas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM

El régimen de lluvias es de tipo bimodal, con una temporada seca principal a mitad de año y una segunda, de menor intensidad, en los meses de enero y febrero. Las cantidades de lluvia presentadas son mayores de marzo a mayo y de octubre a noviembre. Sirva a modo de ejemplo de variabilidad dentro de la región los siguientes climogramas de dos municipios caldenses representados en la Figura 2.

**Figura 2. Climogramas para el período 1981 - 2010**

Fuente. Atlas Interactivo Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Elaboración propia

En Colombia se producen dos cosechas al año; una cosecha principal y otra conocida localmente como *mitaca*. Para la región de estudio, las altitudes aptas para el cultivo del café van desde los 1300 m a 1800 m (Figura 3). La cosecha principal se recolecta entre setiembre y diciembre, y la *mitaca* va de abril a mayo. Las variedades cultivadas son por este orden Caturra 57 %, Castillo 35 % y Typica 8 % (Hoffmann, 2018).

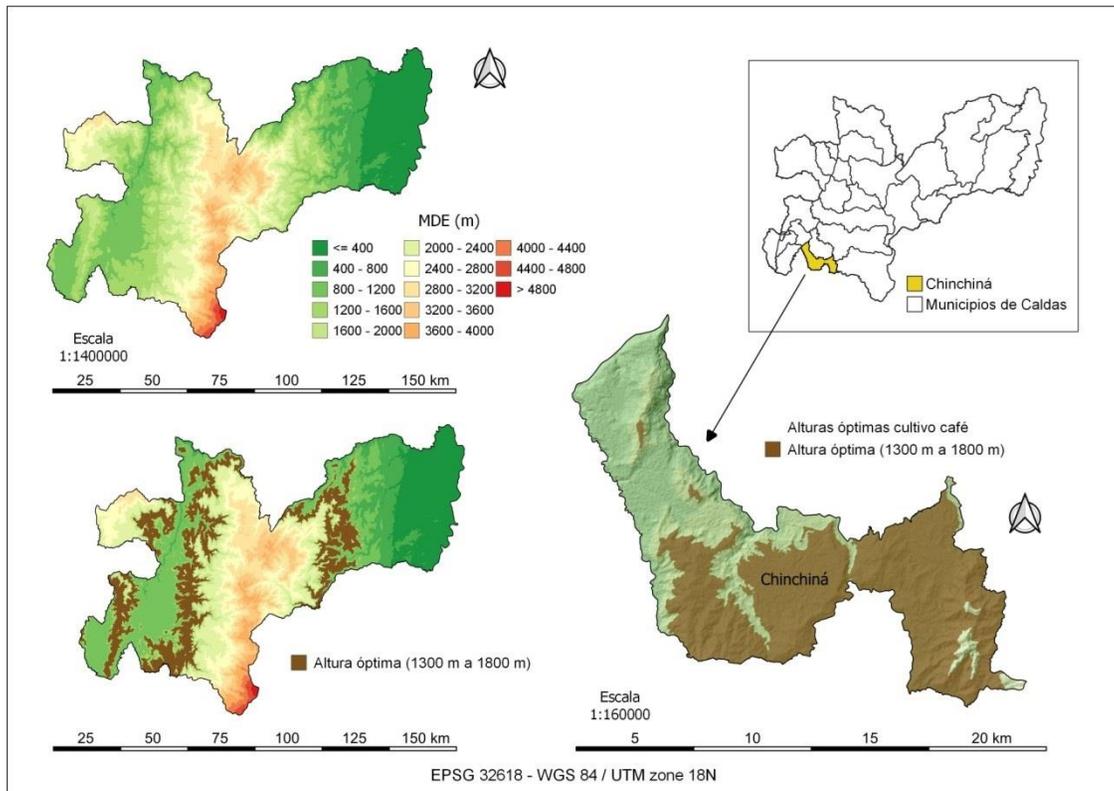


Figura 3. Zonas óptimas para el cultivo de café en Caldas según altitud
Fuente. *The world atlas of coffee*, Hoffmann y datos ALOS PALSAR. Elaboración propia

2.3 Materiales

El dron utilizado para hacer los levantamientos es un cuadricóptero de la marca DJI modelo Phantom 4 Multiespectral, dispone de módulo RTK (*Real Time Kinematic*) que le confiere una precisión centimétrica. Va equipado con una cámara de 6 sensores de 2 MP cada uno (RGB, azul (A), verde (V), rojo (R), borde rojo (BR) e infrarrojo cercano (IRc)) con obturador global y estabilizador de 3 ejes. El peso total de despegue de la aeronave es de 1487 g (Figura 4).



Figura 4. Dron DJI Phantom 4 Multiespectral
Fuente. Elaboración propia.

Tiene un tiempo máximo de vuelo de 27 min por batería y es posible adquirir datos de unas 63 ha volando a 180 m con una Medida de Píxel en Terreno (MPT) de 9.52 cm –según el fabricante–. Dispone de un sensor de luz incidente que detecta la irradiancia solar en tiempo real para compensar las variaciones producidas por los cambios en la luz solar a lo largo del día (Tabla 2).

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sensor

Sensores	Seis CMOS de 1/2.9" con un sensor RGB para imágenes de luz visible y cinco sensores monocromos para imágenes multiespectrales. Cada sensor: píxeles efectivos 2.08 MP (píxeles totales: 2.12 MP)
Filtros	Azul (A): 450 nm \pm 16 nm; Verde (V): 560 nm \pm 16 nm; Rojo (R): 650 nm \pm 16 nm; Borde Rojo (BR): 730 nm \pm 16 nm; Infrarrojo cercano (IRc): 840 nm \pm 26 nm
Objetivos	FOV (campo de visión): 62.7° Distancia focal: 5.74 mm (equivalente en formato de 35 mm: 40 mm), enfoque automático ajustado a ∞ Apertura f/2.2
Rango ISO del sensor RGB	200 – 800
Ganancia del sensor monocromo	1 – 8x
Obturador electrónico global	1/100 – 1/20 000 s (imagen de luz visible); 1/100 – 1/10 000 s (imagen multiespectral)
Tamaño de imagen máximo	1600 x 1300 (4:3.25)
Formatos de fotografía	JPEG (imagen de luz visible) + TIFF (imagen multiespectral)
Sistemas de archivos compatibles	FAT 32 (\leq 32 GB); exFAT ($>$ 32 GB)

Fuente. Manual de usuario DJI Phantom 4 Multiespectral (2020)

La planificación de los vuelos, calibración de los sensores, brújula, IMU, así como las diferentes características que se pueden escoger a la hora de ejecutar el vuelo, se realizaron mediante la aplicación DJI GS Pro (dicha aplicación muestra una MPT aproximada que no tiene en cuenta la topografía del terreno). El software utilizado en el procesamiento de los datos obtenidos por el dron es el software de fotogrametría Agisoft Metashape Professional (64 bit) en su versión 1.7.3. Para la representación cartográfica –mapas y planos– así como para algunos análisis de la parte multiespectral, se ha utilizado el software libre QGIS Desktop 3.10.9 LTR.

Todos y cada uno de los vuelos realizados en el proyecto han seguido las recomendaciones y cumplido con la legislación actual que rige en Colombia mediante Aeronáutica Civil, a partir del Apéndice 13 del RAC 91 “Operación de Sistemas de Aeronaves No Tripuladas–UAS”, adoptado por medio de la Resolución N° 4201 del 27 de diciembre de 2018 (Publicada en el Diario Oficial Número 50.858 del 05 de febrero 2019).

2.4 Metodología

La metodología que se usa en este proyecto consta, en primer lugar, de la búsqueda de 3 ubicaciones idóneas para realizar los vuelos, previamente realizado el estudio visual y en gabinete del perfil del terreno a evaluar. Se localizan 3 enclaves a diferentes altitudes donde se puedan abarcar los objetivos pretendidos; en primer lugar, se realiza un vuelo a mayor altitud para la creación de un ortomosaico general de la finca, el Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Posteriormente se ejecutan varios vuelos a menor altitud, abarcando menor extensión y se focalizan en dos parcelas, una de ellas en terreno fuertemente inclinado –Parcela A– y otra en zona más llana –Parcela B–. Las variedades

Uso y aplicación de sensores RGB y multiespectral embarcados en dron para la monitorización del cultivo de café.

de cafeto son Colombia y Castillo, en buen estado aparente, de entre 12 y 13 años y una altura media de 2 a 3 m.

Se realizaron 10 vuelos evaluables en fechas 3, 4, 19, 27 de mayo y 6 de junio de 2022. Las condiciones meteorológicas son similares, sin viento fuerte y en horas cercanas al mediodía para de este modo evitar en lo posible las sombras. Se ejecutan los vuelos entre 10 am y 11 am hora local para las parcelas, y entre 11 am y 12 pm hora local para los vuelos generales. Se adquieren datos en RGB y de los 5 canales espectrales para todas las imágenes (Tabla 3).

Tabla 3. Detalles de la programación de los vuelos realizados para el estudio

Parte del estudio	Primera		Segunda		
Vuelo	Vuelo 1	Vuelo 2	Vuelo 3	Vuelo 4	Vuelo 5
Fecha	3 mayo	4 mayo	19 mayo	19 mayo	27 mayo
Punto despegue	A	C	B	B	B
Altitud (m)	1646	1492	1540	1540	1540
Altura de vuelo (m)	100	100	60	40	40
Solape Frontal y Lateral	80 x 70	80 x 70	80 x 80	70 x 70	70 x 70
Inclinación gimbal (°)	90	90	90	60	90
Hora vuelo aproximada	11 am-12 pm	11 am-12 pm	10 am-11 am	10 am-11 am	10 am-11 am
Datos utilizados procesado	RGB	RGB	RGB y ME	RGB y ME	RGB y ME

Parte del estudio	Tercera		Cuarta		
Vuelo	Vuelo 6	Vuelo 7	Vuelo 8	Vuelo 9	Vuelo 10
Fecha	4 mayo	19 mayo	19 mayo	27 mayo	6 junio
Punto despegue	A	B	C	C	C
Altitud (m)	1646	1540	1492	1492	1492
Altura de vuelo (m)	60	60	20	20	20
Solape Frontal y Lateral	70 x 60	80 x 80	50 x 50	60 x 60	60 x 60
Inclinación gimbal (°)	90	90	90	90	90
Hora vuelo aproximada	10 am-11 am	10 am-11 am	11 am	11 am	11 am
Datos utilizados procesado	ME	ME	RGB y ME	RGB y ME	RGB y ME

Fuente. Anotaciones en campo y de la aplicación DJI GS Pro

En la siguiente imagen (Figura 5) se muestran las localizaciones de despegue y las parcelas de estudio.

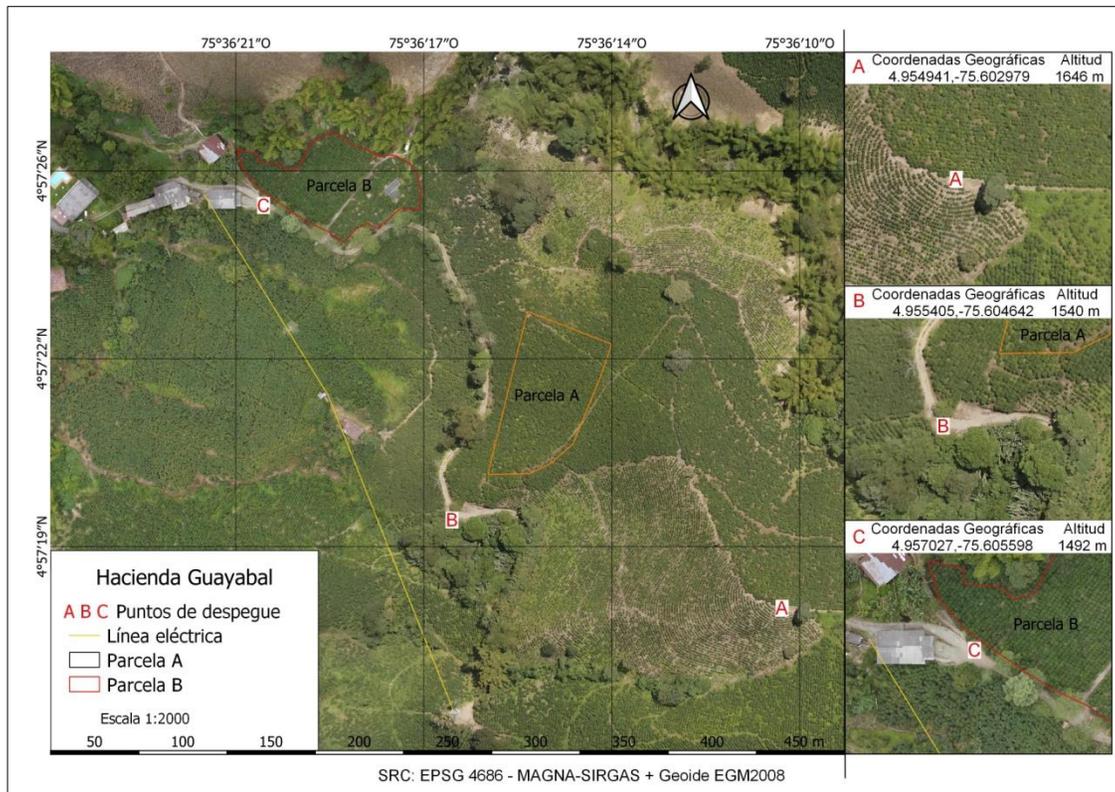


Figura 5. Localizaciones de despegue y parcelas de estudio

Fuente. Ortomosaico RGB. Elaboración propia

En este proyecto se trabaja en coordenadas geográficas MAGNA-SIRGAS (EPSG 4686) y con alturas ortométricas del geoid EGM2008, por lo que se han corregido los datos obtenidos utilizando la siguiente expresión matemática: $h=N+H$, siendo h la altura elipsoidal, N la ondulación del geoid (adquirida a partir de un modelo) y H la altura ortométrica. Proceso que se puede realizar mediante calculadoras online (<https://geographiclib.sourceforge.io/cgi-bin/GeoidEval>) o configurando la interfaz en el software (Tabla 4) obteniendo como resultado una diferencia de 26.1 m en ambos casos.

Tabla 4. Coordenadas geográficas y alturas geoidales del proyecto

MAGNA-SIRGAS (EPSG:4686) + EGM2008 (EPSG:3855)
Compound Coordinate System: MAGNA-SIRGAS (EPSG:4686) + EGM2008 (EPSG:3855)
Geographic Coordinate System: MAGNA-SIRGAS (EPSG:4686)
Angular Units: degree (EPSG:9102)
Geodetic Datum: Marco Geocéntrico Nacional de Referencia (EPSG:6886)
Ellipsoid: GRS 1980 (EPSG:7019)
Prime Meridian: Greenwich (EPSG:8901)
Vertical Coordinate System: EGM2008 height (EPSG:3855)
Vertical Units: metre (EPSG:9001)
Vertical Datum: EGM2008 geoid (EPSG:1027)

Fuente. Software Agisoft Metashape Professional 1.7.3

Las imágenes RGB en formato .jpg se utilizan para la obtención del MDS, el ortomosaico, y el MDE previa reclasificación de artefactos que son eliminados del mismo, con lo que es posible obtener curvas de nivel a diferente equidistancia. Los datos multispectrales (ME) en formato .tif precisan de una calibración

radiométrica mediante el sensor de luz incidente solar, proceso que se efectúa con el software Agisoft para poder calcular índices de vegetación (Tabla 5) o crear imágenes en falso color. Si bien estos datos van a ser números digitales, presentan una buen coeficiente de determinación ($R^2 > 0.90$) con valores de reflectancia espectral e índices de vegetación obtenidos por medio del sensor Parrot Sequoia, el cual sí que dispone de paneles de reflectancia. La exactitud de los índices obtenidos es buena y útil para la observación de la vegetación en diferentes series temporales (Han *et al.*, 2020).

Tabla 5. Índices de vegetación utilizados, con sus respectivas fórmulas

Sensores Ph4 ME	Long. de onda	Índices de vegetación	Fórmulas
B1 - Azul	450 nm ± 16 nm	NDVI	$(B5-B3) / (B5+B3)$
B2 - Verde	560 nm ± 16 nm	NDRE	$(B5-B4) / (B5+B4)$
B3 - Rojo	650 nm ± 16 nm	GNDVI	$(B5-B2) / (B5+B2)$
B4 - Borde rojo	730 nm ± 16 nm	RVI	$B5/B3$
B5 - Infrarrojo cercano	840 nm ± 26 nm	VARI green	$(B2-B3) / (B2+B3-B1)$
		GARI	$B5-(B2-(B1-B3)) / B5-(B2+(B1-B3))$

Fuente. Especificaciones extraídas del manual de DJI Phantom 4 ME e Index DataBase

2.4.1 Vuelos generales a mayor altitud abarcando más extensión de terreno

Se realizaron 2 vuelos desde diferentes altitudes (punto de despegue A (1646 m) y punto de despegue C (1492 m)) con una misma altura de vuelo (100 m) para ambos, abarcando distintas áreas con solape de imágenes suficiente (80 % frontal, 70 % lateral) para poder crear el mosaico y construir los MDE correspondientes.

Un capítulo de especial interés es la generación de los MDS y MDE. Más teniendo en cuenta la dificultad para la adquisición de estos productos en el país y la importancia de los mismos para hacer análisis precisos del terreno para diferentes menesteres.

El flujo de trabajo en Agisoft Metashape consiste en añadir y orientar las fotografías –para este caso sólo se utilizan las .jpg–, la creación de la nube de puntos densa, la construcción del MDS, ortofotomapa y la posterior exportación de ambos productos en formato .tif. Para la creación del MDE se deben clasificar los puntos del terreno de la nube de puntos depurando los elementos otorgados como no terreno y hacer un posterior refinamiento manual de errores puntuales (Figura 6).

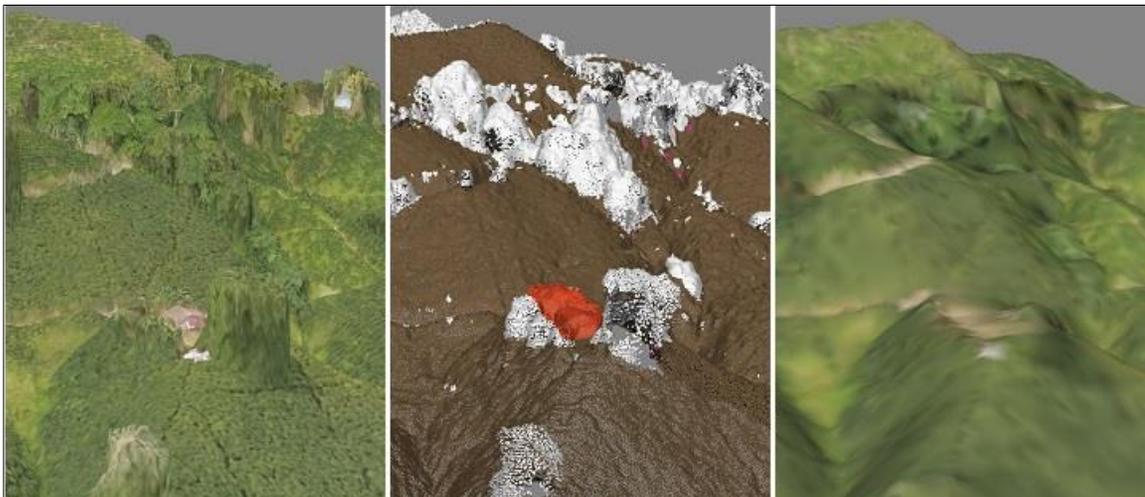


Figura 6. Nube de puntos, clasificación de los puntos, y MDE refinado respectivamente

Fuente. Datos RGB. Elaboración propia

Llegados a este punto es una buena opción crear una malla a partir de la nube de puntos clasificada en el paso anterior, lo que permitirá un posterior suavizado de la misma y la creación del MDE con sus respectivas curvas de nivel. Se generan las curvas de nivel a diferentes equidistancias (10 m, 5 m, 1 m). Ambos productos finales se exportan a .tif y .shp, respectivamente. También se aprovecha el potencial del software para generar un modelo en 3 dimensiones fruto del modelo texturizado de la nube de puntos densa. El desarrollo del proceso se muestra en la Figura 7.

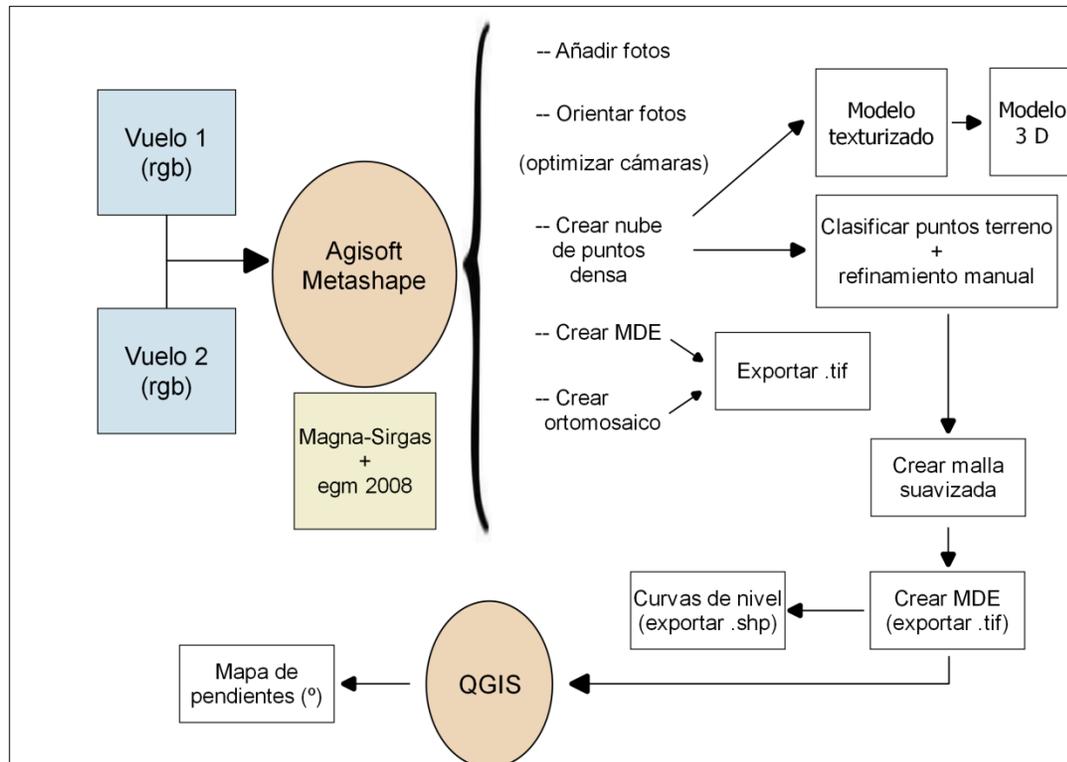


Figura 7. Flujo de trabajo para las imágenes RGB

Fuente. Elaboración propia

2.4.2 Planes de vuelo específicos para áreas de fuerte pendiente

Estudio del área a evaluar a partir de los datos RGB resultado del vuelo general, del cual tras el procesamiento en Agisoft Metashape como se ha descrito anteriormente, se obtiene el MDE y por medio de las herramientas ráster de QGIS se calcula la pendiente en grados clasificándola para resaltar la fuerte inclinación del área a estudiar (Figura 8).

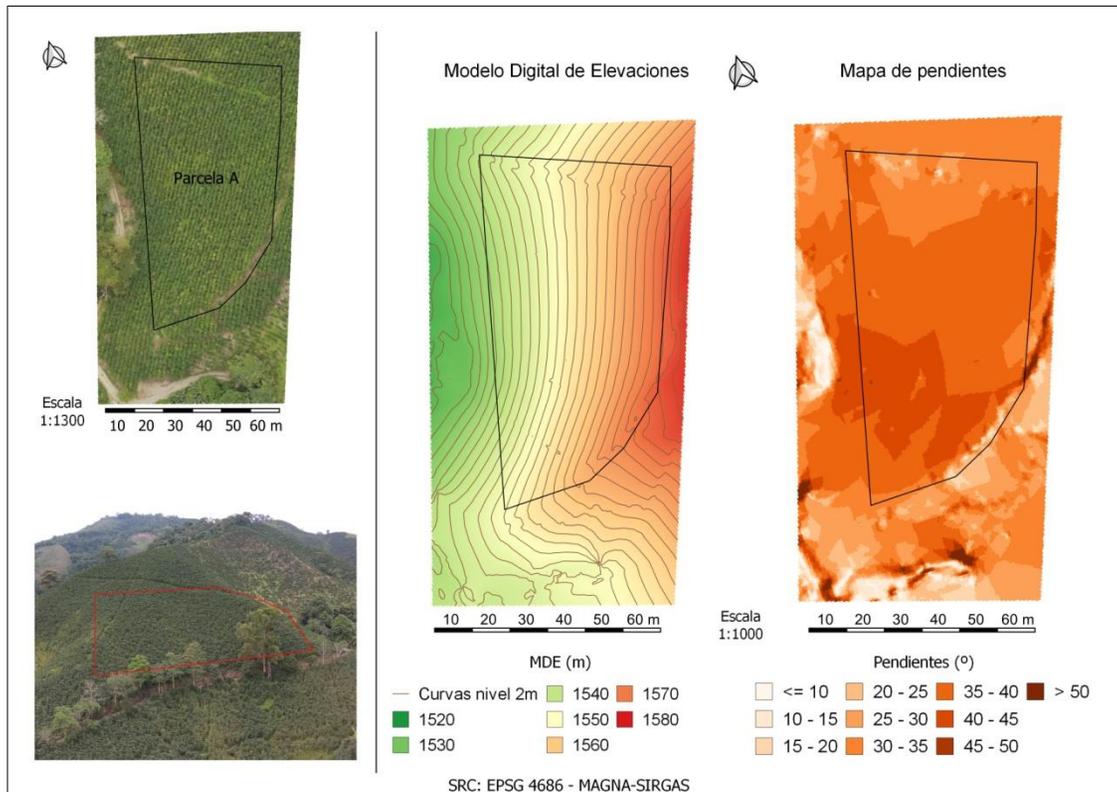


Figura 8. Ortomosaico, modelo digital de elevaciones y mapa de pendientes

Fuente. Elaboración propia

Se realizan dos vuelos en rejilla simple sucesivos que abarcan la misma parcela de estudio –Parcela A– a diferentes altitudes e inclinación del *gimbal* o cardán de la cámara (90° y 60°). Las líneas de vuelo son perpendiculares a la pendiente de la ladera y se recogen datos de los 6 sensores embarcados en el dron. Las especificaciones de los planes de vuelo (Figura 9) muestran un solape frontal y lateral diferente (80 % - 80 % y 70 % - 70 %) según sea la altura de vuelo (60 m y 40 m respectivamente) manteniendo en lo posible la MPT tras el procesamiento de las imágenes.

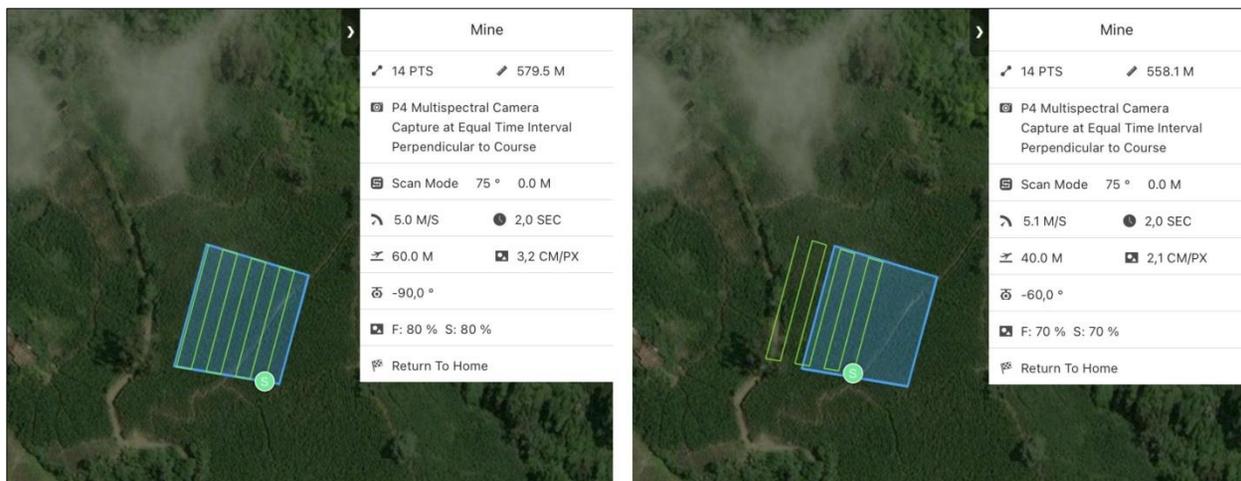


Figura 9. Planes de vuelo a diferente altitud e inclinación del gimbal

Fuente. Aplicación DJI GS Pro

8 días más tarde se realizó un nuevo ensayo sobre la parcela en condiciones climáticas y horarias similares, manteniendo en este caso la misma altitud –40 m– y el mismo solape –70 % x 70 %– pero con el *gimbal* en posición cenital a 90°.

El procesado de las imágenes RGB se realiza con el método descrito anteriormente, y los datos multiespectrales precisan de una corrección radiométrica con la información adquirida por el sensor de irradiancia y la posterior elaboración de los índices de vegetación con sus respectivas fórmulas como se verá en el apartado siguiente.

2.4.3 Estudio multiespectral y aplicación de los índices de vegetación

Se tomaron como datos de partida las imágenes multiespectrales de la parcela A, valorando los resultados obtenidos a 60 m de altura desde las localizaciones de despegue A y B. Se consigue una visión general que abarca propiamente la parcela de café, los caminos circundantes, el resto de vegetación, así como construcciones aledañas. En un primer muestreo (Figura 10), se elaboran los siguientes índices de vegetación:

Ratio Vegetation Index (RVI) o *Simple Ratio (SR)*. Pearson y Miller (1972). Se relaciona con biomasa, contenido de agua y nitrógeno. Mejora el contraste entre el suelo y la vegetación. Sirve para discernir el cultivo del suelo. Los valores bajos serán suelo y las áreas verdes serán mucho mayores a 1.

$$\text{RVI o SR} = \text{IRc} / \text{R}$$

Visible Atmospherically Resistant Index Green (VARI). Gitelson *et al.* (2002). Relacionado con el dosel arbóreo, la biomasa y la clorofila. Realza la vegetación bajo un fuerte impacto atmosférico al tiempo que suaviza las variaciones de iluminación. Útil cuando sólo se toman imágenes en RGB para detectar estrés hídrico en las plantas.

$$\text{VARI} = (\text{V} - \text{R}) / (\text{V} + \text{R} - \text{A})$$

Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI). Gitelson *et al.* (1996). Tiene utilidad en el cálculo del Índice de Área Foliar (LAI), clorofila, nitrógeno, contenido de proteínas y agua. Detecta cultivos marchitos o envejecidos, mide el contenido de clorofila con mayor precisión que el NDVI y es útil en vegetación con copas densas.

$$\text{GNDVI} = (\text{IRc} - \text{V}) / (\text{IRc} + \text{V})$$

Green Atmospherically Resistant Index (GARI). Gitelson *et al.* (1996). Es sensible a una amplia gama de concentraciones de clorofila y más resistente a los efectos atmosféricos que el NDVI. Puede incluir la constante gamma (γ) con valor 1.

$$\text{GARI} = \text{IRc} - (\text{V} - (\text{A} - \text{R})) / \text{IRc} - (\text{V} + (\text{A} - \text{R}))$$

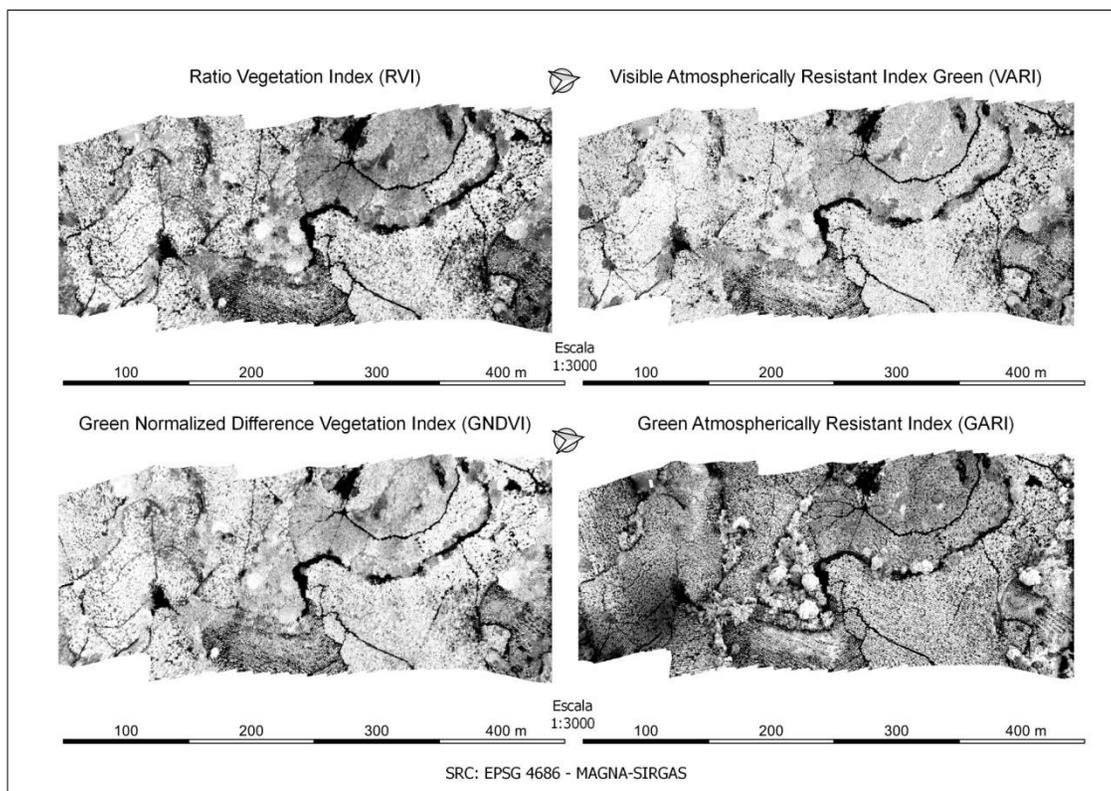


Figura 10. Índices de vegetación RVI, VARI, GNDVI, GARI

Fuente. Datos multiespectrales. Elaboración propia a partir de los datos del dron

Se focaliza el análisis sobre la parcela a examinar, y para ello, se elabora a partir del ortomosaico multiespectral una imagen en falso color (IRC, R, V) para distinguir más fácilmente la vegetación de su entorno. Esta aparece en un color rojo distintivo gracias a la alta reflectancia de las plantas en el espectro del infrarrojo cercano (Figura 11).

Cabe recordar que la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas del visible, especialmente la banda roja (0.6 – 0.7 μm) y el infrarrojo cercano (0.7 – 1.1 μm). Esto se debe a que mientras en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano. Por esta razón, se produce un notable contraste espectral entre la banda del rojo y la del infrarrojo cercano, lo que permite separar, con relativa claridad, la vegetación sana de otras coberturas.

Si la vegetación sufre algún tipo de estrés (plagas o sequías) su reflectividad será inferior en el infrarrojo cercano –como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja–, aumentando paralelamente en el rojo –al tener menor absorción clorofílica– con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor. Cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectividades de dichas bandas, mayor vigor vegetal presentará la cobertura observada (Chuvienco, 2008).

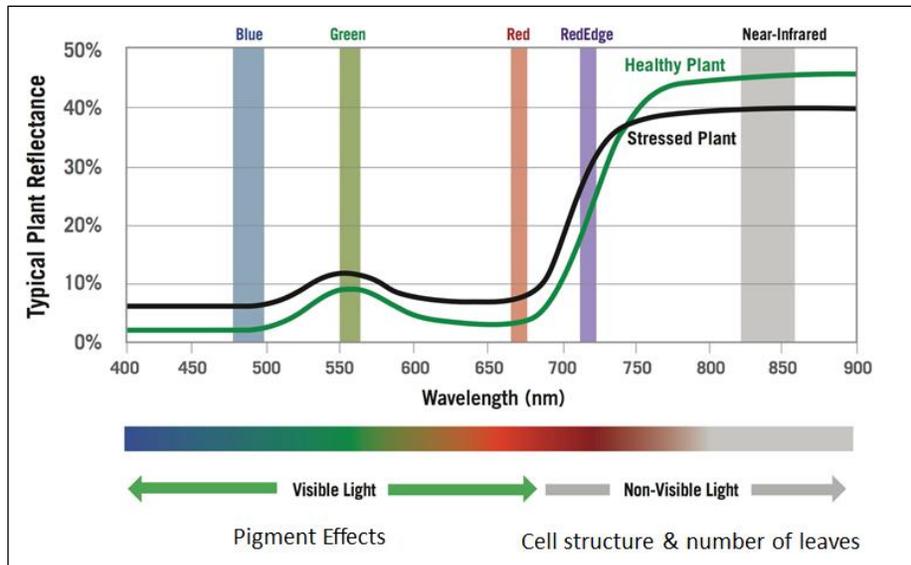


Figura 11. Firma espectral tipo de la vegetación

Fuente. Sensor multiespectral MicaSense RedEdge

Se valoran cuales de los índices de vegetación ofrecen una visión más nítida de la parcela, y por ende, una información confiable. Se trabaja en primer lugar con el RVI para tener una diferenciación suficiente entre el suelo y el cultivo, y de este modo tener solo la información necesaria.

El proceso se efectúa con el software QGIS. Una vez obtenidos los valores de RVI, mediante el cálculo del histograma (Figura 12) y una observación del mapa resultante y la ortofoto, establecemos un valor de corte que será el que marcará la discriminación entre cultivo o suelo –Figura 13–. A continuación se deben utilizar los geoprocursos para rasterizar el resultado y reclasificarlo de tal manera que aparezca el cultivo con valor 1.

Con los cafetos diferenciados de lo que es el suelo y el entorno de vegetación, se utiliza el índice GARI, que es resistente a los efectos atmosféricos como ARVI (Kaufman *et al.*, 1992) pero más sensible a una amplia gama de concentraciones de Chl- *a*. Si bien NDVI y ARVI son sensibles a la fracción de vegetación y a la tasa de absorción de la radiación solar fotosintética, se debe agregar un índice de vegetación verde como GARI para detectar la concentración de clorofila, medir la tasa de fotosíntesis y monitorear el estrés de las plantas (Gitelson *et al.*, 1996).

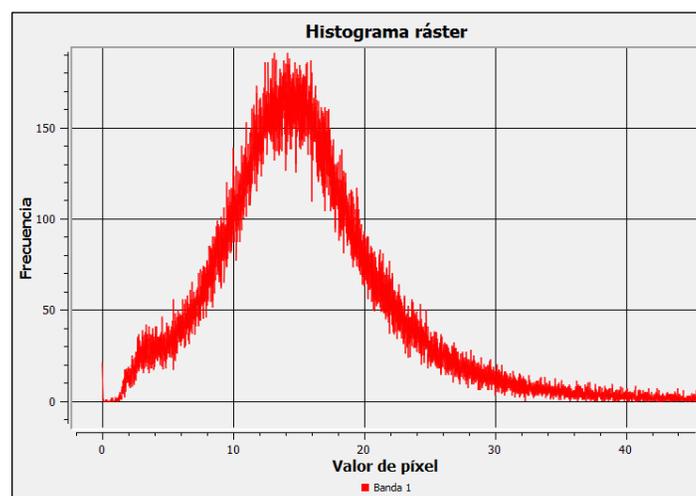


Figura 12. Gráfica con el resultado del histograma en QGIS

Fuente. Datos RVI

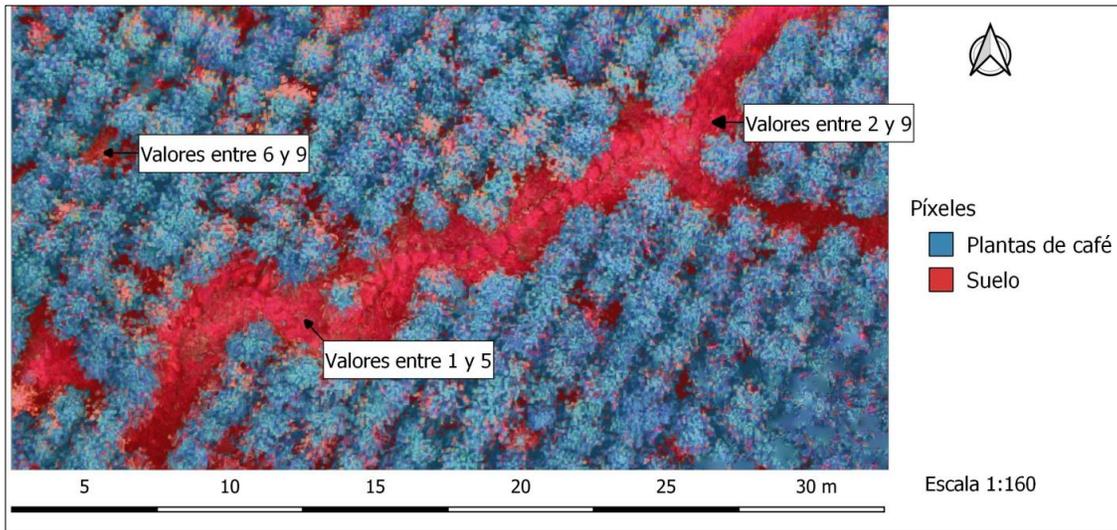


Figura 13. Discriminación entre píxeles de suelo y matas de café

Fuente. Datos RVI. Elaboración propia a partir de los datos del dron

Se recurre a QGIS para hacer el cálculo del GARI –mediante Calculadora Ráster– y a continuación se multiplica el resultado obtenido por la capa del cultivo con valor 1. De este modo tendremos para los píxeles clasificados como matas de café, su valor del índice de vegetación GARI, para poder valorar su estado de salud minimizando las distorsiones del entorno. En la Figura 14 se muestra el flujo de trabajo seguido en esta sección.

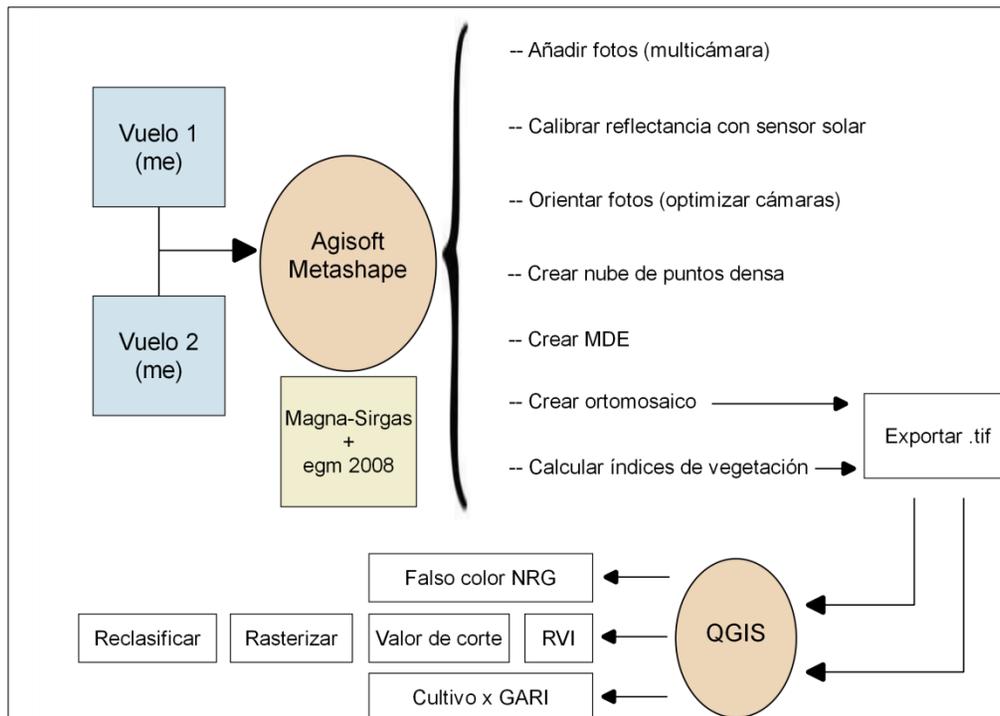


Figura 14. Flujo de trabajo para imágenes multiespectrales

Fuente. Elaboración propia

2.4.4 Detectar la flor del café con imágenes multiespectrales de una parcela en zona plana

Se delimita un área con poca pendiente –Parcela B– para realizar los vuelos a baja altura (20 m), estos se ejecutan de modo cenital en 3 semanas consecutivas para observar posibles cambios en el follaje del cafeto y la presencia o no de flores (la flor del café no dura más de 2 días). En la Figura 15 se muestra el plan de vuelo utilizado y la localización de esta parcela donde predomina la variedad de café Castillo.

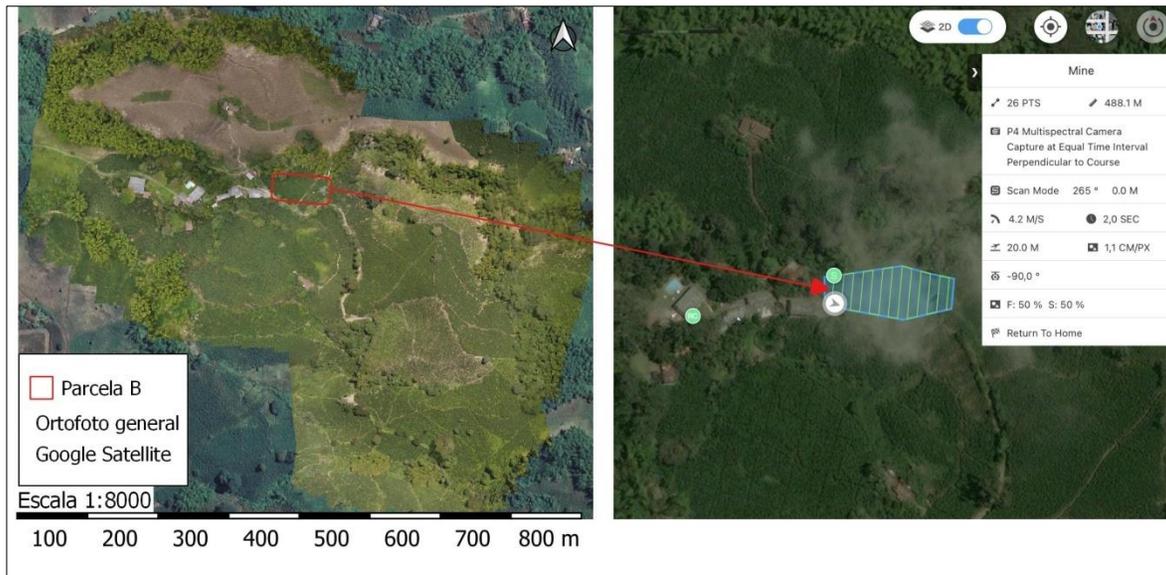


Figura 15. Localización y plan de vuelo de la parcela de estudio

Fuente. Ortomosaico RGB y aplicación DJI GS pro

La finalidad es buscar la forma de contabilizar la flor del café y con ello estimar la producción a unos 7 meses vista. De cada flor obtendremos una cereza o grano, y de ellos saldrán por lo general 2 semillas. Dicha floración es a lo largo de todo el año, pero tiene uno o dos picos más fuertes. Para el caso que nos ocupa la principal es entre febrero y marzo para la cosecha de octubre.

En la Figura 16 se describe el procedimiento seguido en este apartado, desde el muestreo previo a la toma de datos, el procesado con el software Agisoft Metashape de los datos RGB y multiespectrales, y los pasos en QGIS y GRASS hasta obtener los resultados del cálculo de número de flores con su posterior validación.

Antes de cada vuelo se elabora una calibración con variedades de hojas en diferentes estados a simple vista del ojo humano (buen estado, déficit hídrico) y de diversos tamaños. Estas y diversas flores se colocan de modo aleatorio sobre una cartulina de color negro y se realizan varias fotos con los 6 sensores a 1 metro del suelo evitando la propia sombra (Figura 17). Posteriormente se realizan los planes de vuelo todos aproximadamente a las 11 am hora local.

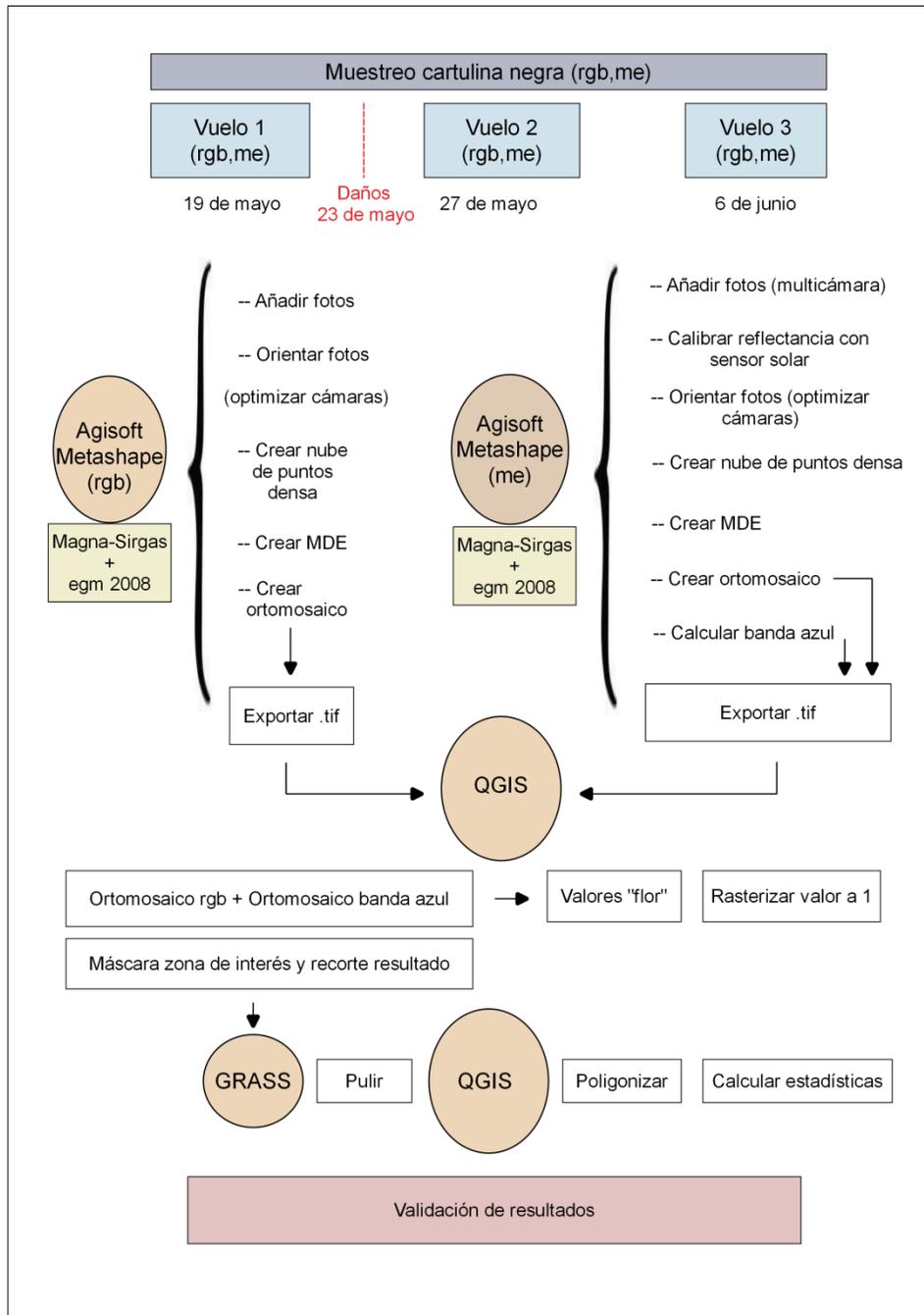


Figura 16. Resumen del procedimiento para el cálculo de flores por parcela
Fuente. Elaboración propia

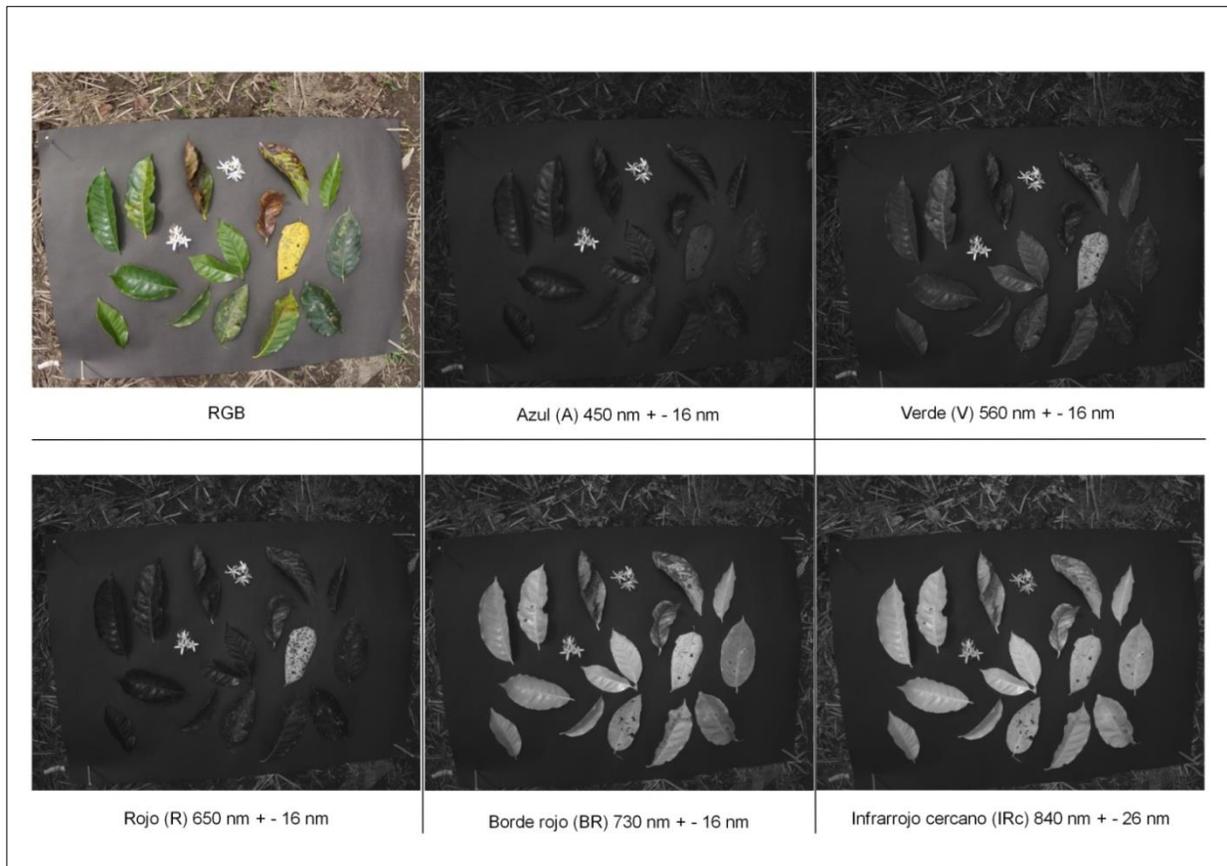


Figura 17. Fotografías de la muestra previas al vuelo

Fuente. Datos de los 6 sensores embarcados en el dron

Se evalúan las fotografías tomadas en terreno, y se determina que el rango espectral en el que se diferencian mejor las flores del resto de elementos que componen la mata de café, es la banda azul (A) cuya longitud de onda abarca desde los 434 nm a 466 nm.

La morfología del cafeto, sus dimensiones, la separación entre surcos y plantas, además de la densidad del follaje, provocará que sean las flores ubicadas en la parte alta del dosel las que puedan ser observadas más fácilmente por el sensor. Véase en la Figura 18, la mayor nitidez que proporciona la banda azul para la detección de la flor, en dos fotografías de las mismas plantas de café tomadas con una diferencia en altura de 5 metros.

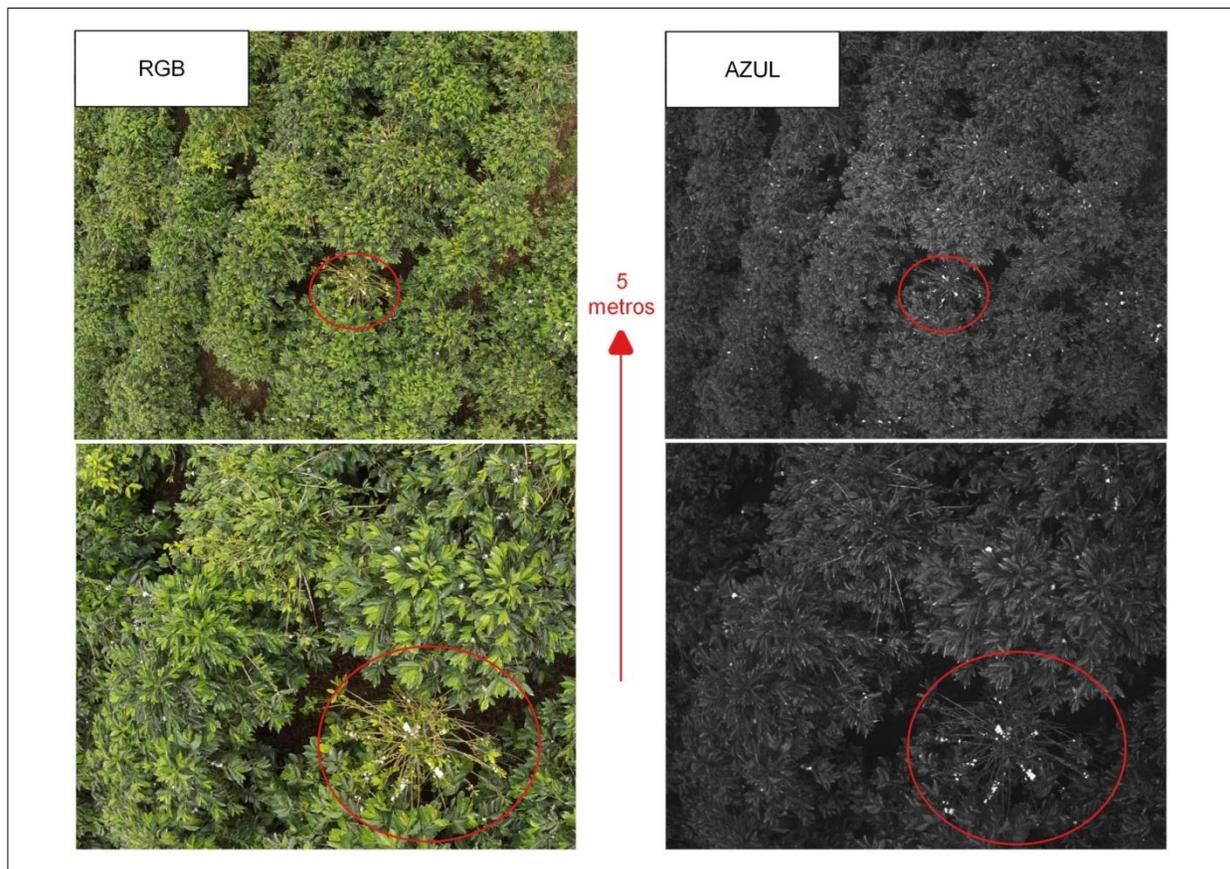


Figura 18. Fotografías a 15 m del suelo (arriba) y a 10 m del suelo (abajo) respectivamente

Fuente. Datos de los sensores RGB y banda azul

El proceso que se siguió consiste en obtener el ortomosaico multiespectral, la banda azul y el ortomosaico RGB –mediante el software Agisoft Metashape– procurando que la mayoría de las fotos estén orientadas y con el mínimo error posible.

Se procesan de forma independiente los datos multiespectrales y los datos RGB siguiendo las pautas de añadir las fotografías –aplicar la corrección radiométrica a los multiespectrales– orientar las fotos, optimizar las cámaras (si corresponde), crear la nube de puntos densa, el modelo digital de elevaciones y el ortomosaico. Se obtiene el ortomosaico de la banda azul a partir del ortomosaico multiespectral, utilizando la herramienta para el cálculo ráster de únicamente la banda azul. Se exportan las imágenes obtenidas en formato .tif para trabajarlas con el software QGIS.

Un punto de gran importancia es determinar los valores que se consideran como flor y que van a diferenciarse del resto de vegetación. Se trata de buscar el rango de mínimos y máximos que sean representativos como “flor” dentro del ortomosaico. Para ello, se utilizan la banda azul y el ortomosaico RGB que sirve de guía y comparativo. Minuciosamente se localizan varias flores repartidas por la imagen y se anotan los valores numéricos de la banda azul. Cuando se obtienen un número suficiente de muestras, se consideran valores como flor desde el mínimo al máximo de dicho rango –750 a 1050 para el estudio–. En la Figura 19 se enseña el procedimiento para una zona de muestreo.



Figura 19. Ejemplo de muestras de flor en RGB y su valor numérico en banda azul

Fuente. Ortomosaico RGB y banda azul

Se diseña una máscara en base al ortomosaico de la banda azul para eliminar los valores erróneos que están fuera del cultivo, ya sean caminos, árboles, piedras, etc. Con ella, se recorta el resultado para utilizarlo sólo dentro de la parcela con las matas de café. Para quedarnos únicamente con los valores que han sido determinados como flor y otorgarles valor 1, se utiliza la calculadora ráster, elaborando la siguiente expresión: (“ParcelaB_cortadocafe” >=750 AND “ParcelaB_cortadocafe” <=1050) x 1.

Ante la disyuntiva de saber si todos los píxeles identificados con el valor “flor” son efectivamente flores, varios pétalos o pequeños reflejos de la hoja, se ejecuta un proceso para pulir el resultado –Figura 20– con la herramienta ‘r.neighbors’ del módulo GRASS, que unificará o eliminará los píxeles sueltos según el valor modal que predomina a su alrededor.

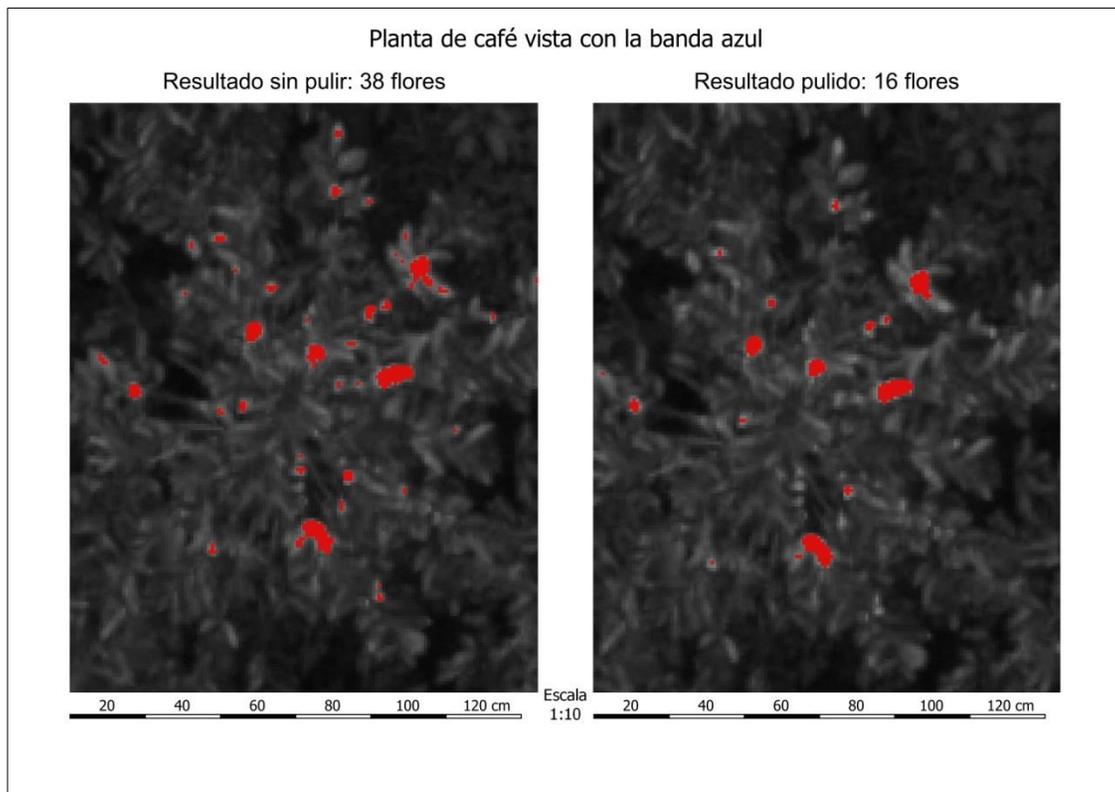


Figura 20. Número de flores antes (izquierda) y después de pulir (derecha)

Fuente. Ortomosaico banda azul

Finalmente, para cuantificar el resultado y elaborar las estadísticas de interés, se lleva a cabo el proceso de vectorizar el ráster a polígonos con la herramienta Ráster a vectorial de QGIS. De este modo se tiene información del número total de flores en la parcela o de la densidad por metro cuadrado para la fecha concreta de la toma de datos.

Para la investigación aquí presentada, la validación se realiza mediante el posprocesamiento de datos y con la colaboración de cinco personas ajenas al proyecto. En primer lugar se marcan cuatro zonas de validación de manera aleatoria dentro de la parcela de estudio. Se localizan las imágenes originales que corresponden a las zonas marcadas con la ayuda de la geolocalización EXIF de la cámara. Las cinco personas contabilizan según su criterio el número de flores en las imágenes originales de las bandas RGB y azul, y se compara con los resultados obtenidos otorgando un margen de error de ± 1 acierto (Figura 21).

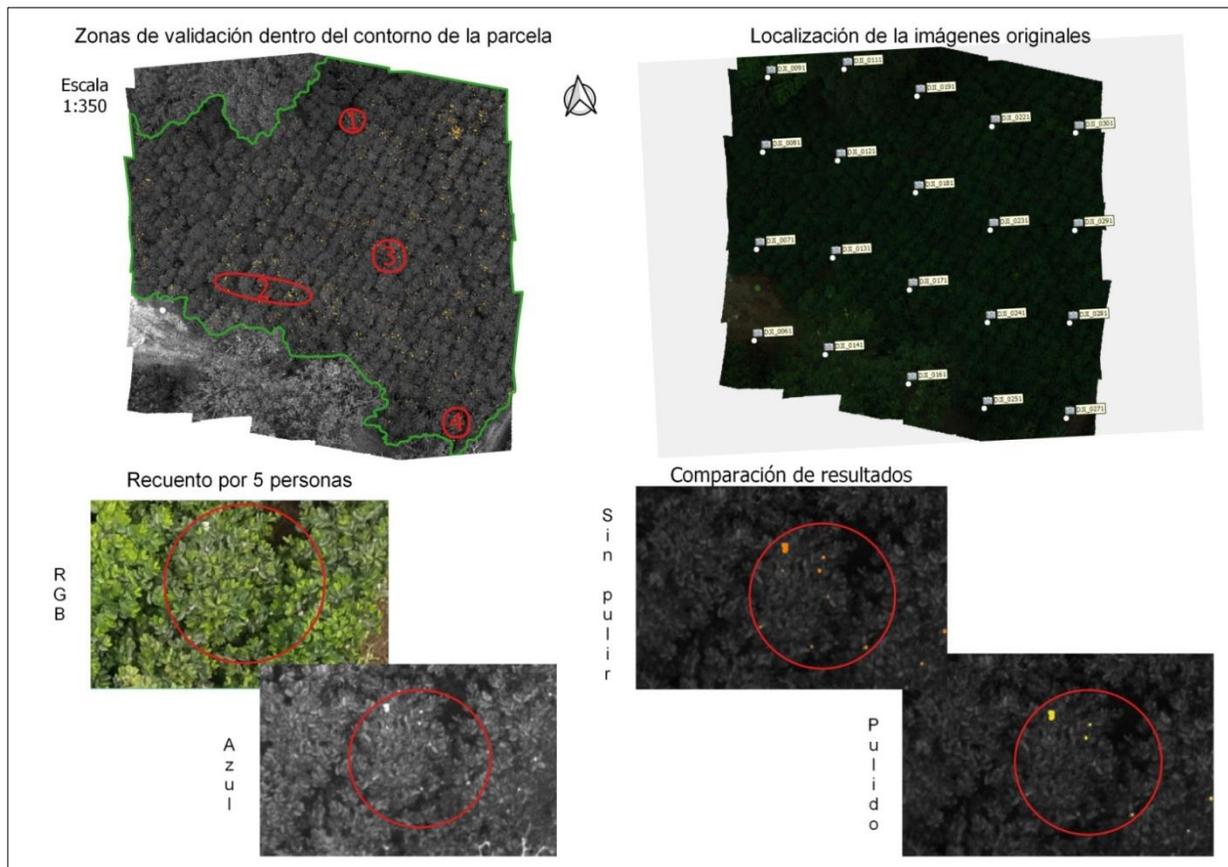


Figura 21. Sistema de validación del conteo de flores

Fuente. Ortomosaico banda azul, ortomosaico multispectral e imágenes RGB y banda azul. Elaboración propia

3. Resultados y discusión

La precisión geométrica que se consigue –a pesar de no poder utilizar el servicio de red RTK ni haber utilizado puntos de control terrestre– presenta unos valores que sólo superan el metro de error en uno de los 17 casos tras el procesamiento de los datos. Este error es considerado excesivo y por lo tanto, tratado como no válido, ya que puede generar confusión a la hora de analizar los resultados.

En la siguiente tabla (Tabla 6) se muestran los errores de posicionamiento (m) para todos los datos del proyecto procesados, separados según la parte del estudio analizada.

El geoposicionamiento conseguido con más de 10 satélites y el posterior procesamiento de los datos ofrecen una precisión más que suficiente para el trabajo aquí presentado, aunque con matices para análisis a mayor escala como se verá posteriormente.

Uso y aplicación de sensores RGB y multiespectral embarcados en dron para la monitorización del cultivo de café.

Tabla 6. Errores de posicionamiento tras procesamiento de las imágenes

Parte del estudio	Primera				Segunda			
	Vuelo 1 + Vuelo 2		Vuelo 3		Vuelo 4		Vuelo 5	
Procesado	RGB		RGB	ME	RGB	ME	RGB	ME
Error (m)	0.29		0.09	0.21	0.09	1.74	0.18	0.83

Parte del estudio	Tercera				Cuarta					
	Vuelo 6		Vuelo 7		Vuelo 8		Vuelo 9		Vuelo 10	
Procesado	RGB	ME	RGB	ME	RGB	ME	RGB	ME	RGB	ME
Error (m)	0.13	0.22	0.09	0.21	0.12	0.62	0.14	0.59	0.16	0.62

Fuente. Resultados del procesado de las imágenes RGB y ME. Elaboración propia

3.1 Primera parte. Vuelos generales a mayor altitud. Productos RGB obtenidos

La generación de ortomosaicos a distinto tamaño de píxel según altura de vuelo, ha presentado resultados satisfactorios, siendo evidente la mejor resolución frente a las imágenes de satélites comerciales que se está habituado y que sirven como marco de fondo (Figura 22).

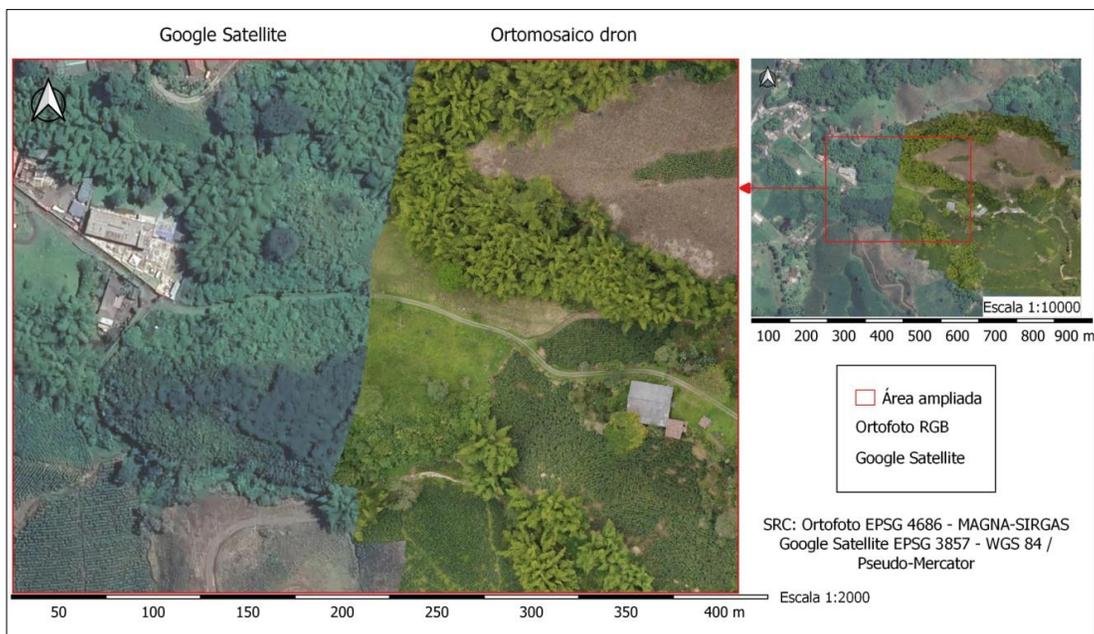


Figura 22. Imagen Google Satellite versus ortomosaico dron

Fuente. Google Satellite, ortomosaico RGB

El resultado del ortomosaico general de la finca con imágenes tomadas a 100 m de altura respecto a los puntos de despegue A y C, ofrece un valor de 7.06 cm de píxel en terreno para el total de las 38 ha completadas. Un resultado óptimo para ubicar elementos que puedan ser de utilidad en el día a día y tener un visionado completo de la propiedad.

Se generó el MDS para la zona volada consiguiendo un tamaño de píxel en terreno de 28.3 cm, con una densidad de 12.5 puntos por m². El mismo tamaño de píxel se consiguió para el MDE presentando resultados correctos incluso en el área de cosido de los dos vuelos como puede observarse en la Figura 23.

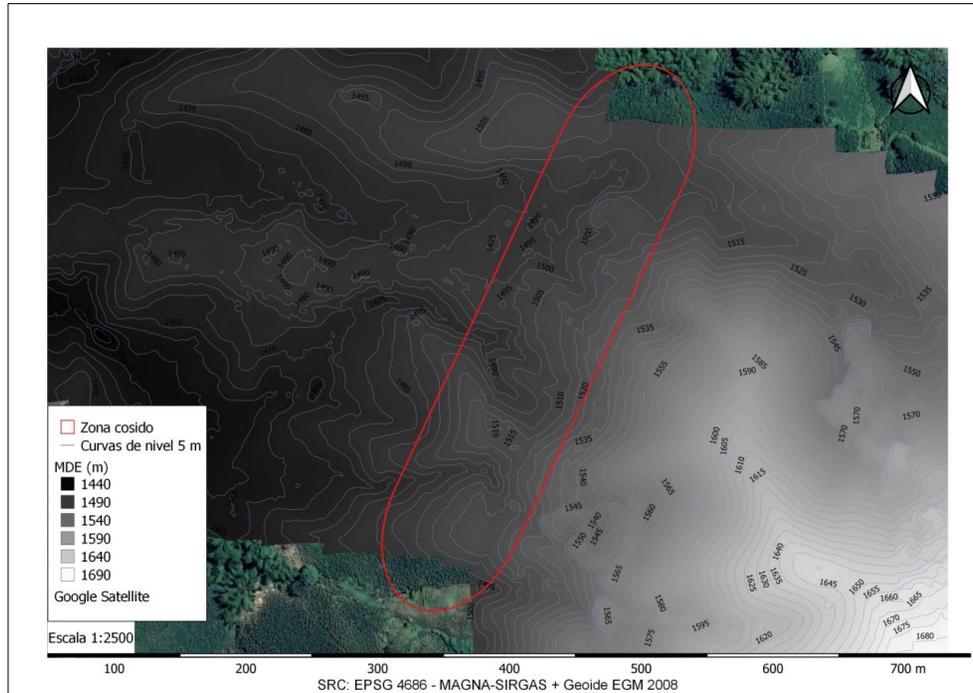


Figura 23. Curvas de nivel a 5 m de equidistancia sobre la zona de cosido de los dos vuelos

Fuente. Datos del MDE obtenido con el dron

En la Figura 24 se muestran los productos obtenidos tras el procesamiento de las imágenes RGB.

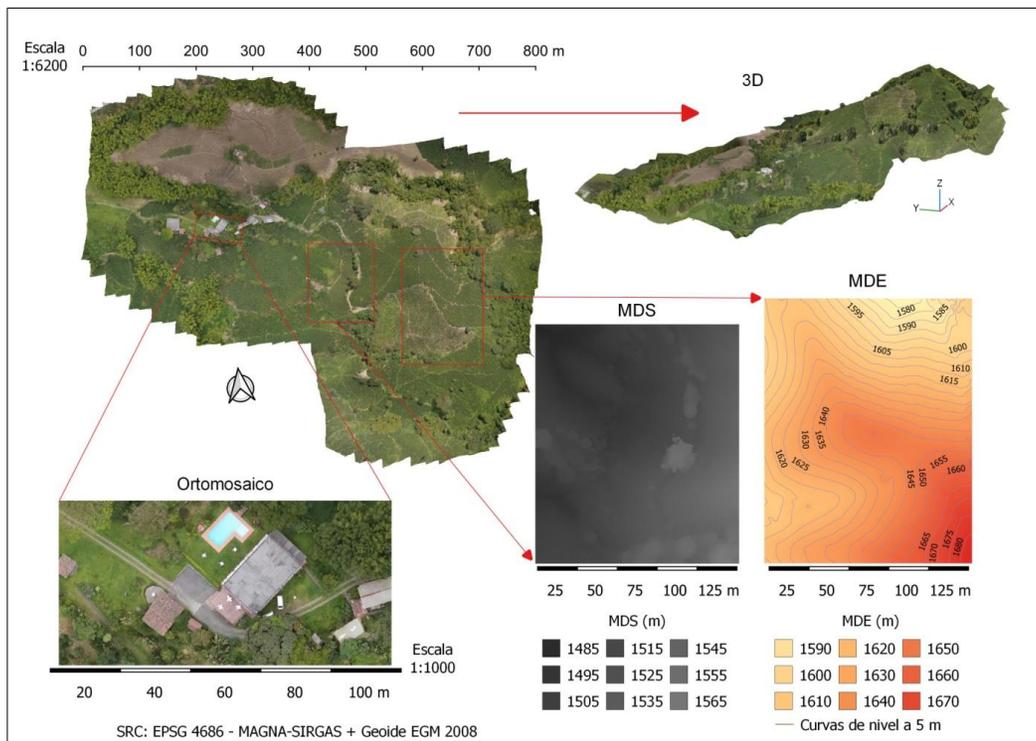


Figura 24. Ortomosaico, modelo 3D, Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital de Elevaciones
Fuente. Datos del ortomosaico RGB, MDS y MDE. Elaboración propia

3.2 Segunda parte. Vuelos focalizados sobre parcela con fuerte pendiente.

El propósito del segundo análisis remite los siguientes resultados (Tabla 7), que hacen referencia al geoposicionamiento y a la visualización obtenida en la parcela con fuerte inclinación volada a dos alturas y dos inclinaciones del *gimbal* diferentes.

Se observa una similitud en el margen de error de las imágenes RGB (0.098 m para el cenital, 0.097 m para el de 60°) pero no así en el margen de error de las imágenes ME (0.217 m para el cenital y 1.742 m para el de 60°).

En la siguiente comparativa con igual altura de vuelo y mismo solape, se obtiene que el margen de error en RGB es ligeramente superior en las imágenes cenitales que al adquirirse con las imágenes inclinadas (0.184 m en cenital y 0.097 m a 60°), pero no así en el ME, donde resulta un error de 0.834 m en el cenital por un error de 1.742 m con la inclinación a 60°. Estos últimos se consideran excesivos, ya que pueden llevar a confundir si se trata de una mata de café o la colindante.

El tamaño de píxel del MDS y de la ortofoto disminuye en proporción a la menor altura de vuelo para los dos tipos de datos analizados –RGB y ME– siendo menor en las tomas inclinadas volando a la misma altura.

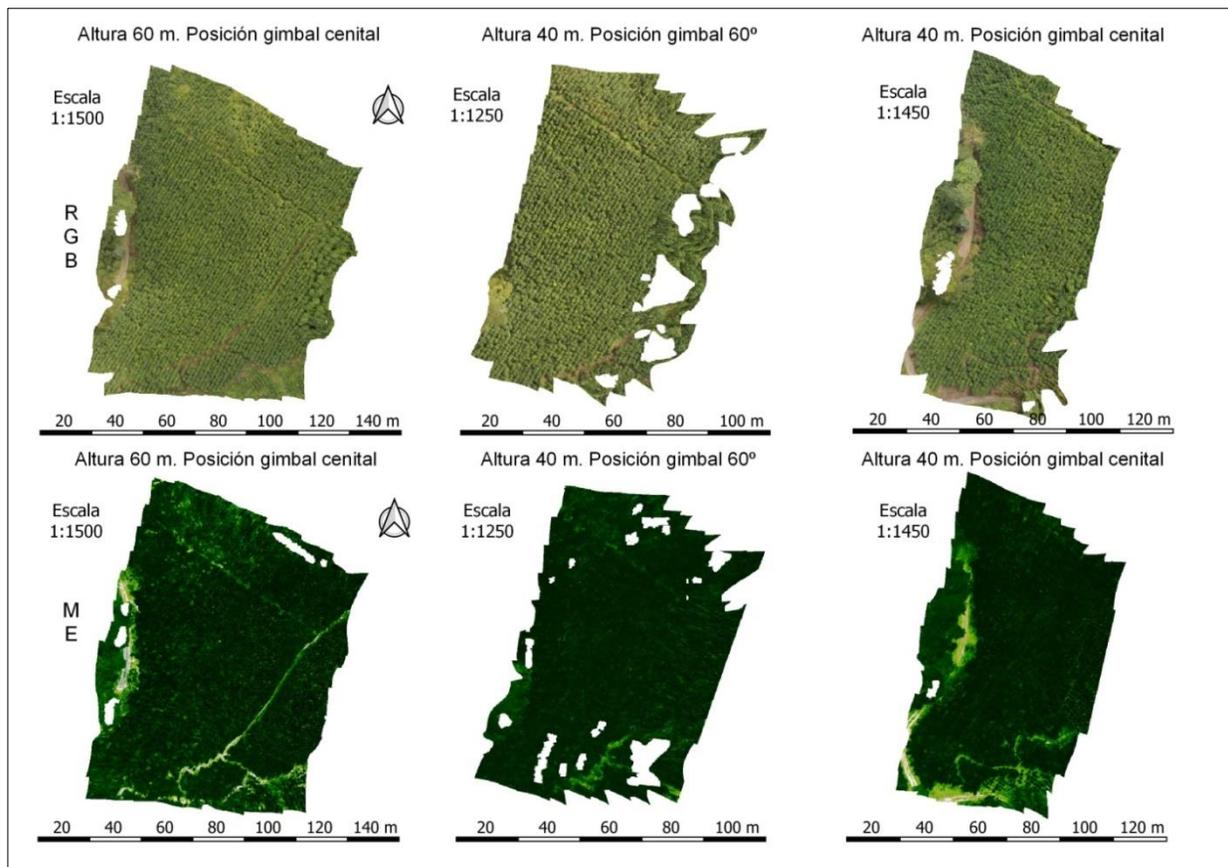
Tabla 7. Errores de posicionamiento, tamaño de píxeles y presencia de huecos

Vuelo	Huecos	Error posición (m)	Píxel MDS (cm)	Píxel ortofoto (cm)
RGB cenital a 60 m	2	0.098	9	2.25
ME cenital a 60 m	5	0.217	9.24	2.31
RGB 60° a 40 m	9	0.097	6.57	1.64
ME 60° a 40 m	16	1.742	6.69	1.67
RGB cenital a 40 m	3	0.184	7.46	1.86
ME cenital a 40 m	1	0.834	7.56	1.89

(En rojo valores considerados excesivos para el estudio)

Fuente. Resultados segunda parte del estudio. Elaboración propia

Mediante la visualización de los resultados en pantalla, se pueden apreciar una serie de huecos o gaps –no hay información– en las imágenes capturadas con inclinación a 60° que no aparecen en las imágenes cenitales, tanto para el RGB como para las ME (Figura 25).

**Figura 25. Presencia de áreas sin información en las imágenes procesadas**

Fuente. Datos RGB y ME. Elaboración propia

3.3 Tercera parte. Productos multispectrales e índices de vegetación

Para el primero de los dos vuelos analizados –a 60 m de altura desde el punto de despegue A– los resultados de los datos ME ofrecen un tamaño de píxel en la ortofoto de 8.78 cm, y un error de posicionamiento de 0.22 m. Consiguiendo el mosaico con tan solo 9 fotografías orientadas.

Con este tamaño de píxel se puede apreciar la diferencia entre lo que es la parcela, los caminos, el resto de vegetación y algunas construcciones. Combinando la ortofoto ME y la imagen en falso color IRc, R, V se observan mejor algunos detalles (Figura 26).

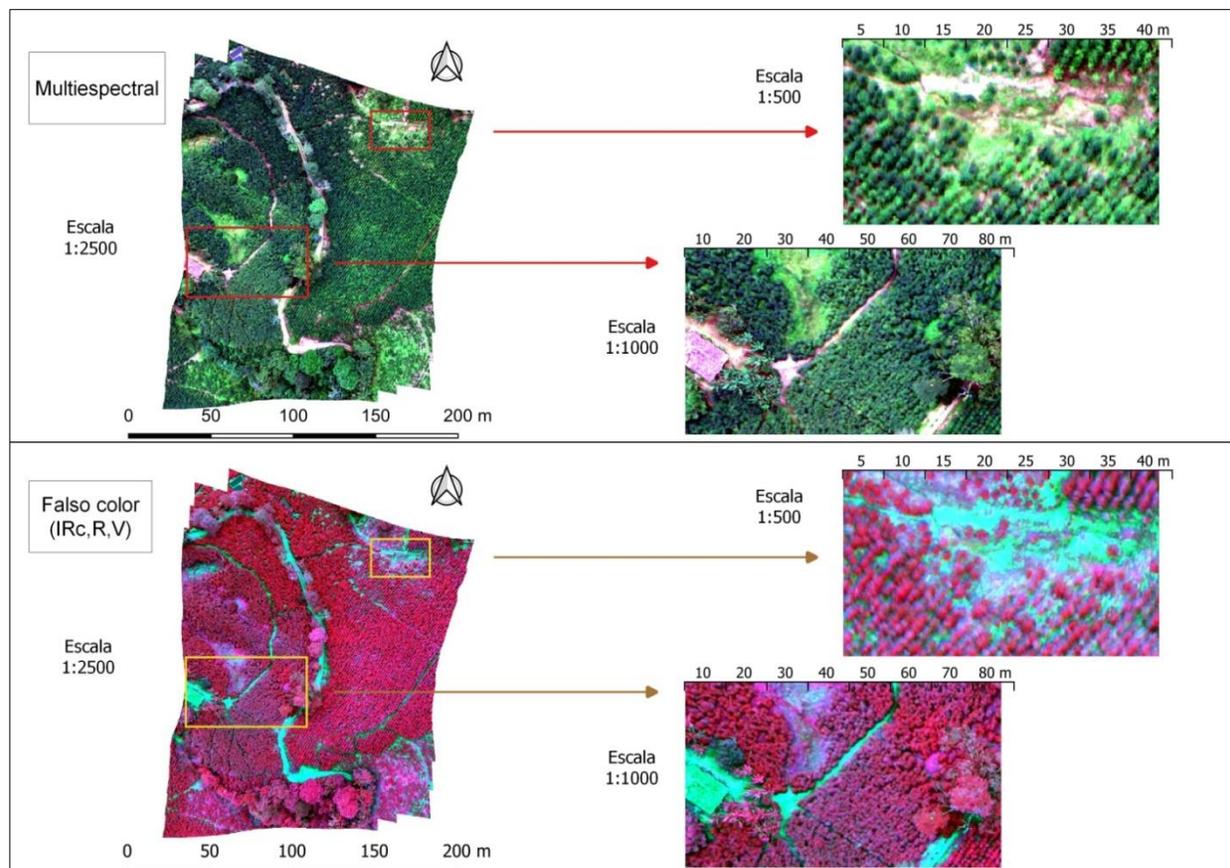


Figura 26. Ortomosaicos multiespectral y falso color IRc, R, V

Fuente. Datos multiespectrales. Elaboración propia

Los resultados de los índices de vegetación que se han elaborado previamente permiten deducir cuales son más útiles a nivel visual en esta parcela y según las alturas de la toma de datos. Para el proyecto se aplican el RVI y el GARI.

Se utilizan los datos ME del séptimo vuelo a una altura de 60 m desde el punto de despegue B, con una resolución espacial de 2.31 cm de píxel y un error de posicionamiento de 0.21 m.

El resultado obtenido por medio de la aplicación del índice RVI devuelve una satisfactoria diferenciación entre las matas de café y el suelo circundante (Figura 27), hecho que ayuda a hacer un posterior análisis solamente del cultivo en sí. Aunque cabe añadir que se han detectado artefactos a mayor escala de detalle como se aprecia en la Figura 28.

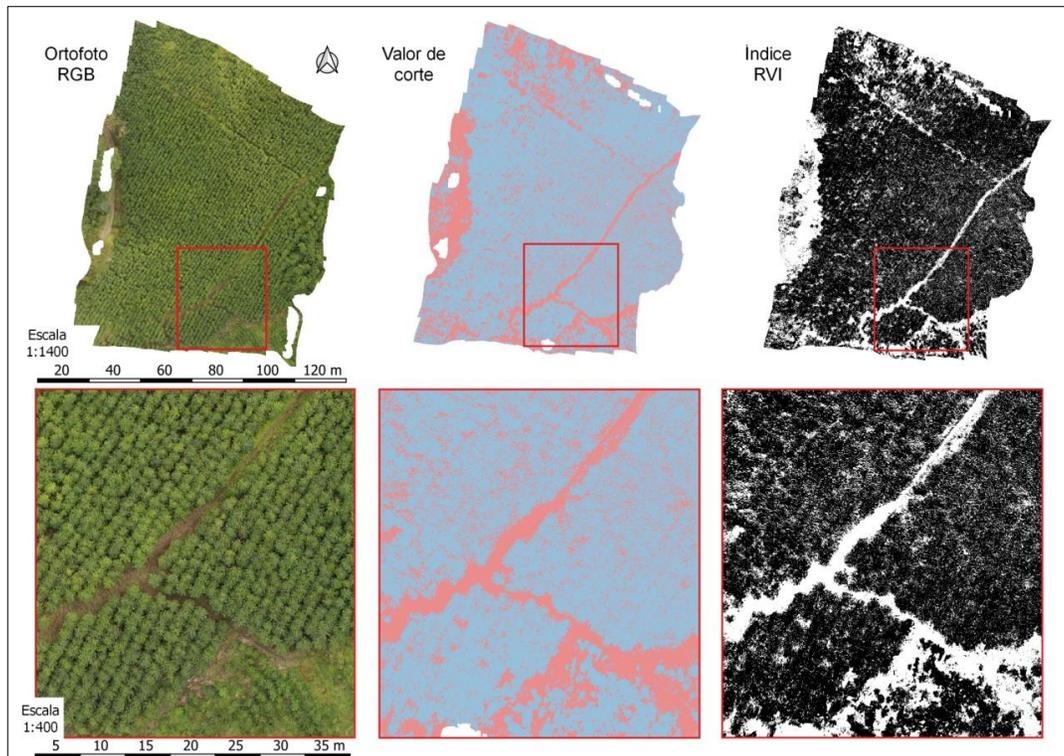


Figura 27. Separación del cultivo y el suelo a partir del índice RVI

Fuente. Ortofoto RGB y datos multiespectrales. Elaboración propia

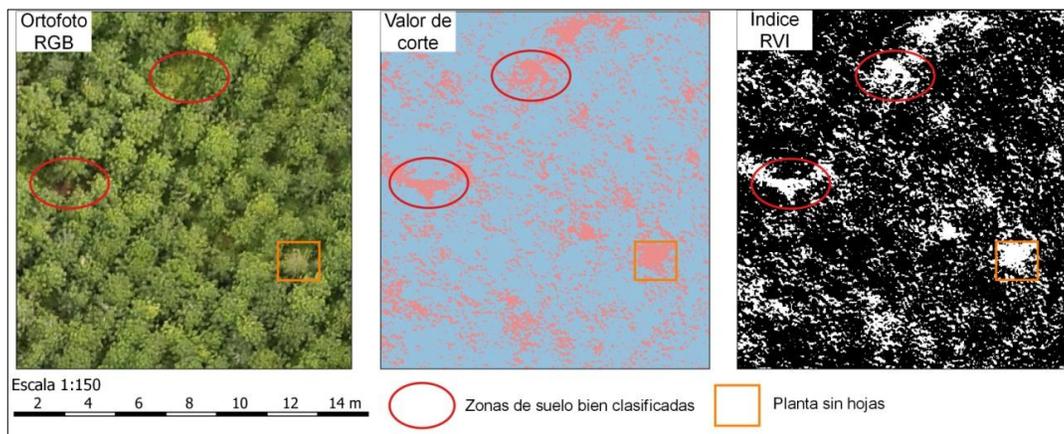


Figura 28. Ejemplo de un artefacto o área de incertidumbre

Fuente. Ortofoto RGB y datos multiespectrales. Elaboración propia

Elaborado el RVI, tan solo falta aplicar el resultado del índice GARI a las plantas de café. El índice GARI presenta las correlaciones más altas respecto a la clorofila sin diferenciar el estado de salud de las hojas y es sensible a un amplio rango de concentraciones de clorofila, lo cual explica el rendimiento notable en ambos grupos de hojas, cloróticas y sanas (Solis *et al.*, 2021).

Se obtiene con ello, una visión del estado general de los cafetos de la parcela (Figura 29), observando especialmente la clorofila –fundamental en los procesos fotosintéticos de las especies vegetales– pudiendo establecer una zonificación y bajo supervisión agronómica aplicar diferentes tasas de fitosanitarios allá donde se requiera.

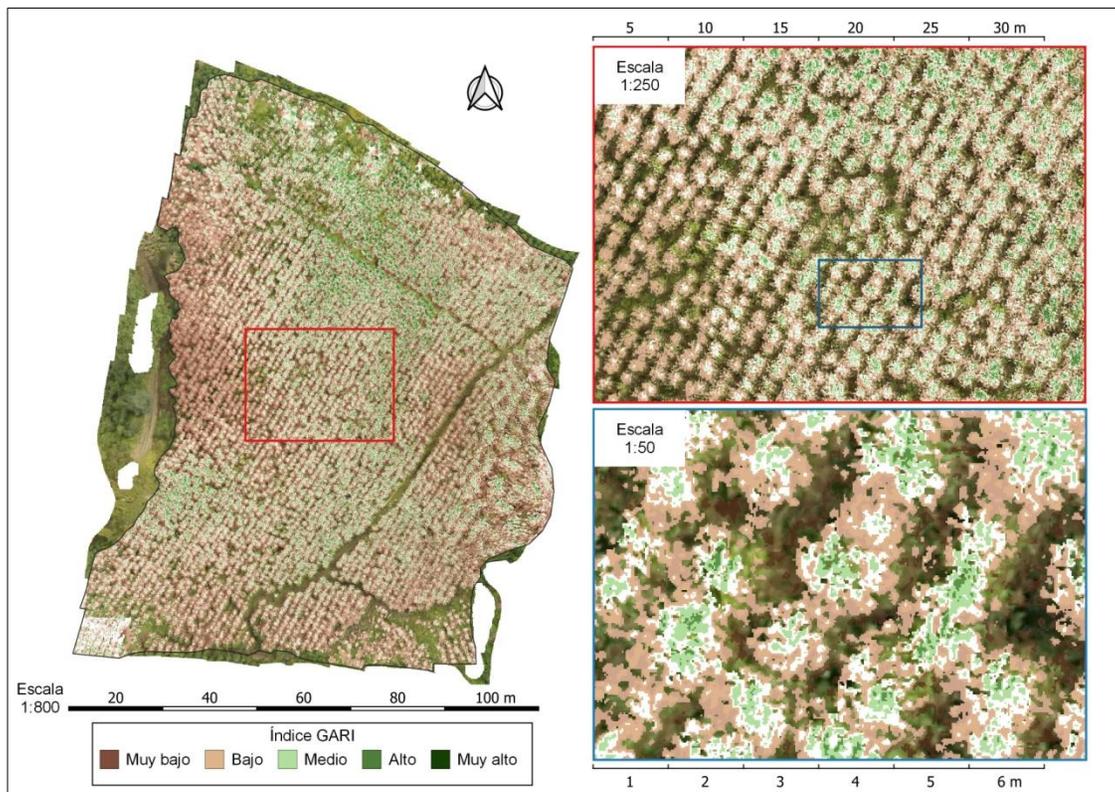


Figura 29. Vista de la parcela A con el índice GARI a diferentes escalas
Fuente. Ortomosaico RGB e índice de vegetación GARI. Elaboración propia

3.4 Cuarta parte. Contabilización de la flor del café y validación de resultados

Para evaluar los resultados de esta sección sólo han sido útiles los datos recogidos en el vuelo con fecha 19 de mayo –vuelo 8–, ya que en los días posteriores –23 de mayo– una fuerte tormenta despojó de flores prácticamente la totalidad de la parcela de estudio, provocando también numerosos daños en algunas construcciones de la finca.

No se utilizan todas las imágenes ME recogidas en el vuelo ya que sólo se orientan 41 de 64 totales con un error de posicionamiento de 3.12 m, lo que genera duplicidades de flor en los resultados (Figura 30). Los resultados obtenidos son fruto del procesado de los datos multiespectrales de 20 fotografías orientadas con un error de posicionamiento de 0.62 m, arrojando una resolución espacial de 0.86 cm de píxel para el ortomosaico. Los datos de apoyo RGB tienen un error de posicionamiento de 0.12 m y una resolución espacial de 1.23 cm de píxel.

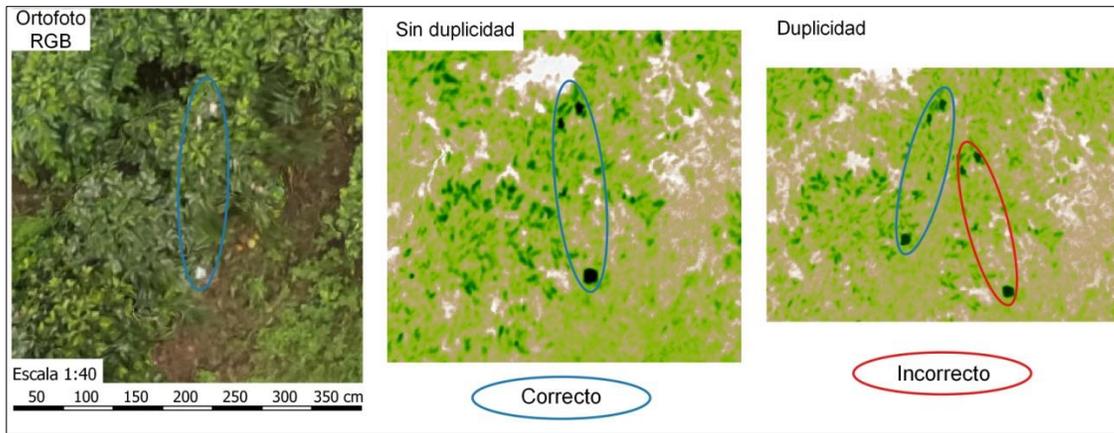


Figura 30. Ejemplo de duplicidad de flor por error de posicionamiento excesivo

Fuente. Datos RGB y ME

El área de la parcela recortada donde se han contabilizado flores es de 763.7 m², cuantificando un total de 838 flores para el resultado sin pulir y 333 flores para el resultado pulido, asimismo resultan unas densidades de flor de 1.1 m² y 0.44 m² respectivamente (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados obtenidos

Parcela	Variedad Plantado	Área (m ²)	Toma datos	Flores sin pulir	Densidad	Flores pulido	Densidad
B	Castillo 2009	763.71	19/05/2022	838	1.1	333	0.44

Fuente. Resultados de la cuarta parte del estudio. Elaboración propia

De manera visual se muestran los resultados sobre la parcela diferenciando el resultado sin pulir y el obtenido mediante el proceso de pulido (Figura 31).

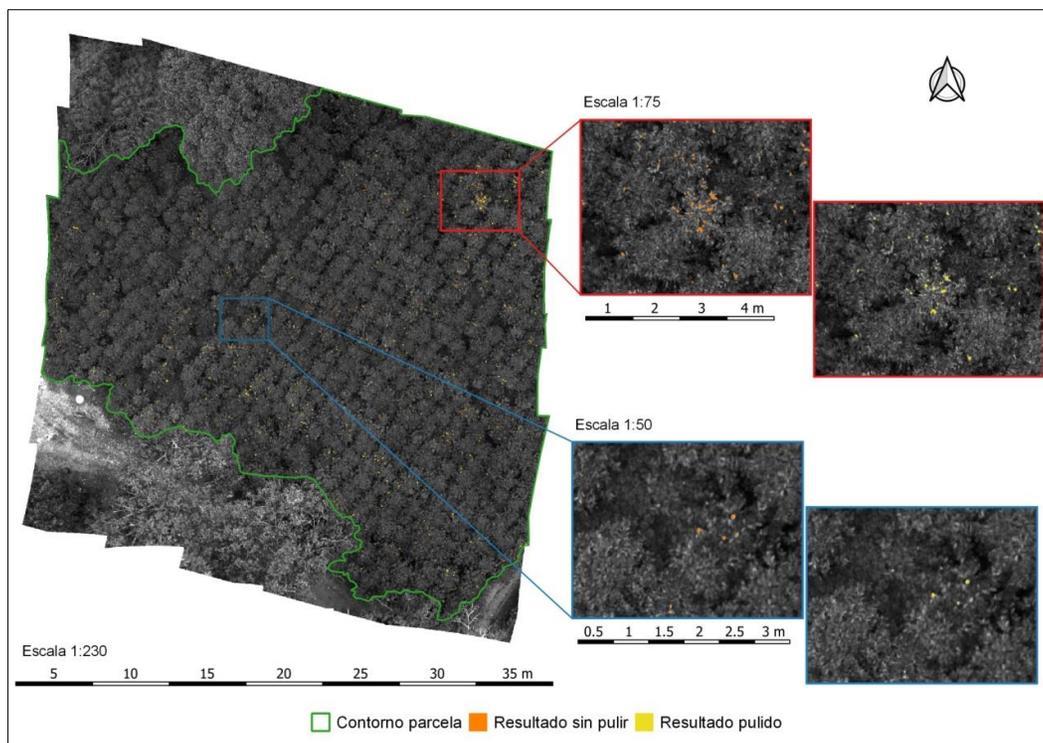


Figura 31. Resultados sobre la parcela de estudio B

Fuente. Resultados sobre ortomosaico banda azul

En la Tabla 9 figuran los resultados del método de validación; el conteo de flores realizado por las cinco personas colaboradoras del proyecto comparado con los resultados obtenidos –sin pulir y pulido– en las cuatro zonas o plantas de validación.

Tabla 9. Resultados del conteo y validación de resultados (los aciertos se muestran en color azul)

19/05/2022	Número de flores RGB					Número de flores Azul					Resultado sin pulir	Resultado pulido
Persona	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E		
Planta validar 1	12	11	8	9	10	11	11	10	8	10	8	4
Planta validar 2	14	12	15	14	15	14	15	17	16	22	22	15
Planta validar 3	7	8	4	6	5	8	11	7	11	10	11	4
Planta validar 4	8	10	5	5	7	9	9	8	7	8	8	4

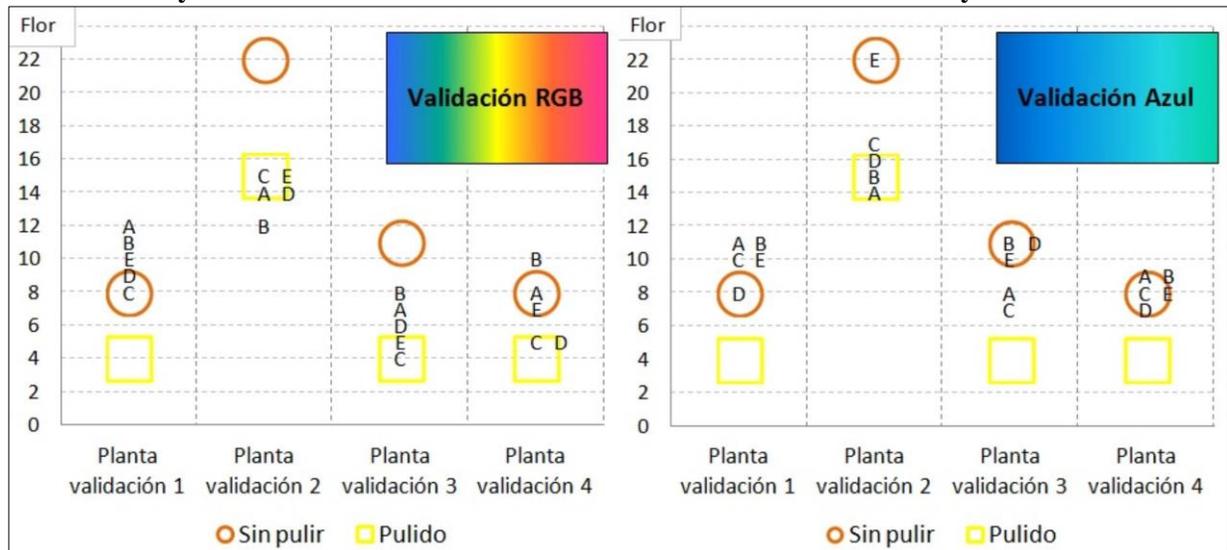
Fuente. Conteo por 5 personas y resultados de la cuarta parte del estudio. Elaboración propia

La interpretación de la tabla genera lo siguiente; dos personas coinciden con el resultado sin pulir en la primera planta de validación y ninguna con el resultado pulido. En la segunda zona de validación encontramos 4 coincidencias, 3 de ellas con el resultado pulido y 1 con el resultado sin pulir. Para el tercer caso, 2 personas coinciden con el resultado sin pulir y 1 con el resultado pulido. Finalmente para la cuarta planta de validación, 3 personas coinciden con el resultado sin pulir y ninguna con el resultado pulido.

Por lo que respecta al mayor número de coincidencias en el visionado de las imágenes RGB y banda azul, resulta lo siguiente: 5 aciertos se dan en RGB y 7 aciertos para la banda azul. Teniendo en cuenta que han sido totalizados 20 visionados por canal, se obtiene un porcentaje bajo de aciertos.

Si se considera un margen de error de ± 1 –por las características de resolución de las imágenes–, se obtiene una mejoría en los resultados ya que bastantes de ellos coinciden en este rango. Esto se puede apreciar en los siguientes gráficos (A y B).

Gráficos A y B. Coincidencias de resultados visionados con la banda RGB y con la banda azul



Fuente. Conteo de las 5 personas y resultados de la cuarta parte del estudio. Elaboración propia

De esto se deduce que existen más coincidencias en la validación con la banda RGB para los resultados obtenidos mediante el proceso de pulir (aciertos en 3 plantas de validación) que en los resultados sin pulir (aciertos en 2 plantas de validación). Mientras que, para la validación con la banda

azul, se obtienen más coincidencias con los resultados sin pulir (aciertos en las 4 plantas de validación) que en los resultados pulidos (acierto en 1 planta de validación).

Por consiguiente, ante la incertidumbre que genera por no tener la fiabilidad de una validación in situ de los resultados, se propone repetir el método previo marcado de unas zonas de validación observables desde el sensor, contabilizando en cada una de ellas el número total de flores. De esta manera se podrá validar de forma segura y correcta.

4. Conclusiones

Considerando los objetivos propuestos en este estudio, se afirma la utilidad de los datos obtenidos gracias a los sensores embarcados en los drones para el monitoreo y gestión de una finca de café, pudiendo adquirir más información si se combinan datos RGB y ME.

Se valora positivamente los ortomosaicos, MDS, MDE y productos derivados conseguidos ya que proporcionan una mejoría en la resolución espacial permitiendo un visionado general del terreno suficiente para el seguimiento de las labores cotidianas, posteriores análisis y toma de decisiones.

Teniendo en cuenta la fuerte inclinación del terreno en muchas de las fincas de café de la región, se establece que, para el tipo de dron y sensor utilizado, así como para el software empleado en el procesamiento de los datos, se logran mejores resultados a partir de los planes de vuelo en modo cenital a 90° de inclinación del *gimbal*.

Con los vuelos a la mayor altura permitida –120 m–, y a partir de los datos ME, se recaba información útil para disponer de una aproximación del estado general de los cultivos, gracias a la elaboración de los índices de vegetación, en especial el índice GARI es apropiado para vuelos a menor altura –60 m– siempre que el solape de imágenes frontal y lateral no sea inferior al 80 %.

Se detectan errores en la interpretación del índice RVI para discernir entre cultivo y suelo. Hecho que se asocia a la menor frondosidad de una planta despojada de hojas, que, por tanto, mezcla píxeles suelo y píxeles planta, cosa que no ocurre con una planta con el dosel repleto de hojas.

Para el recuento de flores –del que tan solo se han podido evaluar datos de un vuelo– se comprueba que el solape de imágenes debe aumentarse al 80 % independientemente de la altura de vuelo, que para detectar la flor quedará establecida en un máximo de 20 m.

Se sugiere utilizar el sistema de posicionamiento RTK para lograr una precisión centimétrica y de este modo mejorar la interpretación por parte del software en el procesado.

Para la validación in situ se establecerán varias zonas (unas de conteo y otras de control de resultados) mediante marcado con cinta visible desde el aire y en las cuales se realizará el conteo previo a cada vuelo.

Agradecimientos

Familia Torres Londoño, Hacienda Guayabal, Chinchiná

Joel Grau Bellet, área de geodesia del Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya

Marc Pertiñez Anfruns y Ana María Solarte Osorio

Referencias bibliográficas

- Agisoft (2022). “*Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7*”. Disponible en https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- Alvarado, G.; Posada, H.E.; Cortina, H.A. (2005). Castillo: Nueva variedad de café con resistencia a la roya. *Avances técnicos Cenicafe*, 337: 1-8
- Bonnaire, L.; Montoya, B.; Obando, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22 (1) e1578. Disponible en https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578
- Capachero, C.; Garcia, P.L.; Obregón, N. (2015). Análisis de la exactitud del modelo digital de terreno SRTM-30 para Colombia usando datos IGAC e IDEAM. *Revista de Investigaciones–Universidad del Quindío*, 27 (1): 30-38. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/331555348>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio*, 3ª ed.; Ariel: Barcelona, España, p. 60-64.
- De Caldas, Francisco José (1802) Clasificación de Caldas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM
- DJI GS Pro (2018). “*GS_Pro_User_Manual_v2.0_EN_201811.pdf*”. Disponible en https://dl.djicdn.com/downloads/groundstation_pro/20181102/GS_Pro_User_Manual_v2.0_EN_201811.pdf
- DJI Phantom 4 Multiespectral (2020). “*P4_Multispectral_User_Manual_v1.4_EN.pdf*”. Disponible en https://dl.djicdn.com/downloads/p4-multispectral/20200806/P4_Multispectral_User_Manual_v1.4_EN.pdf
- Gitelson, A.; Kaufman, Y.; Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3): 289-298. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A.; Kaufman, Y.; Stark, R.; Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1): 76-87. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/s0034-4257%2801%2900289-9>
- Han, L.; Tianxing, F.; Prakash, G.; Lei, D. (2020). Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. *Remote Sensing*, 12 (16), 2542. Disponible en <https://doi.org/10.3390/rs12162542>
- Hoffmann, J. (2018). *The World Atlas of Coffee, From Beans to Brewing – Coffees Explored, Explained and Enjoyed*, 2nd ed.; Mitchell Beazley: Londres, Inglaterra, p. 328-337.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2022). “*Atlas Climatológico de Colombia (1981-2010)*”. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2022). “*Clasificación de los climas. 9.4 Clasificación de Caldas, 11*”. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>
- Kaufman, Y.J.; Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30 (2): 261-270. Disponible en <https://doi.org/10.1109/36.134076>
- MicaSense RedEdge (2018). “*Descubriendo las firmas espectrales en un huerto de nueces*”. Disponible <https://medium.com/punto-focal/descubriendo-las-firmas-espectrales-en-un-huerto-de-nueces-41268c8dad96>

Pearson, R.L.; Miller, L.D. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2: 1357-1381.

QGIS (2020). “*QGIS 3.10 User Guide*”. Disponible en <https://docs.qgis.org/3.10/pdf/fo/QGIS-3.10-UserGuide-fi.pdf>

Ramírez, V.H. (2014). La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. *Avances Técnicos Cenicafe*, 441: 1-8

Resolución Número #04201 de 2018 (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil). “Por la cual incorporan a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia unas disposiciones sobre operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS y se numeran como Apéndice 13, y se adoptan otras disposiciones”. 27 de diciembre de 2018.

Revelo, D.; Mejía, J.; Montoya, B. P.; Hoyos, J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38 (2): 298-312

Solis, A.F.; Campo, D.A.; Revelo, D.; Gaviria, C.A. (2021). Correlación del contenido de clorofila foliar de la especie *Coffea arabica* con índices espectrales en imágenes. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19 (2): 57-68. Disponible en <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1536>

The IDB-Project (2023). “*Index DataBase. A database for remote sensing indices*”. Disponible en <https://www.indexdatabase.de/db/i.php>