



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

ENRUTAMIENTO DE SUPERFICIES MEDIANTE DRON PARA SU UTILIZACIÓN EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Memoria del Trabajo Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

Realizado por
David López González
y dirigido por
Laura Calvet Liñan

Escuela de Ingeniería

Sabadell, Febrero de 2024

La abajo firmante, **Laura Calvet Liñan** director/a del Trabajo de Fin de Grado, profesora de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria ha sido realizado bajo su dirección por

David López González

Y para que conste firma la presente en Sabadell,
junio de 2024

Firmado:**Laura Calvet Liñan**

HOJA DE RESUMEN – TRABAJO DE FIN DE GRADO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA

Título del Trabajo de Fin de Grado: Enrutamiento de superficies mediante dron para su utilización en la agricultura de precisión.

Autora: David López González **Fecha:** Junio de 2024

Tutor: Laura Calvet Liñan

Titulación: Grado en Gestión Aeronáutica

Palabras clave

- Castellano: agricultura de precisión, UAV, diseño de la ruta, plan de vuelo, multispectral y RGB.
- Català: agricultura de precisió, UAV, disseny de la ruta, pla de vol, multispectral i RGB.
- English: precision agriculture, UAV, route design, flight plan, multispectral and RGB.

Resumen del Trabajo de Fin de Grado

- Castellano: Con el presente trabajo definiremos el tipo, características y presupuesto de compra del dron y accesorios más adecuados para el mapeo de una superficie destinada a fines agrícolas. También trabajaremos los conceptos básicos y variables de los vuelos con drones aplicando la legislación vigente en España, todo ello con la finalidad de realizar un plan de vuelo.
- Català: Amb el present treball definirem el tipus, característiques i pressupost de compra del dron i accessoris més adequats per al mapatge d'una superfície destinada a fins agrícoles. També treballarem els conceptes bàsics i variables dels vols amb drons aplicant la legislació vigent a Espanya, tot això amb la finalitat de realitzar un pla de vol.
- English: With this work we will define the type, characteristics and purchase budget of the most suitable drone and accessories for the mapping of an area intended for agricultural purposes. We will also work on the basic concepts and variables of drone flights, applying the legislation in force in Spain, all with the aim of making a flight plan.

CONTENIDO:

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Objetivos.....	11
1.2 Origen y motivación.....	11
2. ESTUDIO PREVIO.....	12
2.1 Agricultura de precisión.....	12
2.2 Situación actual de la integración de drones en la agricultura.....	13
2.3 Agenda 2030.....	13
3. ESTUDIO DEL UAV.....	17
3.1 Perfil del producto.....	17
3.2 Características generales.....	18
3.3 Cámaras y Sensores.....	21
3.3.1 Características de la cámara RGB.....	21
3.3.2 Características de la cámara Multiespectral.....	22
3.4 Batería.....	23
3.5 Factores que influyen en el rendimiento de la batería.....	26
3.5.1 Temperatura.....	26
3.5.2 Viento.....	28
4. CASO PRÁCTICO.....	30
4.1 Descripción del caso práctico.....	31
4.2 Planificación de la ruta.....	31
4.2.1 Área de Objetivo Fotográfico (AOF).....	32
4.2.2 Punto de despegue y aterrizaje.....	33
4.2.3 Puntos para georreferencia.....	34
4.2.4 Método de semejanza de triángulos.....	36
4.2.5 Patron de vuelo.....	37
4.3 DISEÑO DE LA RUTA.....	38
4.3.1 Altura de seguridad.....	38

4.3.2 Superficie a fotografiar plana y horizontal.....	40
4.3.3 Área fotografía obtenida o huella sin solapamiento.....	41
4.3.4 Solapamiento.....	43
4.3.4.1 Solapamiento longitudinal.....	44
4.3.4.2 Cantidad de fotografías longitudinales necesarias por pasada.....	47
4.3.4.3 Solapamiento transversal.....	47
4.3.4.4 Cantidad de líneas transversales (pasadas) necesarias.....	48
4.3.4.5 Matriz 3 x 3.....	49
4.3.4.6 Solapamientos totales por área de una fotografía.....	50
4.3.4.7 Distancia entre dos fotografías.....	51
4.3.4.8 Intervalo entre fotografías (I).....	52
4.3.4.9 Total Fotografías sobre el área de captura (FT).....	55
4.3.4.10 Determinación del tamaño de la memoria del UAV.....	55
4.5 Plan de vuelo.....	56
4.5.1 Ruta de Vuelo.....	56
4.5.2 Tiempo total de vuelo (Tt).....	57
4.5.3 Distancia total recorrida (Dt).....	58
4.5.4 Mapeo del Área de Captura Fotográfica (ACF).....	59
4.6 Resumen del caso práctico.....	61
4.7 Presupuesto de la implementación.....	63
- 2 Tarjetas de memoria microSD de 256 GB, con un precio de mercado unitario de 28,06€, lo que hace un total de 56,12€ [25].....	64
5. CONCLUSIONES.....	66
5.1 Conclusiones sobre los objetivos.....	66
5.2 Conclusiones personales.....	67
5.3 Trabajo futuro.....	68
GLOSARIO.....	71
REFERENCIAS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales empresas en la fabricación de drones y componentes.....	13
Tabla 2 Componentes del DJI Mavic 3M	20
Tabla 3 Características de la batería	24
Tabla 4 Influencia de la temperatura sobre las características de la batería.....	27
Tabla 5 Escala de Beaufort	29
Tabla 6 Puntos de georreferencia.....	35
Tabla 7 Resultados.....	41
Tabla 8 Recomendaciones para el solapamiento	44
Tabla 9 Solapamiento utilizado en el caso práctico.....	44
Tabla 10 Solapamiento sentido movimiento longitudinal.....	45
Tabla 11 Solapamiento sentido movimiento transversal.....	47
Tabla 12 Resultados de la gráfica.....	53
Tabla 13 Factores que influyen en el rendimiento de la batería.....	54
Tabla 14 Presupuesto.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes del DJI Mavic 3M	20
Figura 2 Diferencias entre RGB y NDVI	21
Figura 3 Relación entre distancia focal y ángulo de visión	22
Figura 4 espectro visible por el ojo humano	23
Figura 5 Barra de Estado	24
Figura 6 Esquema eléctrico.....	25
Figura 7 Diagrama de flujo 1.....	30
Figura 8 Superficie AOF	32
Figura 9 Punto de despegue y aterrizaje.....	33
Figura 10 Puntos georeferenciados	34
Figura 11 AOF y puntos de georreferencia	35
Figura 12 Método de semejanza de triángulos.....	36
Figura 13 Diagrama de flujo 2.....	38
Figura 14 Determinación altura objeto.....	39
Figura 15 Poste	39
Figura 16 Árbol	39
Figura 17 Superficie plana y horizontal.....	40
Figura 18 Gráfica de las escalas.....	41
Figura 19 Vuelo estacionario.....	42
Figura 20 Diagrama de flujo 3.....	43
Figura 21 Solapamiento longitudinal fotografías N, N+1 y N+2.....	46
Figura 22 Solapamiento longitudinal fotografías N, N+1 y N+2.....	47
Figura 22 Solapamiento transversal entre líneas.....	48
Figura 23 Matriz 3x3.....	49
Figura 24 Solapamientos totales por área de una fotografía.....	50
Figura 24 Diferencia entre solapamiento longitudinal y transversal.....	50
Figura 25 Distancia entre fotografías.....	51
Figura 26 Gráfica del intervalo entre fotografías.....	53

Figura 27 AOF y sus dimensiones.....	56
Figura 28 Ruta de vuelo del área de captura fotográfica.....	57
Figura 29 Dimensiones del ACF.....	60
Figura 30 Diagrama de flujo 4 - Trabajo a futuro.....	68
Figura 31 Superficie a nivel variable.....	69
Figura 32 Solapamiento del área de imágenes en superficie variable.....	70

1. INTRODUCCIÓN

No es de ahora que la agricultura se enfrenta a problemas serios para alimentar a la población mundial, pero los desafíos a los que se enfrenta la agricultura, en el siglo XXI, debidos al cambio climático, la degradación del suelo, la escasez de recursos hídricos y el incremento de la población mundial, no tienen comparación y son enormes. Las comunidades agrícolas deben adaptarse con éxito a la nueva situación y resulta evidente que las técnicas tradicionales no son suficientes, “a grandes males se necesitan grandes remedios”. La presente situación nos lleva a la innovación y eficiencia en la agricultura, en este trabajo pretendo apoyar un enfoque global de los desafíos actuales del sector agrícola.

Debemos aprovechar, el gran crecimiento y el potencial transformador de las llamadas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). A citar ordenadores, teléfonos móviles o smartphones, redes, programas informáticos, bases de datos y telecomunicaciones. Aprovechar este potencial significa acelerar los esfuerzos para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030 [1]. En este contexto, la agricultura de precisión (AP) aflora como una solución innovadora y eficiente que promueve la sostenibilidad y mejora de la productividad agrícola a nivel mundial.

La agricultura de precisión aprovecha el uso de las TIC y otras tecnologías avanzadas, como sensores, cámaras multiespectrales, sistemas de posicionamiento global (GPS), drones y softwares para análisis de datos que generan modelos reales sobre el terreno y en tiempo real; que optimizan y maximizan la producción agrícola. La puesta en práctica de estos modelos permite a los agricultores tomar decisiones específicas con el objetivo de reducir el uso de insumos como agua, fertilizantes y pesticidas, minimizando el impacto ambiental aumentando la producción.

En el marco de la Agenda 2030, la agricultura de precisión contribuye directamente en la mejora de varios apartados ODS, que se citan a continuación:

- ODS 2 - Hambre Cero: aumento de la productividad agrícola.
- ODS 6 - Agua Limpia y Saneamiento: uso eficiente del agua y reducción de insumos químicos.
- ODS 12 - Producción y Consumo Responsables: optimizar el uso de recursos y reducir el exceso de consumo.
- ODS 13 - Acción Climática: reducir las emisiones de gases de efecto invernadero promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.

La agricultura de precisión se implica de forma clara en la consecución global de los ODS de la Agenda 2030 para hacer frente a los retos a nivel mundial sobre la malnutrición, la pobreza, la gestión de la biodiversidad y el cambio climático.

En este trabajo de enrutamiento planificamos una ruta de vuelo sobre un área rural, con la finalidad de que se pueda realizar diferentes tareas, las cuales pueden ser desde la captura de datos visuales o imágenes , la aplicación de insumos agrícolas, la vigilancia y monitoreo del terreno, entre otras aplicaciones. Previamente mapearemos el área objetivo utilizando mapas topográficos para definir tanto los límites del área a cubrir cómo identificar posibles puntos de interés que requieran una atención especial, también trabajaremos los conceptos y variables necesarios para establecer un plan de vuelo para dron que garantice una ruta óptima y segura.

En el transcurso de este trabajo, se ha recopilado información proporcionada por diversas fuentes. A continuación, se indica el origen de dichas contribuciones:

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO): la FAO ha sido una fuente clave de datos y análisis en el campo de la agricultura, proporcionando una perspectiva global sobre las prácticas agrícolas y las innovaciones tecnológicas en el sector. [2]
- IDC: ha proporcionado datos y análisis específicos sobre el mercado de drones, incluyendo tendencias actuales y futuras sobre la utilización de drones en la agricultura. Esta información ha sido esencial para evaluar su potencial en la mejora de la productividad agrícola. [3]

La combinación de estas fuentes ha permitido obtener una visión comprensiva y actualizada sobre el uso de drones en la agricultura, facilitando así el desarrollo de estrategias y recomendaciones basadas en evidencia para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en el sector agrícola.

1.1 Objetivos

1. Definir el tipo y características del dron más adecuado para el proyecto.
2. Conocer la legislación de drones vigente en España: tipos de licencias, limitaciones generales para el vuelo de drones, seguridad y categorías operacionales en la normativa de drones EASA.
3. Conocer las empresas principales en el mercado de los drones y su abanico de productos.
4. Estudiar los conceptos básicos de un dron: ser conocedor de su estructura general, principales componentes y funcionamiento.
5. Trabajar los conceptos y variables en vuelos mediante drones.
6. Realizar un plan de vuelo con la ausencia de dron para llevarlo a cabo.

1.2 Origen y motivación

“Me gusta la tecnología , la aviación , la fotografía” y los drones me dan todo ello. Pensando en clave laboral, creo que ser piloto de drones abre un sin fin de posibilidades. En particular la producción agrícola y los entornos naturales siempre me han interesado y motivado. Desde que descubrí el concepto “Agricultura de Precisión”, tuve claro que era la herramienta que en un futuro cercano daría sostenibilidad a una agricultura de proximidad que la globalización la había castigado demasiado. Los altos costes de la agricultura tradicional junto a normativas cada vez más exigentes, hacen que frutas de origen centro americano sean más baratas que las que producimos a 100 kilómetros de nuestros hogares. Esta es la causa por la que el escenario generado por la agricultura de precisión me motiva.

2. ESTUDIO PREVIO

2.1 Agricultura de precisión

La Agricultura de Precisión (AP) es un concepto que surgió en los Estados Unidos en la década de 1980, impulsada por el desarrollo de sensores digitales en Minnesota [4]. Mediante la utilización de tecnologías de vanguardia prometía mejorar la productividad de los cultivos y reducir el impacto ambiental, sin comprometer la calidad.

La agricultura de precisión, una rama de la agricultura inteligente, utiliza datos espaciales y temporales recopilados por sensores en tiempo real y mediante teledetección (satélites, drones, etc.). Estos datos se combinan con otra información para tomar decisiones eficientes y sostenibles, permitiendo un uso óptimo de los recursos. La capacidad de almacenar, procesar, visualizar y mapear estos datos facilita la toma de decisiones precisas en el momento y lugar adecuados.

Este enfoque es una prioridad tanto para el Gobierno regional como para el Gobierno de España y la Unión Europea. Se considera una herramienta clave para impulsar la innovación, la rentabilidad, la productividad y la sostenibilidad en el sector agrario, fomentando así su futuro desarrollo. [5]

También hay que decir que la Agricultura de precisión tiene desventajas, a citar:

- Alto costo en la obtención/compra de estas herramientas, hardware y software necesarios.
- Alto costo en la capacitación / formación de la mano de obra.
- Tecnología dirigida a las grandes explotaciones rurales. Difícil amortización para pequeños agricultores.

A pesar de ello, la FAO promueve la AP con el fin de ayudar a los países a conseguir el “Hambre Cero en el Mundo (ODS 2)” y también alcanzar el resto de los ODS de la Agenda 2030.

2.2 Situación actual de la integración de drones en la agricultura

En la actualidad el liderazgo del mercado de los drones a nivel mundial está muy diversificado, pero las empresas más importantes en materia construcción de drones y componentes, son:

Empresas	
Ag Eagle	Drones a la fija.
3DR	Componentes.
AeroVironment Inc.	Drones a la fija
Trimble	Componentes.
DJI	Drones cuatrimotores.

Tabla 1 Principales empresas en la fabricación de drones y componentes

Se estima que el volumen de negocio del mercado de drones y componentes para el año 2024 alcanzará la cifra de 2,08 mil millones de dólares (aproximadamente 1,938 mil millones de €), y se espera que alcance los 4,36 mil millones de dólares (aproximadamente 4,061 mil millones de euros) en 2029, creciendo a una tasa anual aproximada del 16% durante el período previsto (2024-2029).

América del Norte y en particular EEUU presentan la mayor actividad en aspectos como la innovación e inversión. Se prevé que en 2024, América del Norte represente la mayor cuota de mercado en el ámbito de los drones agrícolas. Por su parte Europa es uno de los mercados más avanzados en cuanto a la adopción de tecnología en el campo de la agricultura de precisión. La escasez de mano de obra en la agricultura actual se ha convertido en un problema, que ha llevado a una mayor dependencia de herramientas agrícolas como los drones en trabajos como inspección del crecimiento agrícola, fumigación y riego. [4]

2.3 Agenda 2030

La Asamblea General de las Naciones Unidas, con sus 193 Estados miembros, aprobó en septiembre de 2015 la “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible”, la cual establece una “visión transformadora” hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los miembros de las Naciones Unidas para asegurar un futuro mejor [1].

Esta agenda incluye 17 ODS, cuyo objetivo es abordar desafíos globales como la desigualdad, la pobreza, la paz, la justicia, el cambio climático y la degradación ambiental.

Los objetivos ODS son:

1. Fin de la pobreza.
2. Hambre Cero.
3. Buena salud y bienestar.
4. Educación de calidad.
5. Igualdad de género.
6. Agua limpia y saneamiento.
7. Energía asequible y no contaminante.
8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación e infraestructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Consumo y producción responsables.
13. Acción climática.
14. Vida submarina.
15. Vida en la tierra y los ecosistemas.
16. Paz, Justicia e Instituciones Sólidas.
17. Alianzas para lograr los objetivos.

El objetivo ODS número 9, trata sobre la industrialización inclusiva y sostenible y el fomento de la innovación, es aquí donde los avances tecnológicos aplicados a los drones son necesarios y determinantes para afrontar los retos que supone la agricultura de precisión y los desafíos que representan sobre nuevos trabajos, crecimiento económico, medioambiente y eficiencia energética.

Los agricultores están abiertos al desarrollo innovador que les ofrecen las nuevas tecnologías, sobre todo cuando su aplicación implica una mejora en la reducción de costes, aumento de la producción y mejora de la calidad del producto final.

Organismos como la FAO consideran los drones como un elemento decisivo en la lucha para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible propuestos en la Agenda 2030.

2.4 Análisis de la normativa Española de UAV

En España, las normas para la operación de aeronaves pilotadas por control remoto está principalmente regida por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) [6] y el Real Decreto 1036/2017, que establece ciertas limitaciones. A continuación, detallaremos los aspectos más relevantes de la normativa vigente:

Normativa Europea:

1. Reglamento (UE) 2019/947: Establece las normas y procedimientos aplicables a la operación de aeronaves no tripuladas. Se centra en la seguridad de las operaciones y clasifica las operaciones en tres categorías: abierta, específica y certificada.
2. Reglamento (UE) 2019/945: Regula los requisitos para la comercialización de drones y las características técnicas que deben cumplir, incluyendo identificación remota.

Normativa Española: [7]

1. Real Decreto 1036/2017: Establece las condiciones de uso civil de los drones en España, incluyendo requisitos para operadores, normas de vuelo, y limitaciones en el espacio aéreo.
2. Ley 18/2014: En su disposición adicional segunda, regula aspectos específicos del uso de drones, incluyendo el registro y las autorizaciones necesarias.

Categorías de Operaciones: [8]

1. Categoría Abierta: Para drones de hasta 25 kg, con limitaciones de altitud (120 metros) y de operación (no sobrevolar personas, mantener línea de visión, etc.). No requiere autorización, pero sí cumplir con ciertos requisitos.
2. Categoría Específica: Para operaciones que no se ajustan a la categoría abierta, requiere una evaluación de riesgos y una autorización específica de la AESA.
3. Categoría Certificada: Para operaciones de mayor riesgo (por ejemplo, transporte de personas), requiere certificación del operador y del dron, similar a la aviación tripulada.

Requisitos para usuarios:

1. Registro: Todos los operadores de drones deben registrarse en la AESA.

2. Formación: Los pilotos deben tener una formación adecuada, que varía según la categoría de la operación. Para la categoría abierta, se requieren conocimientos básicos, mientras que para la específica y certificada, se necesita una formación más avanzada y, en algunos casos, una licencia.
3. Seguro: Es obligatorio tener un seguro de responsabilidad civil.

Espacios Aéreos Restringidos:

1. Zonas Prohibidas: No se permite el vuelo en áreas restringidas como aeropuertos, instalaciones militares, y zonas urbanas densamente pobladas sin una autorización específica.
2. Zonas Restringidas: Existen áreas donde se puede volar con ciertas restricciones y permisos.

Para obtener información más detallada y actualizada, se recomienda visitar el sitio web de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AES) y revisar las últimas publicaciones en el Boletín Oficial del Estado (BOE).

3. ESTUDIO DEL UAV

3.1 Perfil del producto

La implementación de vehículos aéreos no tripulados (UAV), también conocidos como drones, en el ámbito agrícola exige dispositivos con características específicas y propias de la agricultura de precisión. Los grandes avances tecnológicos han convertido a los drones en herramientas esenciales, equipadas con múltiples sensores que facilitan la observación y la recolección de datos cruciales para la toma de decisiones. Esto es especialmente relevante en el contexto actual marcado por el cambio climático y la necesidad de optimizar nuestros recursos agrícolas y todo lo que ello implica [9].

La elección de un producto conlleva evaluar ciertos aspectos, consideraciones tales como: características y especificaciones técnicas, la funcionalidad, la calidad, la reputación, el reconocimiento de la marca, el servicio postventa, la disponibilidad de material y recambios, la formación necesaria y el precio hacen que la elección del producto (UAV) sea determinante a la hora de alcanzar el objetivo deseado.

En nuestro caso, DJI es uno de los líderes indiscutibles en el mundo de los drones y ha establecido un estándar muy elevado en términos de innovación y calidad del producto. Esto no significa que otras marcas no puedan igualar o incluso superar los estándares de DJI, pero como mencionamos al principio, hay muchos factores a considerar antes de tomar una decisión [10].

Un dron diseñado para uso agrícola debe contar con componentes clave para optimizar su rendimiento en el campo. Entre ellos, destacan los sensores, cámaras de alta precisión, autonomía, vuelo autónomo, resistencia y los instrumentos cartográficos.

Sensores:

- Sensores térmicos: para monitorear la temperatura del suelo y las plantas, detectando áreas de estrés hídrico.
- Sensores LIDAR: para crear mapas tridimensionales del terreno y medir la altura de las plantas.

Cámaras de alta precisión:

- Cámara multiespectral: para capturar imágenes en diferentes longitudes de onda, para permitir el monitoreo sobre la salud de las plantas y análisis de la vegetación.
- Cámara RGB: para capturar imágenes detalladas y precisas del campo.

Autonomía: la capacidad de operar durante largos periodos sin necesidad de recargas constantes es crucial para cubrir extensas áreas de terreno agrícola de manera efectiva. En este sentido, las baterías de larga duración juegan un papel vital.

Vuelo autónomo: ofrece la posibilidad de planificación de rutas de vuelo con puntos georeferenciados previamente para una cobertura personalizada de antemano.

Resistencia: operar en entornos exigentes y funcionar eficientemente bajo diferentes climas, soportando vientos suaves, lluvias ligeras y cambios de temperatura sin comprometer su desempeño.

Instrumentos cartográficos: son esenciales para el desarrollo preciso y eficiente de tareas relacionadas con la geolocalización y el análisis espacial en diversos campos. Dos de los instrumentos más destacados en esta área son el GPS de alta precisión y el software de mapeo.

- GPS de alta precisión: Integrado con sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System) que proporcione datos de posicionamiento precisos para la geolocalización exacta de las imágenes y los datos captados y almacenados.
- Software de mapeo: Compatible y capaz de generar mapas detallados de cultivos y análisis de datos.

Por último, es vital la integración con plataformas de análisis de datos agrícolas y herramientas de análisis en tiempo real para una gestión eficiente de los cultivos. Plataformas de análisis de datos agrícolas como DJI Terra y Pix4D permite a los agricultores y especialistas en agricultura de precisión recolectar y procesar datos de manera eficiente. Estas plataformas son capaces de convertir imágenes aéreas capturadas por drones en mapas detallados y modelos 3D, proporcionando una visión clara del estado de los cultivos [11].

Para el caso que nos ocupa podemos decir que la mejor elección en la actualidad es el dron DJI Mavic 3M del fabricante DJI [12], este UAV es ideal para planificación de misiones dirigidas específicamente al mundo de la agricultura.

3.2 Características generales

El dron DJI Mavic 3M incorpora sistemas de detección infrarroja (ítem 6, ver Figura 1) y tiene la capacidad de capturar información visual completa de su entorno, es decir, visión omnidireccional

(superior, inferior y horizontal) (ítems 2 y 12, ver Figura 1) lo que le permite detectar y esquivar objetos en todas direcciones ampliando la seguridad de la aeronave en todo su recorrido.

En condiciones de poca luz, tanto la luz auxiliar (ítem 4, ver Figura 1) como los leds delanteros (ítem 7, ver Figura 1), nos ayudarán en la orientación visual del dron tanto en vuelo como en el aterrizaje, aportando seguridad en las maniobras. Debemos citar que con relación al tren de aterrizaje (ítem 11, ver Figura 1), aparte de ofrecer una base estable, también incorpora unas antenas integradas para la recepción y transmisión de señales de control y telemetría. La energía necesaria para dar “vida” a todo el sistema, pasa por una batería inteligente (ítem 16, ver Figura 1), que deberemos asegurar mediante sus correspondientes bandas de sujeción (ítem 18, ver Figura 1), que gestiona la carga y descarga con el fin de optimizar el rendimiento y la seguridad de la aeronave.

Sabremos el nivel de carga a través de los leds de nivel de batería (ítem 15, ver Figura 1) y del indicador del estado de la aeronave (ítem 10, ver Figura 1) que nos proporcionarán información visual sobre su estado operativo. Serán los motores (ítem 8, ver Figura 1) los que absorban la mayor cantidad de energía permitiendo que a través de las hélices (ítem 9, ver Figura 1), diseñadas para proporcionar la máxima eficiencia, generarán el empuje necesario para elevar el dron y controlarlo en su vuelo, el cual tiene una velocidad máxima de vuelo 75,6 km/h y un tiempo máximo de vuelo de unos 43 minutos.

El dron también incorpora el sistema propio de la marca denominado DJI AirSense, el cual tiene la capacidad de detectar otras aeronaves próximas enviando alertas a la aplicación DJI Pilot 2 que garantiza su seguridad. Para garantizar la calidad y precisión de las imágenes multiespectrales capturadas dispone de un sensorpectral de luz solar (ítem 19, ver Figura 1) que se utiliza para la topografía aérea de alta precisión, la monitorización del crecimiento de cultivos y la exploración de recursos naturales (p. ej.: conteo de árboles). La luz auxiliar inferior (ítem 5, ver Figura 1) proporciona la capacidad de ser visualizado en condiciones de poca iluminación.

En cuanto a la obtención de datos sobre su posicionamiento preciso, dispone de un módulo RTK (ítem 3, ver Figura 1). Se debe hacer especial mención al sistema estabilizador y cámaras (ítem 1, ver Figura 1) que este dron incorpora: Una cámara RGB (20 MP con sensor CMOS 4/3) con obturador mecánico para evitar distorsiones provocadas por el movimiento y cuatro cámaras Multiespectrales (verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) de 5 MP. Tal cantidad de datos serán almacenados en una tarjeta de memoria tipo SD a través de la ranura de la tarjeta microSD de la cámara (ítem 14, ver Figura 1).

Las operaciones de transferencia de datos con otros dispositivos, se llevarán a cabo a través del puerto USB (ítem 13, ver Figura 1). Todo lo anteriormente mencionado no sirve de nada sin el necesario botón de encendido (ítem 17, ver Figura 1).

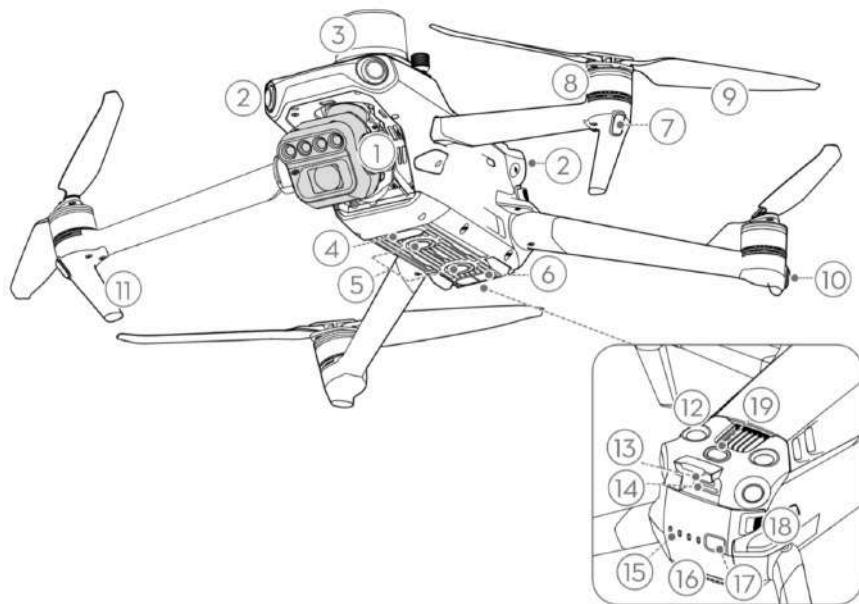


Figura 1 Componentes del DJI Mavic 3M [12]

Tabla de componentes	
1. Estabilizador y cámara	11. Trenes de aterrizaje (antenas integradas)
2. Sistema de visión omnidireccional	12. Sistema de visión superior
3. Módulo RTK	13. Puerto USB-C
4. Luz auxiliar	14. Ranura de la tarjeta microSD de la cámara
5. Sistema de visión inferior	15. Ledes de nivel de batería
6. Sistema de detección por infrarrojos	16. Batería de vuelo inteligente
7. Leds delanteros	17. Botón de encendido
8. Motores	18. Bandas de sujeción de la batería
9. Hélices	19. Sensor espectral de luz solar
10. Indicador de estado de la aeronave	

Tabla 2 Componentes del DJI Mavic 3M [12]

3.3 Cámaras y Sensores

El DJI Mavic 3M dispone de una cámara RGB y otra Multiespectral para la toma de imágenes y análisis de cultivos con precisión. El Indice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) capturado nos otorga la posibilidad de procesar esta información en beneficio del análisis de datos sobre el crecimiento de los cultivos. En la siguiente fotografía podemos comparar el resultado de como una misma exposición, tratada con diferente tecnologías nos hace “ver” aspectos que el ojo humano en condiciones normales es incapaz de percibir.

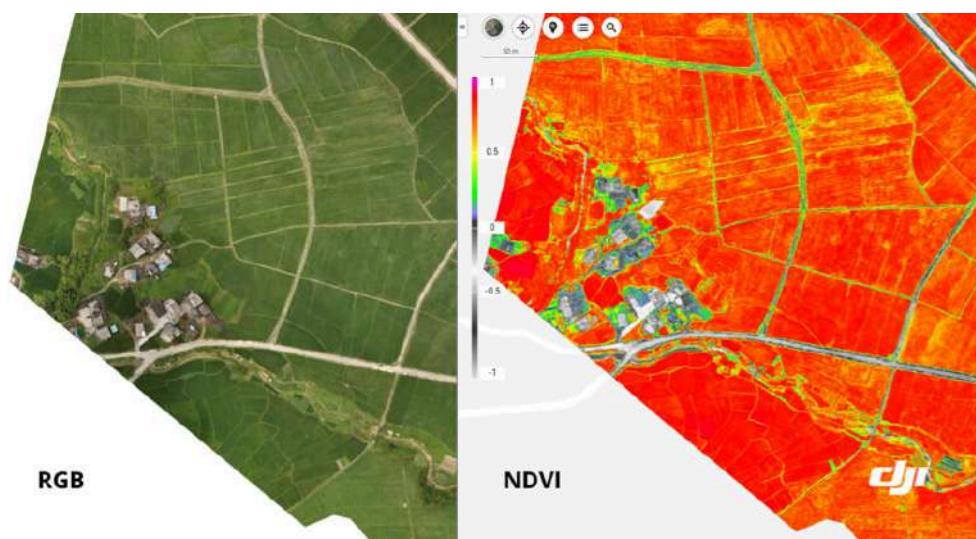


Figura 2 Diferencias entre RGB y NDVI [13]

3.3.1 Características de la cámara RGB

La tecnología CMOS 4/3 es un tipo de tecnología semiconductora que se utiliza en la fabricación de sensores de imagen digitales y otros dispositivos electrónicos. Estos sensores se caracterizan por su bajo consumo de energía y su buen rendimiento en condiciones de poca luz. En este contexto, 4/3 se refiere al formato o relación de aspecto del sensor.

Los píxeles efectivos determinan la calidad y el nivel de detalle de una imagen. La cantidad de megapíxeles (MP) se calcula multiplicando el número de píxeles de ancho por el número de píxeles de alto y luego dividiendo el resultado por un millón. Para nuestro caso específico:

$$(5280 \times 3956) / 1000000 = 20,88 \text{ MP}$$

Redondeando este resultado, obtenemos una resolución efectiva de 20 MP. Las dimensiones máximas que puede tener la imagen son 5280 píxeles de ancho y 3956 píxeles de alto, lo que da una relación de aspecto de: $5280 / 3956 = 1,33$

En este caso, la relación entre la distancia focal y el ángulo de visión es de 24 mm y 84° respectivamente, lo que proporciona un amplio campo de visión en las imágenes capturadas.

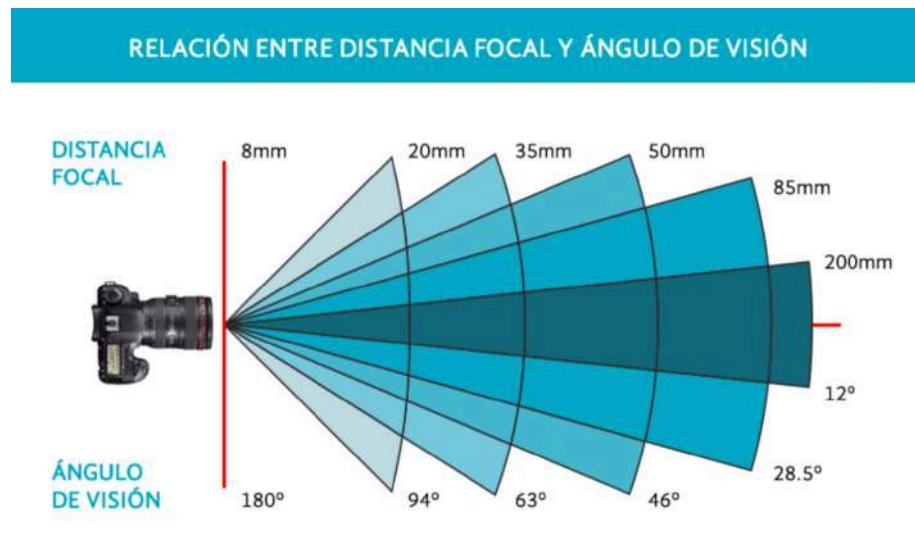


Figura 3 Relación entre distancia focal y ángulo de visión [14]

3.3.2 Características de la cámara Multiespectral

Para la toma de datos multiespectrales deberemos tener en cuenta el ángulo de elevación solar, debiendo ser éste superior a 30° , por lo que se aconseja que la toma se lleve a cabo con tiempo soleado y al mediodía. La cámara multiespectral de cuatro lentes ofrece información direccional muy precisa, pudiendo detectar aspectos que el ojo humano no puede ver, esto permite una mejor comprensión de las condiciones del cultivo, mediante el alcance de las siguientes longitudes de onda:

- Verde (G): $560 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$
- Rojo (R): $650 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$
- Borde rojo (RE): $730 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$
- Infrarrojo cercano (NIR) $860 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$

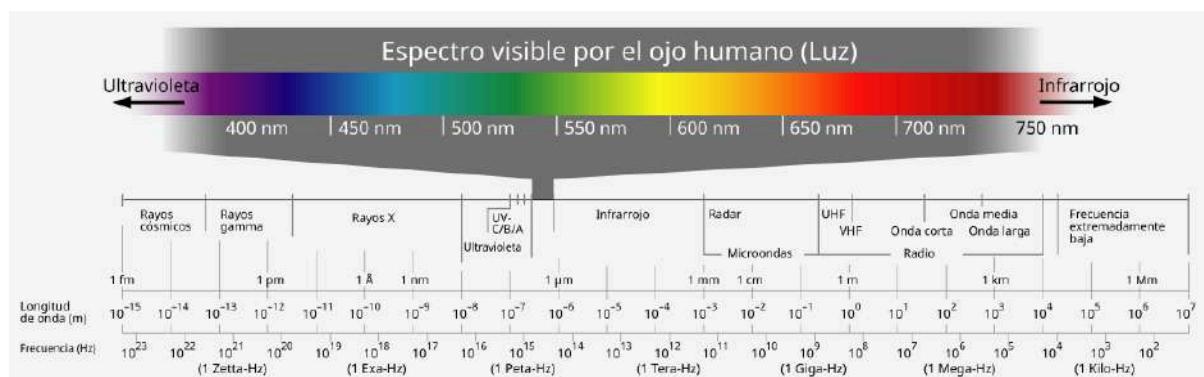


Figura 4 espectro visible por el ojo humano [15]

El Mavic 3M está equipado con un sensor de imagen CMOS de 4/3 con 5 megapíxeles efectivos. Este sensor permite capturar imágenes con una resolución máxima de 2592 x 1944 píxeles, lo que da una relación de aspecto de 1,33.

El sensor de luz incorporado en la parte trasera del Mavic 3M juega un papel crucial en la precisión de las mediciones. Este sensor detecta y registra continuamente las condiciones de luz en las mismas bandas que el sensor multiespectral, asegurando que los valores obtenidos sean precisos y confiables.

En cuanto a la óptica, el Mavic 3M cuenta con un objetivo con una distancia focal equivalente a 25 mm y un campo de visión de 73,91°. La relación entre la distancia focal y el ángulo de visión es clave para determinar la amplitud de la escena capturada por el dron.

Además, el Mavic 3M está equipado con un módulo RTK que permite una sincronización precisa entre el dron, la cámara y el módulo a nivel de microsegundos. Esta tecnología permite realizar levantamientos aéreos de alta precisión sin la necesidad de puntos de control en tierra, lo que mejora significativamente la eficiencia y la exactitud de los datos obtenidos.

3.4 Batería

Con una batería de larga duración de hasta 43 minutos, el Mavic 3M puede inspeccionar y mapear un área de hasta 2 kilómetros cuadrados en un solo vuelo.

La gestión de la carga de la batería en un dron es crucial para habilitar vuelos seguros y eficientes que garanticen el objetivo de la misión y la seguridad del dron. La monitorización en vuelo de la carga de

la batería es necesaria, pero no olvidemos que es una información puntual sobre el estado de carga, que por sí misma no garantiza el regreso del dron al lugar base de aterrizaje.

En la figura que se presenta a continuación se muestra el nivel de información presente en la "Barra de Estado" de la aplicación DJI PILOT 2.



Figura 5 Barra de Estado [12]

El plan de enrutamiento de la misión deberá garantizar un regreso seguro de la aeronave desde un punto de vista generalista y teórico. Serán las condiciones reales y los factores que la determinan los que añadirán al planteamiento inicial ese margen de seguridad para que nuestro vuelo sea seguro y que desde el punto de vista energético garantice nuestra misión. A continuación, veremos las características de la batería, facilitadas por la empresa DJI, sobre su modelo Mavic 3M.

Batería DJI Mavic 3M	
Tipo de batería	LiPo 4S (1)
Capacidad (I)	5000 mAh (2)
Voltaje estándar (Vs)	15.4 V (3)
Energía (E)	77 Watios-hora (4)
Voltaje máx. de carga	17.6 V (5)

Tabla 3 Características de la batería [12]

- (1) Bateria de polímero de litio (LiPo) con cuatro celdas (4S) con un voltaje standar de 3,85v cada una. El voltaje estándar total de la batería será el producto de las cuatro celdas (4S) por el voltaje estándar de cada una de ellas, es decir 15,4v.

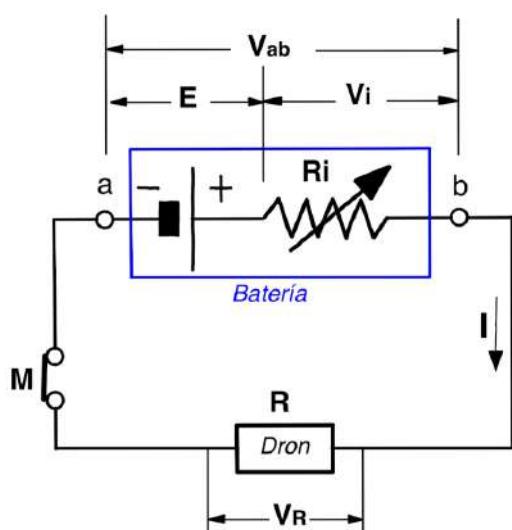
- (2) Es la cantidad de corriente (5000 mAh) que puede suministrar la batería durante una hora hasta vaciarse. Si la corriente absorbida se duplicase a 10000 mAh entonces la batería se vaciará en 30 minutos.
- (3) El valor de tensión estándar o RMS (valor medio) que se considera como referencia para medir la capacidad, intensidad y el rendimiento de la batería.
- (4) $5000 \text{ mAh} = 5 \text{ Ah}$

$$\text{Energía} = \text{Potencia} \times \text{tiempo} = E = I \times V_s \times t = 5(\text{A}) \times 15,4(\text{V}) \times 1(\text{h}) = 77(\text{Wh})$$

- (5) Las baterías LiPo están preparadas para trabajar en un rango entre 3v y 4,4v. El fabricante de baterías aconseja no descargarla por debajo de 3.5v por motivos de “salud” de la batería.

$$\text{Voltaje máx. de carga} = 4,4\text{v} \times 4 = 17,6\text{v}$$

Esquema eléctrico:



E = Fuente de tensión ideal con tensión constante
 V_i = Caída de tensión interna
 V_{ab} = Tensión real en bornes batería
 V_R = Tensión real en bornes R
 R = Resistencia o carga que provoca consumo
 R_i = Resistencia interna variable
 R_t = Resistencia total (suma de resistencias)
 I = Corriente eléctrica
 M = Comutador

Figura 6 Esquema eléctrico

$$V_{ab} = E - V_i; R_t = R + R_i; I = \frac{V_{ab}}{R}$$

Para hacernos una idea, las baterías LiPo tienen una resistencia interna (R_i) que oscilan en el rango de 1 a 100 miliohmios. Es decir: $0,001 < R_i < 0,1 \text{ ohm}$

Consideraciones:

- La corriente máxima o de cortocircuito está limitada por la resistencia interna (R_i).

$$I = \frac{E}{R + R_i}; R = 0; I = \frac{E}{R_i}$$

2. A mayor flujo de corriente (I), mayor es la caída de tensión interna (Vi) y menor es la tensión en bornes de la batería (Vab).

$$Vab = E - Vi = E - (I \cdot Ri)$$

3. En un circuito abierto no fluye corriente eléctrica (I), tensión real en bornes batería (Vab) es igual a la tensión ideal (E).

$$Vab = E - Vi = E - (I \cdot Ri); I = 0; Vab = E$$

3.5 Factores que influyen en el rendimiento de la batería

El factor climático es de los más importantes que afectan a un dron una vez en vuelo. Es por ello que deberemos prestar especial atención a la temperatura ambiental y al viento. Por lo general, evitar volar en condiciones de mal tiempo siempre será una buena idea, por lo que es necesario consultar previamente al vuelo los servicios metereológicos locales.

3.5.1 Temperatura

La temperatura ambiente en las baterías LiPo tiene una gran influencia en su rendimiento, es decir, volar en entornos en los que la temperatura ambiente oscila en el rango de los -10 y los 5°C reduce considerablemente la capacidad de descarga de la misma y en consecuencia el rendimiento del dron se ve afectado.

Como ya hemos visto, el frío aumenta la resistencia interna (Ri) de la batería, justo al contrario del calor, que la reduce. En términos de carga, el cargador deberá hacer un “mayor esfuerzo” para recargarla. Debemos de considerar que en una batería de LiPo el rendimiento baja aproximadamente un 20 % por debajo de los -5 °C. Es decir, si consideramos una reducción del 20% sobre la tensión estándar (Vs) que es la que se considera como referencia para medir la capacidad, intensidad y el rendimiento de la batería, tendremos:

$$\text{Voltaje estándar } (Vs) = 15.4v$$

$$Vs (-5^{\circ}C) = Vs - (Vs \times 20\% / 100\%) = 15.4 - (15.4 \times 20 / 100) = 12.32 \text{ voltios}$$

Teniendo en cuenta que el fabricante de baterías aconseja no descargarla por debajo del voltaje umbral (Vu) 3.5v por celda, en nuestra batería (4S) implica que:

$$Vu = 3,5 \times 4 = 14v$$

$Vs (-5^\circ C) < Vu \rightarrow$ Esto implica: "No despegar o volver al despegue"

Para temperaturas inferiores a los $-10^\circ C$ no se debe volar y por este motivo deberemos ser precavidos en vuelos a elevadas altitudes, dado que el gradiente térmico en las capas más bajas de la atmósfera (troposfera) es de $-6,5^\circ C$ por kilómetro. Lo que significa una disminución de la temperatura de 1 grado por cada 154 metros de altura.

Para garantizar un buen comportamiento de la batería es recomendable que esta esté por encima de los $20^\circ C$. En cuanto a términos de carga de la batería el rango de carga es de entre 5 y $40^\circ C$ (imprescindible seguir el manual de usuario del modelo en concreto).

Características de la batería desde el punto de vista térmico:

- Rango Temperatura de funcionamiento batería: De -10 a $40^\circ C$
- Rango Temperatura óptima de funcionamiento batería: De 0 a $40^\circ C$
- Temperatura funcionamiento recomendada: por encima de los $20^\circ C$
- Rango Temperatura de carga batería: De 5 a $40^\circ C$

Aviso: Mantener la batería dentro del rango de temperaturas recomendado por el fabricante es fundamental para garantizar un buen rendimiento y durabilidad de la batería.

La temperatura externa influye directamente en la resistencia interna de la batería (**Ri**).

	Temperaturas bajas	Temperaturas altas
Resistencia interna (Ri).	Aumenta	Disminuye
Rendimiento	Disminuye	Aumenta
Capacidad de carga	Disminuye	Aumenta

Tabla 4 Influencia de la temperatura sobre las características de la batería

3.5.2 Viento

Lo primero que debemos plantearnos es si hay viento, y si lo hay, qué tipo de viento es. Es evidente que si no lo hay no existe factor negativo por este motivo para no poder volar. Pero si lo hay, deberemos considerar la oportunidad de volar en tales circunstancias con la finalidad de efectuarlo de forma segura. La experiencia del piloto hará que volar en determinadas circunstancias sea factible o no. Pero en todo momento es más que conveniente no sobrepasar los límites de Resistencia Máxima a la Velocidad del Viento (RMVV) de nuestro dron.

El viento afecta a la estabilidad del vuelo, siendo esta tan importante y necesaria para el mapeo y toma de datos en la agricultura de precisión. También afecta a la autonomía de la batería, dado que requiere de más energía para la maniobra del dron que tiene que vencer una mayor resistencia al movimiento.

En el Mavic 3M la RMVV en el despegue y el aterrizaje es de 12 m/seg, por lo que establecer un rango de velocidad entre los 8 y 10 m/seg nos dará cierto margen de seguridad en el despegue y el aterrizaje.

Equivalencias:

$$\frac{m}{seg.} = \frac{Km}{1000m} \times \frac{3600\ sec.}{h} ; \quad \frac{m}{seg.} = 3,6 \times \frac{Km}{h}$$

Datos:

$$RMVV = 12\ m/seg = 43,2\ Km/h$$

$$Rango\ de\ seguridad = 8\ m/seg = 28,8\ Km/h$$

$$Rango\ de\ seguridad = 10\ m/seg = 36\ Km/h$$

Tipos de viento:

La escala de Beaufort nos permite clasificar en 12 niveles los vientos en función de su intensidad.

Nivel	Denominación	Rango
0	Calma	De 0 a 1 km/h
1	Ventolina	De 2 a 5 km/h
2	Flojito (brisa muy ligera)	De 6 a 11 km/h
3	Flojo (brisa ligera)	De 12 a 19 km/h
4	Bonancible (brisa moderada)	De 20 a 28 km/h
5	Fresquito (brisa Fresca)	De 29 a 38 km/h
6	Fresco (brisa fuerte)	De 39 a 49 km/h
7	Frescachón (viento fuerte)	De 50 a 61 km/h
8	Temporal (viento duro)	De 62 a 74 km/h
9	Temporal fuerte (muy duro)	De 75 a 88 km/h
10	Temporal duro (temporal)	De 89 a 102 km/h
11	Temporal muy duro (borrasca)	De 103 a 117 km/h
12	Temporal huracanado (huracán)	Más de 118 km/h

Tabla 5 Escala de Beaufort [16]

Como podemos ver la zona de vuelo se limita desde la calma a las zonas de brisas, tampoco podemos olvidar que el viento en el suelo es diferente al que el drone tendrá a mayor altura.

4. CASO PRÁCTICO

A continuación exponemos un diagrama de flujo que nos guiará en el desarrollo inicial del caso práctico.

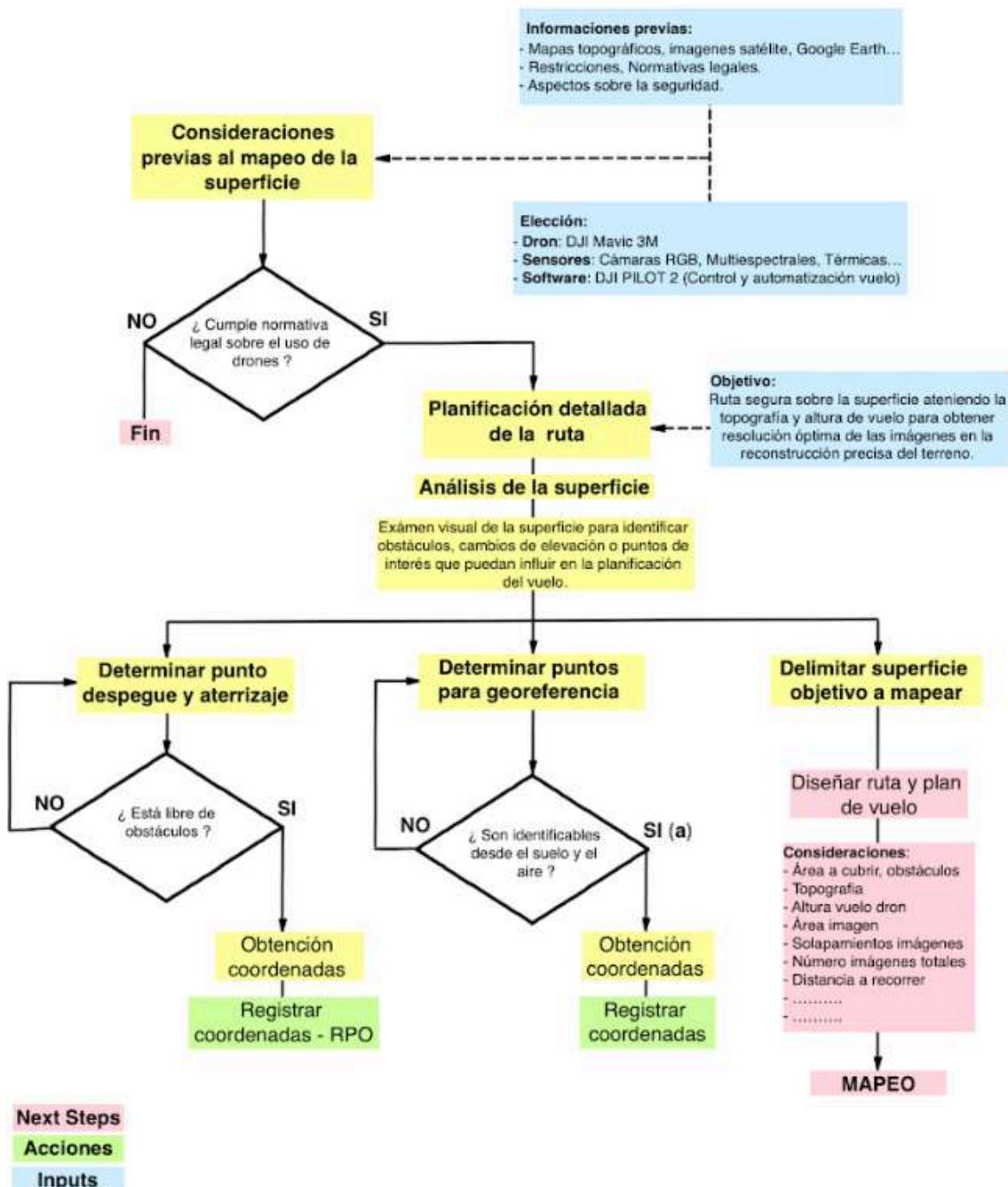


Figura 7 Diagrama de flujo 1

(a) - Los puntos de referencia son importantes en el mapeo de superficies y deben ser fácilmente identificables tanto desde el aire como desde el suelo. Deben estar localizados a lo largo de toda la superficie de mapeo y también deben ser identificables desde las imágenes obtenidas incluso en tiempo real. Estos puntos pueden ser edificios, árboles característicos, cruces de caminos, en definitiva referencias físicas.

4.1 Descripción del caso práctico

Una vez llevada a cabo la inspección “in situ” de la superficie motivo del asunto y definir las particularidades propias de la misma que puedan afectar al plan de vuelo, el problema a resolver consiste en:

1. Definir las variables necesarias para el mapeo o enrutamiento del dron con fines agrícolas.
2. Trabajar las variables para obtener los resultados que nos permitan llevar a cabo el preciso mapeo de la total Área de Objetivo Fotográfico (AOF).

La zona expuesta es una área que se asemeja mucho al estándar de campos de cultivo en Cataluña.

4.2 Planificación de la ruta

Una vez confirmamos que la superficie de estudio no presenta restricciones para el vuelo mediante la consulta en la web de ENAIRE Drones¹, procederemos a determinar su ubicación exacta, las coordenadas, puntos de referencia, área, perímetro, entre otros datos relevantes.

Los valores obtenidos son fundamentales para planificar de manera eficiente la ruta de vuelo sobre la zona objetivo y garantizar el nivel de cobertura fotográfica deseado. Esto implica definir un recorrido que optimice el uso del dron, maximizando la captura de imágenes y minimizando el tiempo y recursos necesarios para completar el estudio.

¹ ENAIRE Drones: <https://drones.enaire.es/>

4.2.1 Área de Objetivo Fotográfico (AOF)

Coordenadas AOF:

- (1) 41°40'22"N 2°21'37"E
- (2) 41°40'22"N 2°21'44"E
- (3) 41°40'17"N 2°21'44"E
- (4) 41°40'17"N 2°21'37"E



Figura 8 Superficie AOF [17]

El terreno elegido para el caso práctico se encuentra ubicado entre las localidades de Cànoves i Samalús y Cardedeu, en la provincia de Barcelona y dentro de la comarca del Vallés Oriental. El terreno es de carácter rural, dedicado a actividades agrícolas. Con una altitud de 282 metros sobre el nivel del mar, este terreno abarca una superficie total de 26244 metros cuadrados, delimitada precisamente por los puntos 1, 2, 3 y 4 (ver en la Figura 17) que define un perímetro de 648 metros. Cabe destacar que su topografía se caracteriza por ser plana y horizontal.

La región tiene un clima templado, con posibles variaciones anuales que oscilan entre los -2°C en invierno y los 35°C en verano, que proporciona condiciones favorables para el cultivo y otras actividades agrarias durante todo el año.

La zona donde se encuentra ubicada la superficie en cuestión no tiene ninguna restricción vigente para el vuelo de drones y la cartografía utilizada incluye referencias de Google Earth y el ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya), asegurando una base cartográfica detallada y actualizada.

4.2.2 Punto de despegue y aterrizaje

Los puntos de despegue y aterrizaje deben ser lugares planos, horizontales y de superficie estable, libres de obstáculos para garantizar maniobras seguras.

Coordenadas punto despegue y aterrizaje:

(5) Coordenadas: 41°40'22"N 2°21'36"E

Altura: 282 m

Fotografía del punto de despegue y aterrizaje:



Figura 9 Punto de despegue y aterrizaje

4.2.3 Puntos para georreferencia

Los puntos de georreferencia son importantes en el mapeo de superficies y deben ser fácilmente identificables tanto desde el aire como desde el suelo. Deben estar localizados a lo largo de toda la superficie de mapeo y también deben ser identificables desde las imágenes obtenidas incluso en tiempo real. Estos puntos pueden ser edificios, árboles característicos, cruces de caminos, en definitiva referencias físicas.

La visita al terreno nos dará información del entorno que nos ocupa. En nuestro caso, al norte y sur nos encontramos con explotaciones agrícolas colindantes, a su vez, la superficie objetivo tiene al este y oeste una masa boscosa en la que predominan las encinas, alcornoques y pinos.

A simple vista podemos observar la altura de la vegetación, la cual deberemos calcular, para determinar la altura de vuelo segura que deberá alcanzar nuestro dron. A través de la superficie objetivo destacamos la presencia de 6 postes de electrificación y una caseta junto a otra construcción que alberga un depósito de agua.



Figura 10 Puntos georeferenciados [17]

Coordenadas puntos georreferencia		
Punto de referencia	Concepto	Coordenadas
6	Depósito agua	41°40'22"N 2°21'40"E
7	Casetta	41°40'21"N 2°21'41"E
8	Poste	41°40'23"N 2°21'40"E
9	Poste	41°40'21"N 2°21'41"E
10	Poste	41°40'20"N 2°21'42"E
11	Poste	41°40'19"N 2°21'43"E
12	Poste	41°40'18"N 2°21'44"E
13	Poste	41°40'17"N 2°21'44"E

Tabla 6 Puntos de georreferencia

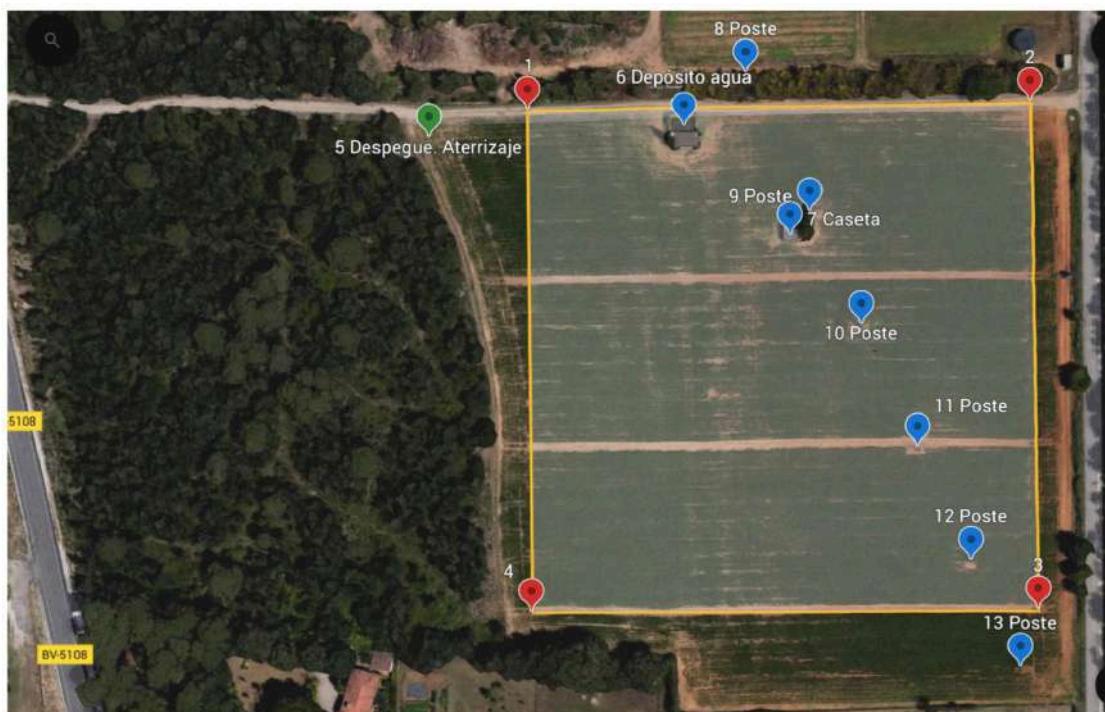


Figura 11 AOF y puntos de georreferencia [17]

4.2.4 Método de semejanza de triángulos

Dos triángulos son semejantes si tienen la misma forma, aunque difieren en tamaño. Vamos a determinar la altura de objetos utilizando el método de semejanza de triángulos, empleando una escuadra escolar. Esta herramienta se caracteriza por tener dos catetos iguales que forman un ángulo de 90° entre ellos.

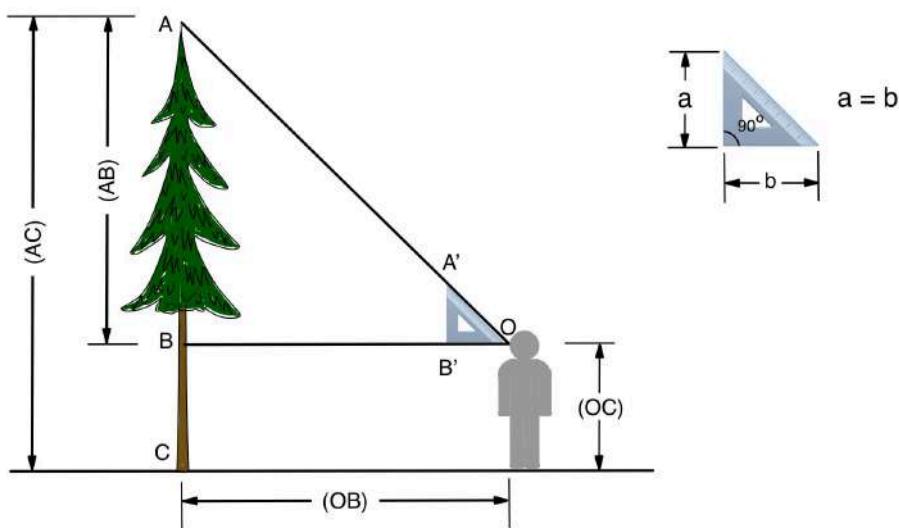


Figura 12 Método de semejanza de triángulos

Una vez tenemos localizado el objeto a medir, nos ponemos a cierta distancia (OB), la cual nos debe permitir unir visualmente los puntos (O) y la altura máxima del árbol (A) siguiendo la hipotenusa (OA') de la escuadra que estará a la altura de los ojos, como si se tratase de apuntar con una escopeta. De este modo veremos que se nos han formado dos triángulos semejantes, uno el triángulo ($OA'B'$) y el otro (OAB). Según esto vemos que se cumple la relación:

$$AB / A'B' = OB / OB'$$

$$AB = (OB / OB') \times A'B'$$

Como sabemos, en nuestra esquadra los catetos son iguales, es decir: $(OB') = (A'B')$

Por lo que si: $AB = (OB / OB') \times A'B'$ y $(OB') = (A'B')$

Tenemos que: $AB = OB$

Es decir, la altura total del árbol es: $AC = AB + OC$

4.2.5 Patron de vuelo

El patrón de vuelo con un dron se refiere a la trayectoria que sigue el dron durante su misión de vuelo con el fin de recopilar datos. Los patrones de vuelo pueden variar dependiendo del propósito y las condiciones de la misión. Algunos de los patrones de vuelo más habituales, entre otros, son:

1. Vuelo en línea recta: El dron vuela en una trayectoria recta entre dos puntos A y B.
2. Vuelo en rejilla: El dron vuela en líneas transversales y longitudinales formando una cuadrícula sobre el área objetivo. Este patrón es común en la agricultura de precisión dado que asegura la cobertura de toda el área sin dejar huecos (solapamiento). El dron DJI Mavic 3M tiene patrones de vuelo predefinidos y modos de vuelo inteligentes que facilitan la realización de tareas concretas.
3. Waypoint Flight (Vuelo por Puntos de Ruta): Este patrón de vuelo permite definir una ruta específica mediante puntos de ruta (waypoints). El dron volará automáticamente a lo largo de la ruta establecida, lo que es ideal para misiones de mapeo, inspección y levantamiento de datos, por lo que podremos configurar un patrón de vuelo en Rejilla. [18]

El dron DJI Mavic 3M cuenta con la capacidad de realizar vuelos en Rejilla, lo cual es una característica esencial para misiones de mapeo y levantamientos topográficos. Este patrón de vuelo permite al dron cubrir sistemáticamente un área específica mediante una serie de líneas paralelas y perpendiculares, asegurando que se capture toda la superficie sin dejar huecos.

Para configurar un vuelo en Rejilla, con el DJI Mavic 3M, podremos utilizar el software de planificación de misiones de "DJI Pilot 2" [13], este software permite definir el área objetivo, establecer la altura de vuelo, el solapamiento de imágenes y otros parámetros importantes para garantizar una cobertura completa del área en cuestión.

Además, el DJI Mavic 3M viene equipado con sistemas avanzados de navegación y sensores que le permiten volar con absoluta precisión para la captura de datos de alta definición durante la misión en modo patrón de vuelo en Rejilla.

4.3 DISEÑO DE LA RUTA

Diagrama de Flujo:

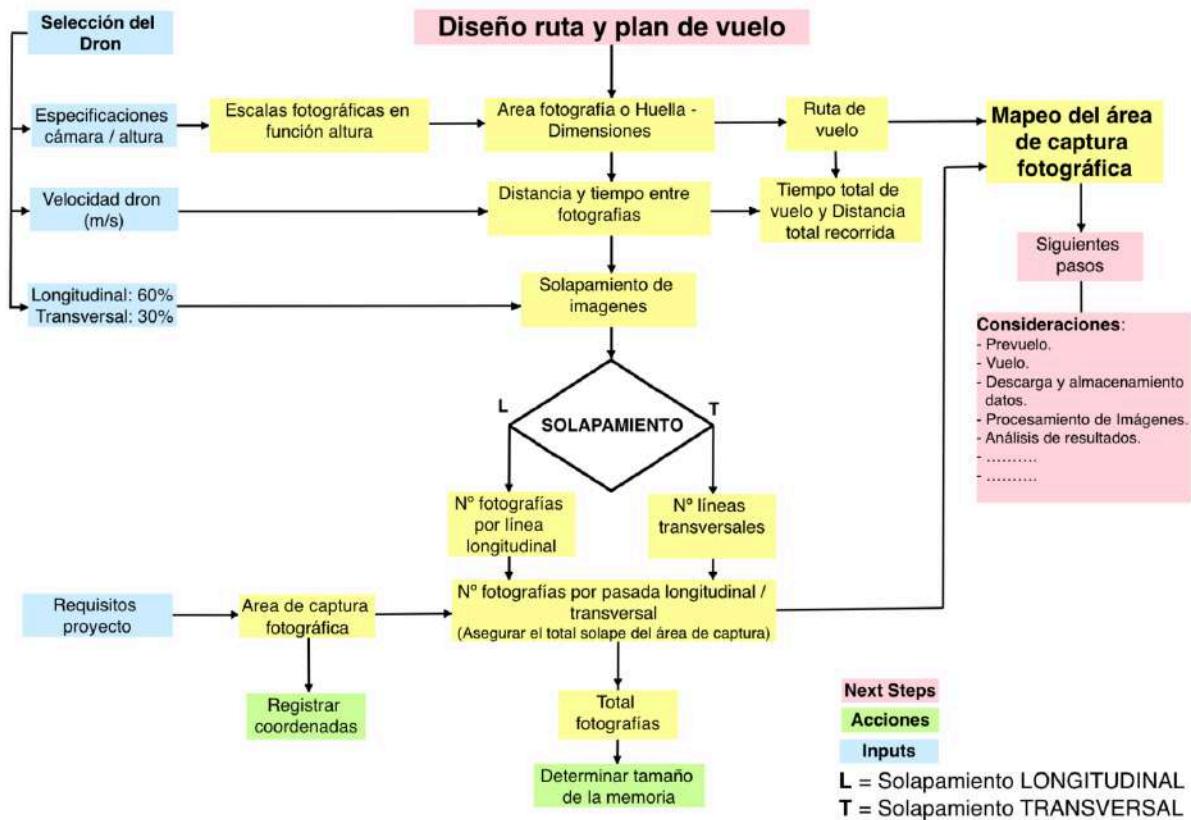


Figura 13 Diagrama de flujo 2

4.3.1 Altura de seguridad

La visita al terreno nos ha permitido ver que un árbol situado al este del terreno o área de objetivo fotográfico, destaca por su altura sobre los demás, así como la presencia de 6 postes de electrificación situados en el interior del terreno y que ya tenemos georeferenciados. La determinación de su altura es necesaria para saber la altura mínima de vuelo que garantice un vuelo seguro.

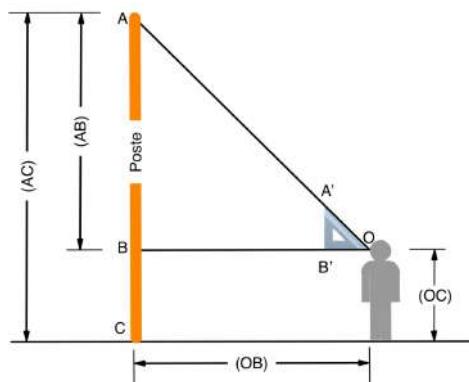


Figura 14 Determinación altura objeto

Para ello utilizaremos el “Método de semejanza de triángulos” expuesto anteriormente.

Vamos a aplicar el “Método de semejanza de triángulos”:



Poste:

(AC) = Altura total poste.

(AB) = Altura poste desde la altura de nuestros ojos.

(OC) = Altura del suelo a nuestros ojos = 1,78 m

(OB) = Distancia de nuestros ojos al poste = 5,92 m

Tenemos que: $AB = OB$

La altura total del poste es: $AC = OB + OC$

$$AC = 5,92 + 1,78 = \mathbf{7,70} \text{ m}$$

Figura 15 Poste [17]



Árbol:

(AC) = Altura total del árbol.

(AB) = Altura árbol desde la altura de nuestros ojos.

(OC) = Altura del suelo a nuestros ojos = 1,78 m

(OB) = Distancia de nuestros ojos al árbol = 15,82 m

Tenemos que: $AB = OB$

La altura total del árbol es: $AC = OB + OC$

$$AC = 15,82 + 1,78 = \mathbf{17,60} \text{ m}$$

Figura 16 Árbol [17]

La altura mínima de vuelo deberá ser en cualquier caso superior a los 17,60 m que tiene el árbol.

4.3.2 Superficie a fotografiar plana y horizontal

En nuestro caso la superficie a fotografiar o superficie de trabajo es plana y horizontal, por lo que nos encontramos en un caso de fotografía aérea vertical de “geometría ideal”.

La figura representa el esquema elemental de la cámara de fotografiar RGB del DJI Mavic 3M , en la que tenemos el sensor con tecnología CMOS y una lente con distancia focal equivalente de 24mm y campo de visión de 84°. La distancia focal es la distancia que hay desde el sensor hasta el centro óptico de la lente. Para la mayoría de drones dedicados a la fotografía aérea, también en nuestro caso, el rango de alturas óptimo es de 30 a 120 m. Este rango permite obtener imágenes en detalle y resolución adecuadas, evitando en la mayoría de situaciones interferencias con posibles obstáculos.

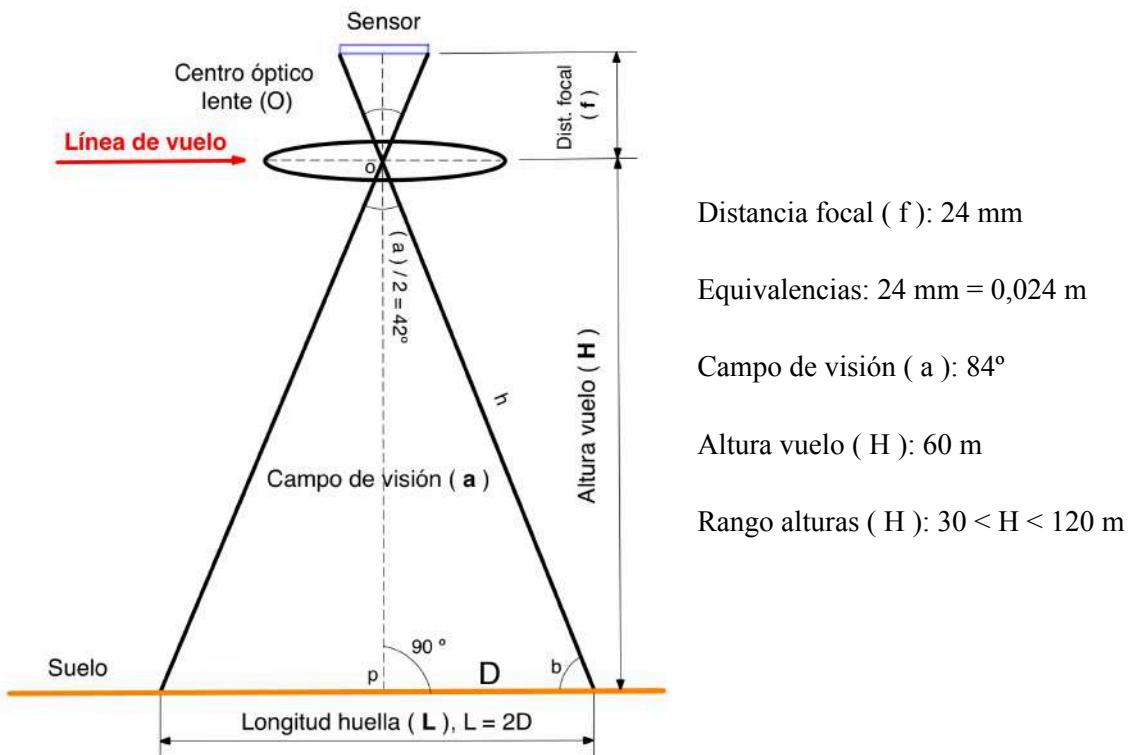
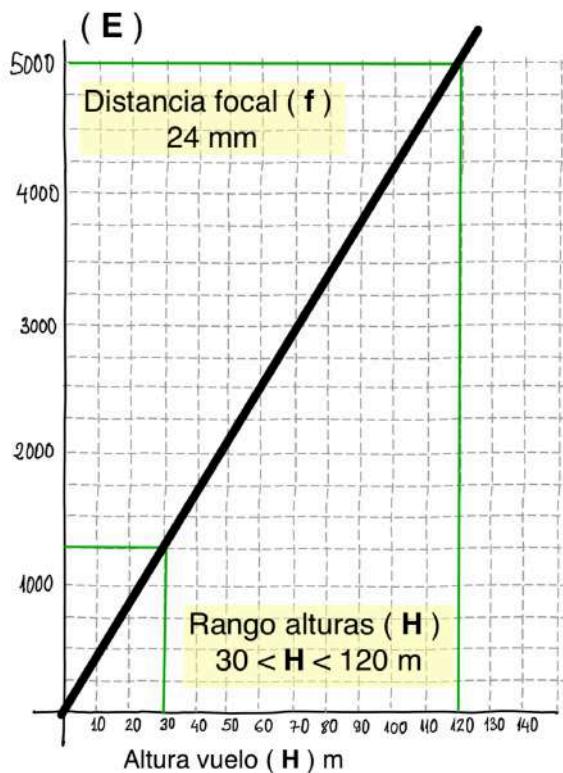


Figura 17 Superficie plana y horizontal

A través del principio de proporcionalidad, establecemos que 1 es a la escala E como la distancia focal (f) es a la altura (H). De donde: $Escala fotográfica (E) = 1 / E = f / H ; E = H / f$

En la gráfica podemos observar claramente como para una distancia focal fija (f) de 24 mm, al variar la Altura de vuelo (H) obtendremos una nueva escala (E).



f (m)	H(m)	E
0,024	30	1250
0,024	40	1666
0,024	50	2083
0,024	60	2500
0,024	70	2916
0,024	80	3333
0,024	90	3750
0,024	100	4166
0,024	110	4583
0,024	120	5000

Tabla 7 Resultados

Figura 18 Gráfica de las escalas

4.3.3 Área fotografía obtenida o huella sin solapamiento

Teniendo en cuenta que la altura mínima de vuelo deberá ser en cualquier caso superior a los 17,60 m que tiene el árbol situado en Área de Captura Fotográfica (ACF), determinamos una altura de vuelo (H) igual a 30 m, que nos proporcionará una altura de vuelo segura y una buena calidad fotográfica.

Datos: Campo visión (a): 84° ; Altura vuelo (H): 30 m. ; Superficie: Horizontal

Incógnita: Longitud Huella = (L)

Resolución:

$$\cos(42^\circ) = H/h ; h = H / \cos(42^\circ) = 30 / \cos(42^\circ); h = 40,369 \text{ m}$$

$$\sin(42^\circ) = D/h; D = \sin(42^\circ) \times h = \sin(42^\circ) \times 40,369; D = 27,012 \text{ m}$$

$$L = 2D = 2 \times 27,012 = 54,024 \text{ m}$$

$$L = 54,024 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta la relación: $5280 / 3956 = 1,33468$

Establecemos el siguiente criterio de proporcionalidad::

$$(5280 / L) = (3956 / X) ; \quad X = (L \times 3956) / 5280 ; \quad X = (54,024 \times 3956) / 5280$$

$$X = L / 1,33468 = 40,477 \text{ m} ; \quad \text{De igual modo: } X = L / 1,33468 = 40,477 \text{ m}$$

$$X = 40,477 \text{ m}$$

Superficie fotográfica obtenida o huella = $L \times X = 2186,7 \text{ m}^2$

En la figura hemos representado la altura (H) del dron en vuelo estacionario y con distancia focal equivalente de 0,024 m del sensor CMOS.

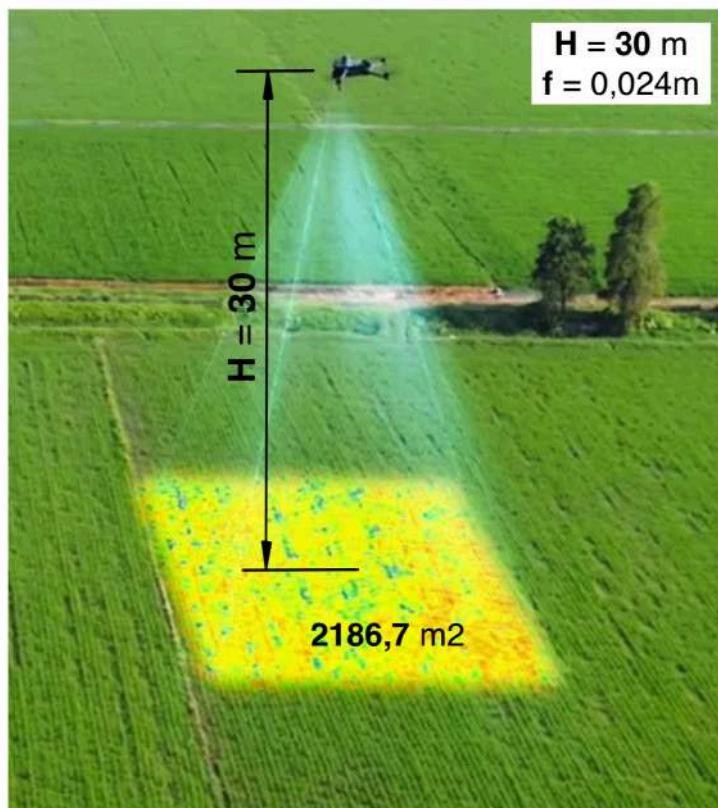


Figura 19 Vuelo estacionario

4.3.4 Solapamiento

Diagrama de flujo:

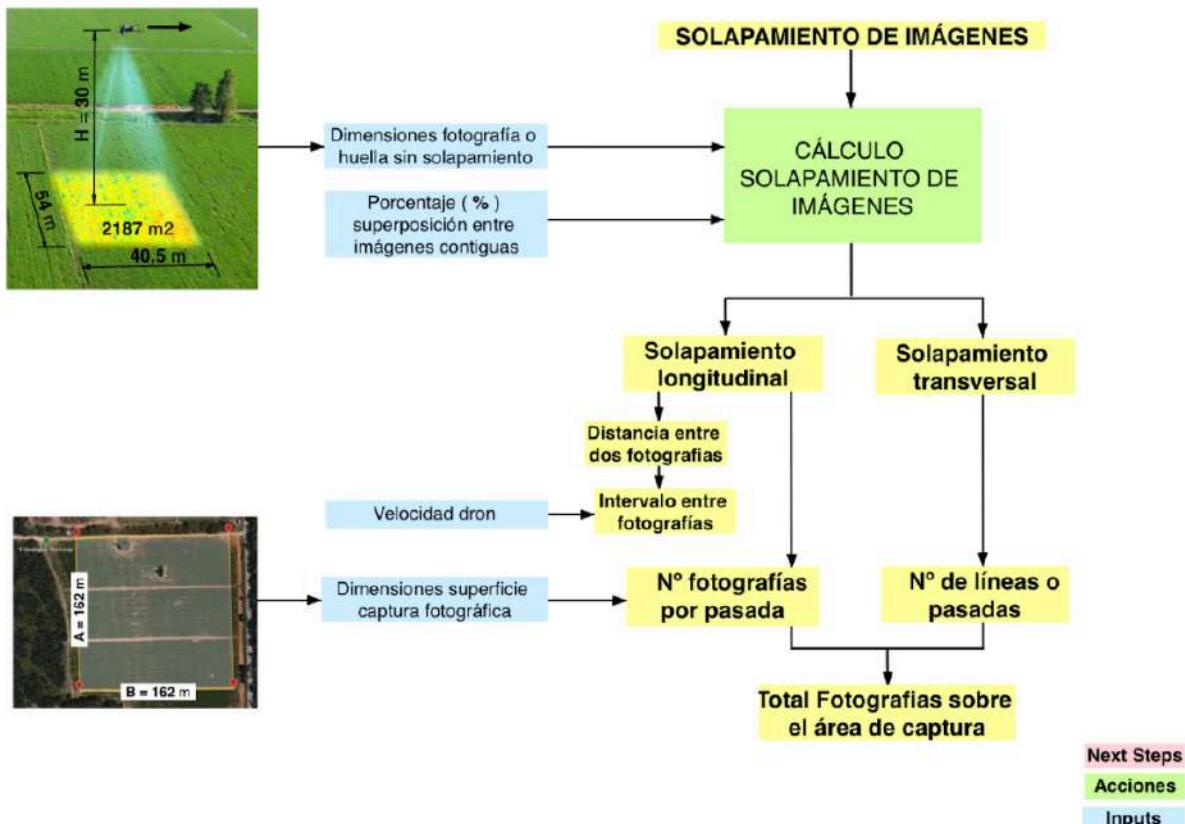


Figura 20 Diagrama de flujo 3

Podríamos pensar que solapar imágenes es improductivo y denota pérdida de recursos, pero no es así. El solapamiento de imágenes es necesario por razones que tienen que ver con la precisión y reducción de errores en el procesamiento de imágenes. La seguridad que otorga el solapamiento de imágenes en la cobertura total de la superficie de trabajo es fundamental y además las imágenes superpuestas nos brindan la posibilidad de aminorar fallos frente a imágenes de poca calidad. [19]

Llegados a este punto es lógico plantearse la siguiente pregunta:

¿Cuál es el nivel de superposición de imágenes?

Pues a priori depende del nivel de precisión que requiera nuestro proyecto y su impacto con la “complejidad del terreno”, que afectará directamente en la resolución de la cámara y la altura de vuelo.

Recomendaciones:

Solapamiento de imágenes	
Sentido LATERAL (Movimiento transversal)	Entre el 60% y el 80%
Sentido AVANCE (Movimiento longitudinal)	Entre el 30% y el 60%

Tabla 8 Recomendaciones para el solapamiento [12]

El software utilizado en el tratamiento de imágenes es fundamental a la hora de determinar el porcentaje de solapamiento de imágenes.

Estos solapamientos se refieren a las imágenes contiguas, es decir:

- En la dirección de AVANCE la fotografía (N+1) tendrá un solapamiento entre el 60% y el 80% con respecto a la fotografía (N) y a su vez la (N+2) tendrá un solapamiento entre el 60% y el 80% con respecto a la fotografía (N+1).
- En la dirección LATERAL la fotografía (N+1) tendrá un solapamiento entre el 30% y el 60% con respecto a la fotografía (N) y a su vez la (N+2) tendrá un solapamiento entre el 30% y el 60% con respecto a la fotografía (N+1) en la dirección perpendicular al sentido de avance del dron.

Superposiciones normales o más comunes tienen los siguientes valores, los cuales vamos a contemplar para nuestro caso en particular:

Solapamiento de imágenes	
Sentido LATERAL (Movimiento transversal)	60%
Sentido AVANCE (Movimiento longitudinal)	30%

Tabla 9 Solapamiento utilizado en el caso práctico [12]

4.3.4.1 Solapamiento longitudinal

El área fotografiada en la imagen N tiene unas dimensiones de 54 m de ancho por 40,5 m de largo, y estas se mantendrán constantes dado que la altura de vuelo será constante. El área proyectada es de 2187 m².

Para asegurar el cubrimiento total de la superficie a fotografiar, solaparemos nuestras fotografías en un 60% en su longitudinalidad o avance del dron y en un 30% de solape en términos transversales o laterales.

	Dimensión (D)	Porcentaje de Solapamiento (%S)	Solape (Ds)
Sentido AVANCE (Movimiento longitudinal)	$(Dl) = 40,5 \text{ m}$	$(\%Sl) = 60\%$	$24,3 \text{ m}$

Tabla 10 Solapamiento sentido movimiento longitudinal

En la figura podemos observar el solapamiento longitudinal de tres fotografías de iguales dimensiones (negra, roja y verde). En la que la fotografía roja (N+1) solapa en un 60% a la negra (N) y la (N +2) solapa en un 60% a la roja (N+1) y a su vez a la negra (N) en un 20% que en metros supone 8,1 m (ver figura).

Cálculos:

$$(Dl) = \text{Distancia longitudinal} (40,5 \text{ m}), (Dl) = (Dsl) + (Dssl)$$

$$(Dsl) = \text{Distancia solape longitudinal}; (Dsl) = Dl \times (\%Sl) / 100\% = 40,5 \times 60 / 100 = 24,3 \text{ m}$$

$$(Dssl) = \text{Distancia sin solape longitudinal}; (Dssl) = (Dl) - (Dsl) = 40,5 - 24,3 = 16,2 \text{ m}$$

$$(Dsln2) = \text{Distancia solape longitudinal de } (N + 2) \text{ sobre } (N).$$

$$(Dl) = (Dssl) + (Dssl) + (Dsln2) = 2(Dssl) + (Dsln2)$$

$$(Dsln2) = (Dl) - 2(Dssl) = 40,5 - 2(16,2) = 40,5 - 32,4 = 8,1 \text{ m}$$

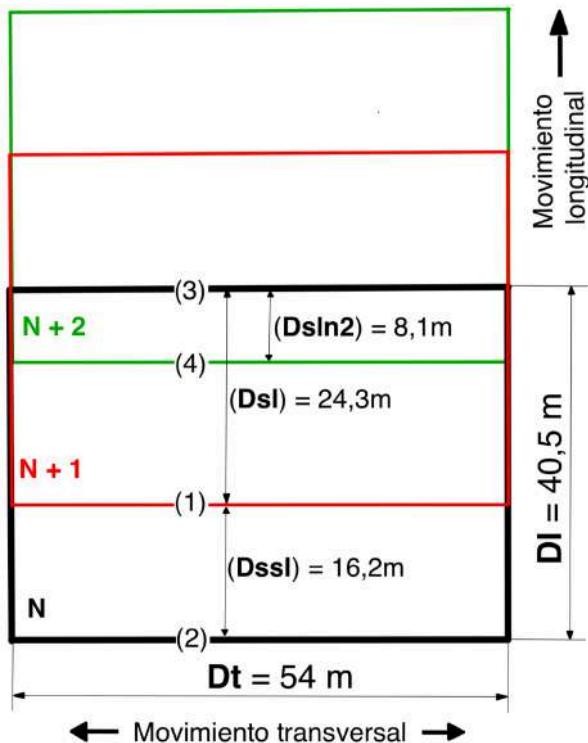


Figura 21 Solapamiento longitudinal fotografías N, N+1 y N+2

Vemos que la primera fotografía (N) (recuadro en negro) no tiene solapamiento entre los puntos (1) y (2) y en definitiva su área correspondiente (ver figuras).

Tal que:

$$Dl = Dssl + Dsl = Dssl + (Dl \times \%Sl / 100\%)$$

$$Dssl = Dl - (Dl \times \%Sl / 100\%) = Dl \times (1 - \%Sl / 100\%) = 40,5 (1 - 60\% / 100\%)$$

$$Dssl = 16,2 m$$

Para evitar esta falta de solapamiento inicial, iniciaremos nuestras labores fotográficas dos imágenes antes de la N, y así garantizaremos el total solapamiento de N en el inicio. Esto quiere decir que nuestra superficie de mapeo sobre el “Área de captura fotográfica” (ACF) se debe ver ampliada en una distancia equivalente a cuatro, dos en el inicio y 2 en el final de la correspondiente línea.

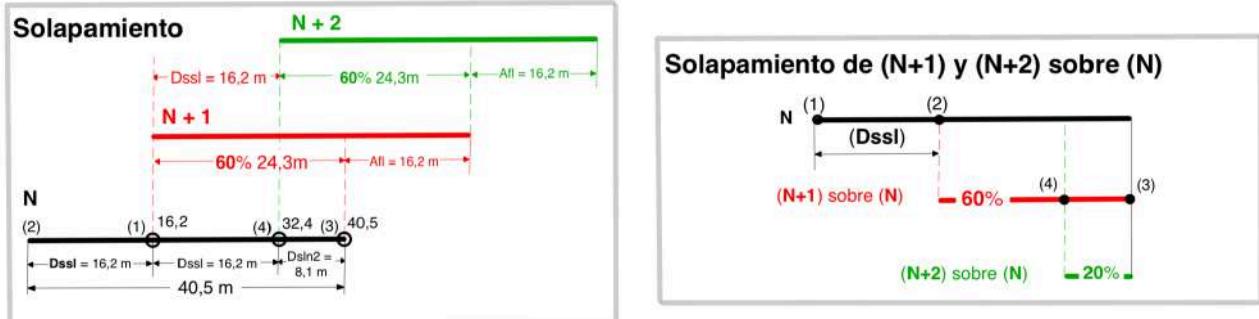


Figura 22 Solapamiento longitudinal fotografías N, N+1 y N+2

4.3.4.2 Cantidad de fotografías longitudinales necesarias por pasada

Podemos observar que con cada fotografía realizada avanzamos 16,2 metros.

$$Afl = Dl - (Dl \times \%Sl / 100\%) = Dl \times (1 - \%Sl / 100\%) = 40,5 (1 - 60\% / 100\%)$$

$$Afl = 16,2m$$

$$Dssl = Afl$$

A = Longitud del “Área de captura fotográfica”

Cantidad fotografías pasada longitudinal = Nfpl = A / Afl = 162 / 16,2 = 10 fotografías por pasada.

Total fotografías pasada longitudinal = 10 + 4 = 14 fotografías por pasada tomadas desde una altura de 30 m.

4.3.4.3 Solapamiento transversal

Trataremos este solapamiento transversal de forma análoga a como hemos hecho con el longitudinal.

	Dimensión (D)	Porcentaje de Solapamiento (%S)	Solape (Ds)
Sentido LATERAL (Movimiento transversal)	(Dt) = 54 m	(%St) = 30%	16,2 m

Tabla 11 Solapamiento sentido movimiento transversal

En la figura podemos observar el solapamiento longitudinal de tres fotografías. En la que la fotografía (N+1) solapa en un 30% a la (N) y la (N +2) solapa en un 30% a la (N+1) (ver figura). Vemos que la primera fotografía (N) no tiene solapamiento entre los puntos (1) y (2).

(Dsst = distancia sin solapamiento transversal) y en definitiva su área correspondiente (ver figuras).

Tal que:

$$Dt = Dsst + Dst = Dsst + (Dt \times \%St / 100\%)$$

$$Dsst = Dt - (Dt \times \%St / 100\%) = Dt \times (1 - \%St / 100\%) = 54 (1 - 30\% / 100\%)$$

$$Dsst = 37,8 \text{ m}$$

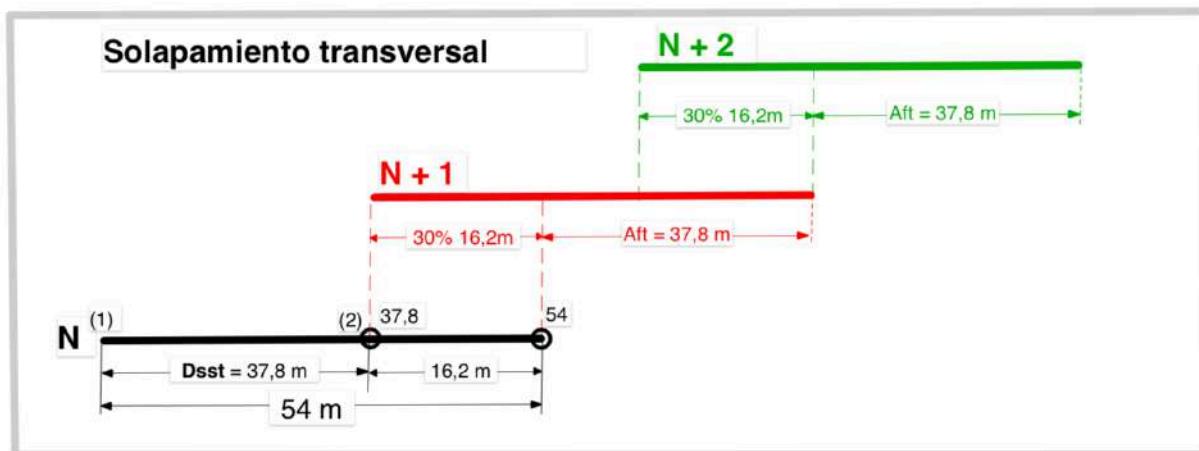


Figura 22 Solapamiento transversal entre líneas

4.3.4.4 Cantidad de líneas transversales (pasadas) necesarias

Podemos observar que con cada fotografía realizada avanzamos 37,8 metros.

$$Aft = Dt - (Dt \times \%St / 100\%) = Dt \times (1 - \%St / 100\%) = 54 (1 - 30\% / 100\%)$$

$$Aft = 37,8 \text{ m}$$

$$Dsst = Aft$$

Cantidad líneas (pasada) transversales = Nfpt = $B / A_{fl} = 162 / 37,8 = 4,28$ líneas por pasada, redondeando al alza:

Total líneas pasadas transversales = $5 + 2 = 7$ fotografías por pasada tomadas desde una altura de 30m.

4.3.4.5 Matriz 3 x 3

En la figura se representa el solapamiento de la fotografía N, recuadrada en negro en la parte inferior izquierda del presente gráfico y de dimensiones 50 x 40,5 m proyectada a las líneas adyacentes.

De forma análoga se repetirá esta acción para la total cantidad de filas y columnas necesarias para cubrir toda la área de captura fotográfica (ACF). Esta acción nos dará de forma gráfica la totalidad fotográfica del mapeo del área AOF.

Las dimensiones aquí representadas han sido calculadas en apartados anteriores. La “Matriz 3 x 3” se refiere desde un punto de vista didáctico al modelo básico para representar el efecto de solapamiento entre fotografías.

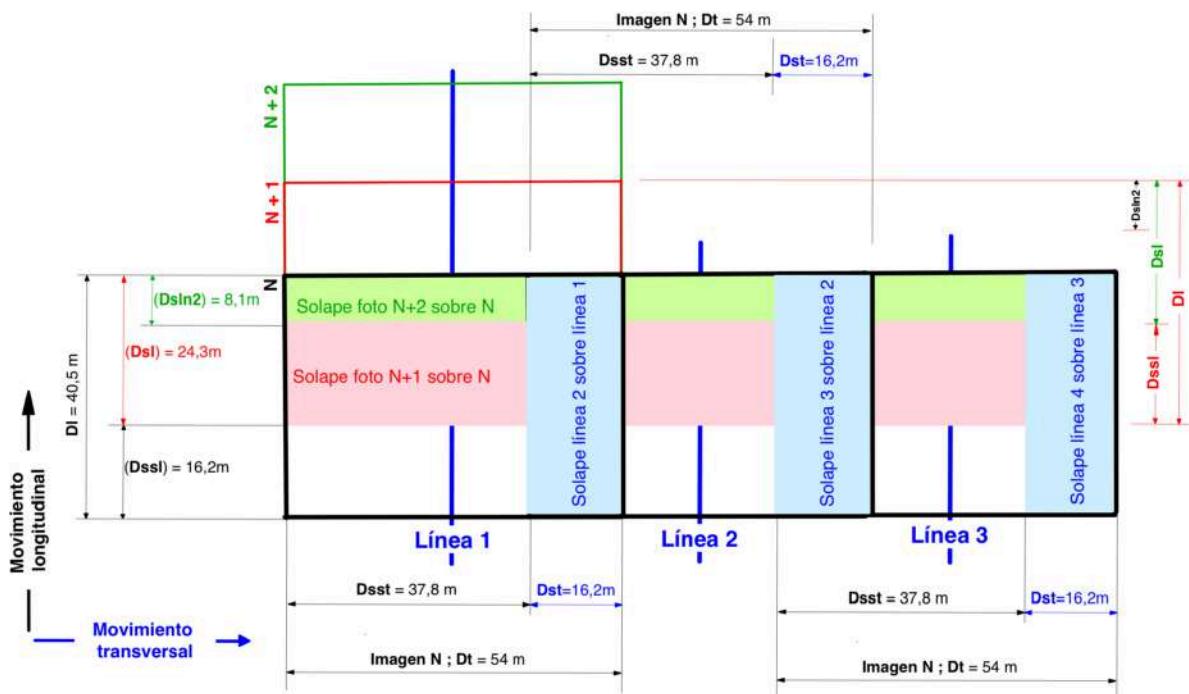


Figura 23 Matriz 3x3

4.3.4.6 Solapamientos totales por área de una fotografía

En la siguiente figura podemos ver en cada recuadro el número de solapamientos totales que se producen debidos a las fotografías realizadas por el criterio de porcentajes de solape considerados, es decir, solaparemos nuestras fotografías en un 60% en su longitudinalidad o avance del dron y en un 30% de solape en términos transversales o laterales sobre la fotografía de referencia N.

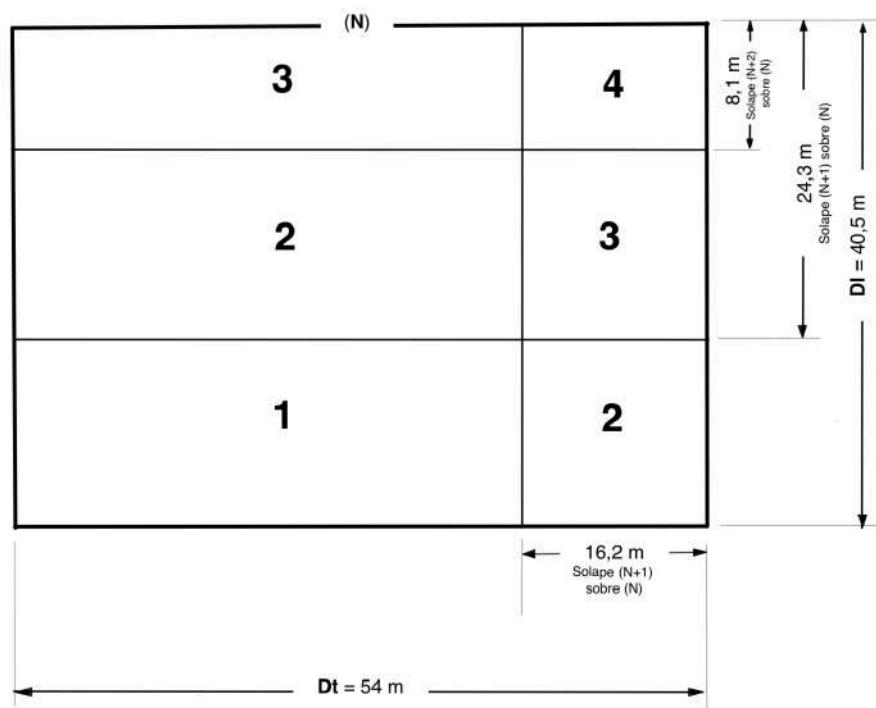


Figura 24 Solapamientos totales por área de una fotografía

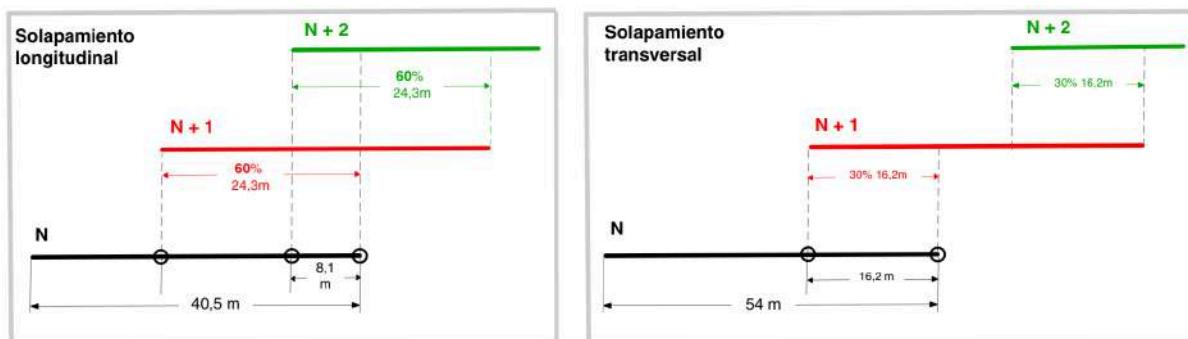


Figura 24 Diferencia entre solapamiento longitudinal y transversal

4.3.4.7 Distancia entre dos fotografías

En el sentido de avance del dron, la distancia entre dos exposiciones (De) es igual a la diferencia entre la longitud de la huella (Dl) y el solape longitudinal (Dsl) para una distancia focal equivalente (f) y altura de vuelo (H) constantes.

Cálculos:

$$De = \text{Distancia entre exposiciones}$$

$$Dl = Dsl + De ; De = Dl - Dsl$$

$$De = Dssl$$

En nuestro caso:

$$Dssl = Dl - (Dl \times \%Sl / 100\%) = Dl \times (1 - \%Sl / 100\%) = 40,5 (1 - 60\% / 100\%)$$

$$Dssl = 16,2 \text{ m}$$

Cada 16,2m de forma automática el dron efectuará una fotografía en el sentido de avance. Como ya hemos visto en el apartado “Solapamiento longitudinal”, la cantidad de fotografías por pasada longitudinal y linea es de 10 exposiciones a las que le añadiremos dos al inicio y final de línea, dandonos un total de 14 fotografías.

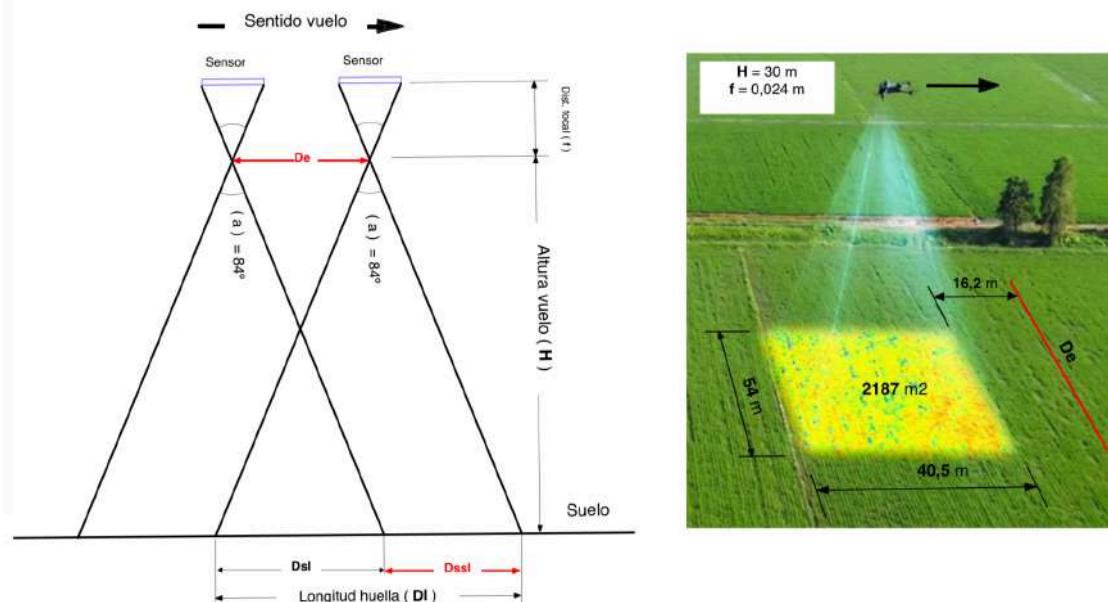


Figura 25 Distancia entre fotografías

En la figura de la derecha, hemos representado las dimensiones longitudinal y transversal de la huella fotográfica y su área relativa, así como la altura (H) de 30 m del dron en vuelo dinámico y con distancia focal equivalente de 0,024 m del sensor CMOS.

4.3.4.8 Intervalo entre fotografías (I)

El intervalo entre fotografías es el tiempo que transcurre en la toma de dos fotografías consecutivas. El modelo DJI Mavic 3M, tiene una velocidad máxima de vuelo (al nivel del mar, sin viento) de 15 m/seg en modo normal (no sport), es decir, el "modo normal" es uno de los modos configurados en el dron que ofrece una mejor estabilidad, control y velocidad en condiciones climatológicas no adversas (temperaturas inferiores a 30°C, vientos inferiores a 12m/seg, vuelos por debajo de los 6000m de altura, ...). El rango de vuelo autorizado en función de la velocidad va desde la $V = 0$ m/seg (vuelo estacionario) hasta los 19 m/seg que es la velocidad máxima permitida en la UE.

Cálculos:

$$De = \text{Distancia entre exposiciones} = 16,2 \text{ m}$$

$$Vm = \text{Velocidad máxima de vuelo} = 15 \text{ m/seg} = 54 \text{ Km/h}$$

$$I = \text{Intervalo entre fotografías}$$

$$I = De / Vm = 16,2 / 15 = 1,08 \text{ seg} ; \text{ a } Vm \text{ en modo normal}$$

Cuando se desea obtener la mayor calidad fotográfica posible, se aconseja volar en el intervalo de velocidades comprendidas entre 5 y 10 m/seg, lo cual no quiere decir que a velocidades superiores la calidad fotográfica no sea suficiente.

Gráfica: Intervalo entre fotografías (I) en función de la Velocidad (V)

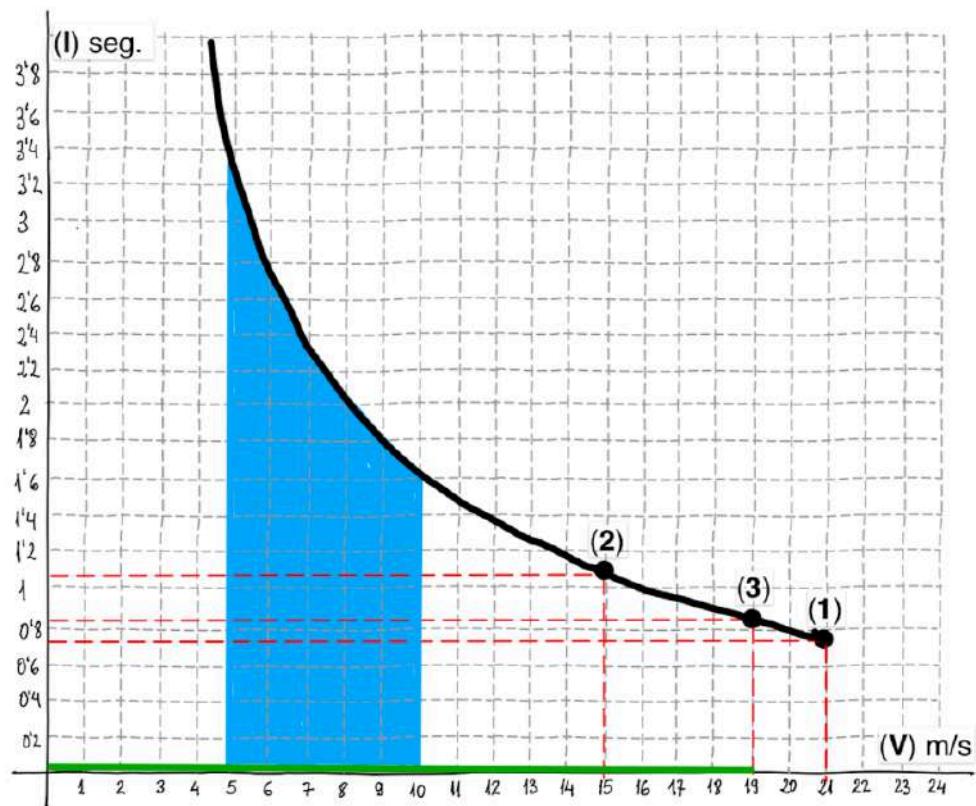


Figura 26 Gráfica del intervalo entre fotografías

V (m/s)	I (seg.)
21	0,77
20	0,81
19	0,85
18	0,9
17	0,95
16	1,01
15	1,08
14	1,16
13	1,25
12	1,35
11	1,47
10	1,62
9	1,8
8	2,03
7	2,31
6	2,7
5	3,34

Tabla 12 Resultados de la gráfica

Aspectos del gráfico:

- (1) Velocidad máx. de vuelo (al nivel del mar, sin viento) - Volando hacia adelante: 21 m/s
 - (2) Velocidad máx. de vuelo (al nivel del mar, sin viento) - Volando hacia adelante: 15 m/s (modo normal)
 - (3) La velocidad máxima en la UE no puede superar los 19 m/s
- (en verde) Rango de vuelo autorizado en la UE.
- (en azul) Rango de velocidades aconsejable para una mayor calidad fotográfica.

Ya hemos visto en el apartado “Factores que influyen en el rendimiento de la batería” como el viento y la temperatura afectan a su rendimiento, pero tambien volar en altitudes sobre el nivel del mar le afectan significativamente. Es por esto que vamos a tener en cuenta ciertas consideraciones que nos ofrece el fabricante, sin viento y a nivel del mar.

	Densidad del aire	Sustentación
Nivel del mar	Más densa	Mejor eficiencia para las hélices
Altitud elevada	Menos densa	Peor eficiencia para las hélices

Tabla 13 Factores que influyen en el rendimiento de la batería

Desde el punto de vista energético, la bateria a nivel del mar permite vuelos más prolongados debido a un consumo de la bateria más eficiente, por contra, volar en altura con aire menos denso implica más esfuerzo, menor capacidad de enfriamiento motor y en consecuencia disminuirá la capacidad de la bateria acortando el tiempo de vuelo.

Resumiendo, el vuelo en altura presenta problemas adicionales en términos de rendimiento, consumo de batería y control, en comparación con el vuelo a nivel del mar. Al respecto, el fabricante del modelo que nos ocupa, establece que la altitud máxima de despegue sobre el nivel del mar es 6000 metros (sin carga útil).

4.3.4.9 Total Fotografías sobre el área de captura (FT)

Es el número total de fotografías necesarias para cubrir la totalidad del área de captura.

Cálculos:

$$FT = \text{Total Fotografías sobre el área de captura}$$

$$Fl = \text{Cantidad de Fotografías por línea}$$

$$Nl = \text{Número de líneas}$$

$$FT = Fl \times Nl = 14 \times 7 = 98 \text{ fotografías}$$

4.3.4.10 Determinación del tamaño de la memoria del UAV

Teniendo en cuenta que el tamaño de una fotografía de disparo único es de 20 MPixels y como hemos calculado en el apartado anterior, el total de fotografías sobre el área de captura es de 70 fotografías, necesitaremos una tarjeta microSD con capacidad para almacenar 1400 MPixels mínimo.

El formato utilizado por la cámara del dron DJI Mavic 3M utiliza varios formatos de archivo, entre estos el JPEG este es un formato ampliamente utilizado para el archivo de imágenes digitales. Una imagen JPEG, puede ocupar entre 1 y 5 bytes por pixel. Es necesario pasar de pixels a bytes, para ello vamos a considerar y realizar un cálculo aproximado en el que la relación sea de 3 bytes por pixel.

$$\text{Total bytes} = 1400.000.000 \text{ pixels} \times 3 \text{ bytes/pixel} = 4200.000.000 \text{ bytes}$$

Aproximadamente: **4,2** Gigabytes

El fabricante del dron, aconseja las siguientes tarjetas microSD: [12]

- Sandisk Extreme 32 GB V30 A1 microSDHC
- Sandisk Extreme PRO 32 GB V30 A1 microSDHC
- SanDisk Extreme 512 GB V30 A2 microSDXC
- Lexar 1066x 64 GB V30 A2 microSDXC
- Kingston Canvas Go! Plus 64 GB V30 A2 microSDXC
- Kingston Canvas React Plus 64 GB V90 A1 microSDXC
- Kingston Canvas Go! Plus 128 GB V30 A2 microSDXC
- Kingston Canvas React Plus 128 GB V90 A1 microSDXC
- Kingston Canvas Go! Plus 256 GB V90 A2 microSDXC

- Samsung PRO Plus 256 GB V30 A2 microSDXC

Como podemos observar cualquiera de ellas nos servirá para nuestro propósito.

Nuestra elección es: Samsung PRO Plus 256 GB V30 A2 microSDXC

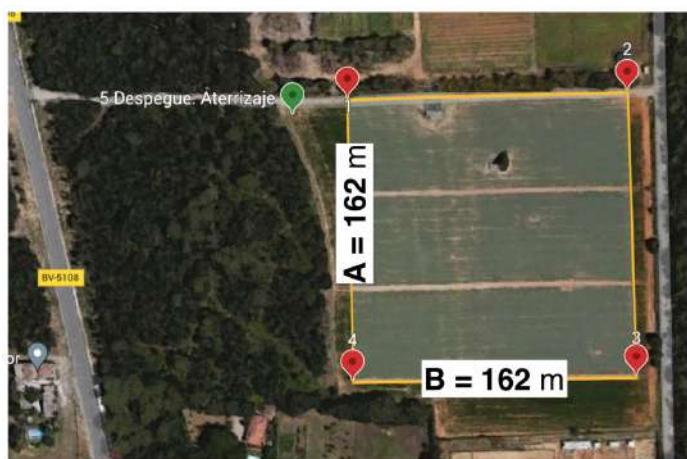
4.5 Plan de vuelo

4.5.1 Ruta de Vuelo

El punto de despegue y aterrizaje (punto número 5) debe ser un lugar plano, horizontal y de superficie estable, libres de obstáculos para garantizar maniobras seguras.

La superficie a mapear es la comprendida por el perímetro en color amarillo, visualizado así tanto en la fotografía mostrada como en el esquema y el recorrido fotográfico es el comprendido a lo largo de las líneas 1 a la 7 inclusivas en azul.

En color naranja se representan las transiciones y como podemos observar, el patrón de vuelo es en rejilla.



Puntos georreferencia:

- (5) 41°40'22"N 2°21'36"E
- (1) 41°40'22"N 2°21'37"E
- (2) 41°40'22"N 2°21'44"E
- (3) 41°40'17"N 2°21'44"E
- (4) 41°40'17"N 2°21'37"E

Figura 27 AOF y sus dimensiones

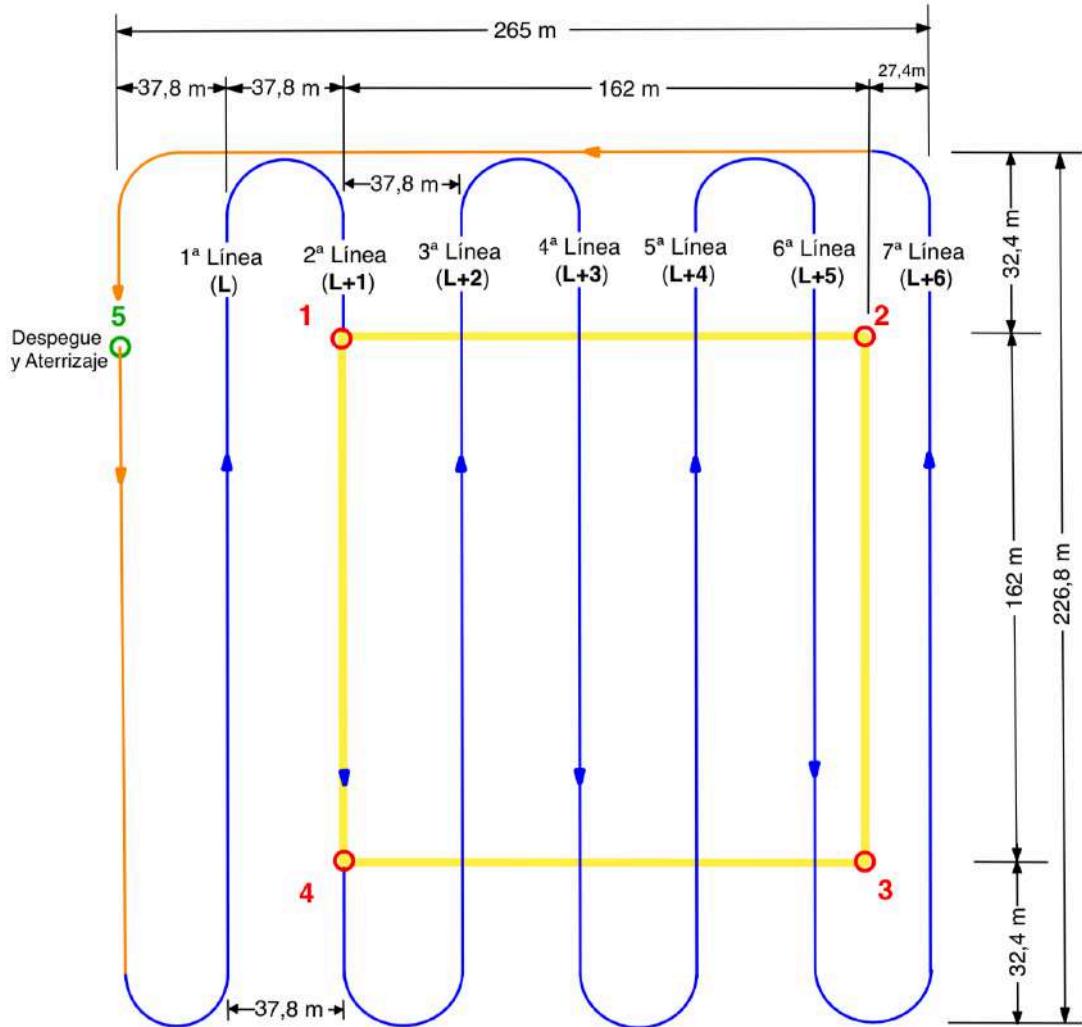


Figura 28 Ruta de vuelo del área de captura fotográfica

4.5.2 Tiempo total de vuelo (Tt)

El tiempo total de vuelo sobre el objetivo viene determinado por el producto entre el intervalo entre fotografías (I) y el número total de fotografías sobre el área objetivo o área de captura, además, debemos sumarle los tiempos necesarios de ida y vuelta al punto de despegue y aterrizaje así como el tiempo transición entre líneas.

El modelo DJI Mavic 3M, tiene un Tiempo máximo de vuelo (sin viento) de 43 minutos (1). En condiciones de vuelo estacionario el Tiempo máximo de vuelo (sin viento) es de 37 minutos (2).

Cálculos:

T = Tiempo total de vuelo sobre el área de captura

I = Intervalo entre fotografías

FT = Total Fotografías sobre el área de captura

Para $V = 15 \text{ m/s}$

$$T = I \times FT = 1,08 \times 98 = 105,84 \text{ s}$$

Tambien podríamos calcularlo como: $T = D / V = 1587,6 / 15 = 105,84 \text{ s}$

Siendo (D) la distancia total fotografiada por línea: $D = 226,8 \times 7 = 1587,6 \text{ m}$

Tt = Tiempo total misión

T = Tiempo total de vuelo sobre el área de captura

Tl = Tiempo transición entre líneas

Tiv = Tiempo ida y vuelta al punto de despegue y aterrizaje

$$Tt = T + (Tl + Tiv)$$

4.5.3 Distancia total recorrida (Dt)

Distancia total recorrida en la “Ruta de vuelo” (Dt) ;

$$Dt = (226,8 \times 8) + (265 \times 2) = 1814,4 + 530 = 2344,4 \text{ m}$$

La distancia máxima de vuelo, facilitada por el fabricante, es de 32 Km (3). Sabiendo la distancia total recorrida (Dt), podemos saber el tiempo de vuelo, considerando la velocidad del dron (V) igual 15m/s. Sabemos que: $V = Dt / Tt$

De donde el tiempo total vendrá determinado por:

$$Tt = Dt / V = 2344,4 / 15 = 156,29 \text{ s}$$

$(Tl + Tiv) = \text{Tiempo debido a las transiciones}$

$$Tt = T + (Tl + Tiv) ; (Tl + Tiv) = Tt - T = 156,29 - 105,84 = 50,45 \text{ s}$$

Datos facilitados por el fabricante como referencia: [12]

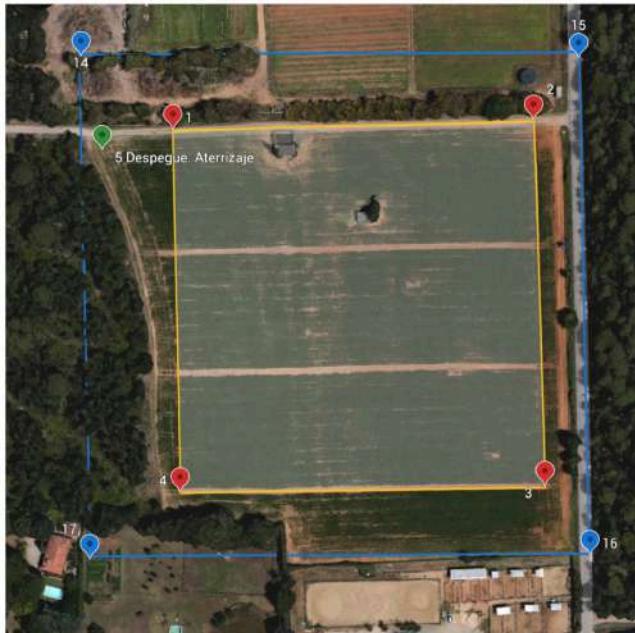
- (1) Datos medidos con el DJI Mavic 3M en un entorno sin viento mientras volaba al nivel del mar a una velocidad constante de 36 km/h hasta llegar al 0 % de energía.
- (2) Datos medidos con el DJI Mavic 3M en un entorno sin viento manteniendo vuelo estacionario sobre el nivel del mar hasta llegar al 0 % de energía.
- (3) Datos medidos con el DJI Mavic 3M en un entorno sin viento mientras volaba al nivel del mar a 57.6 km/h hasta llegar al 0 % de energía.

4.5.4 Mapeo del Área de Captura Fotográfica (ACF)

Mediante el mapeo en tiempo real del campo se genera un modelo tridimensional preciso de una superficie, que permite analizar la topografía del terreno y planificar actividades para la gestión de los recursos naturales. En el mapeo de una superficie, el dron está equipado con cámaras y otros sensores para recoger datos topográficos de una área capturando imágenes desde diferentes ángulos, que luego nos brindarán datos para la generación del modelo definitivo que nos indicará la variabilidad de los parámetros observados. La riqueza de estas informaciones nos permitirá establecer modelos o procesos analíticos agrícolas que nos ayudarán a establecer programas de riego en función de lo sembrado así como evaluar la necesidad de aplicar fertilizantes, productos anti plagas, etc.

En la fotografía, podemos observar que para poder cubrir toda el “Área de Objetivo Fotográfico” (AOF) (en amarillo), necesitamos ampliar la superficie de captura fotográfica con el fin de obtener los solapamientos que aseguren un modelo preciso de la superficie AOF. En la fotografía, el área ACF (en azul) viene delimitada por coordenadas 14, 15, 16 y 17.

Las dimensiones y coordenadas del ACF:



Dimensiones:

Distancia longitudinal (A'): 227 m

Distancia transversal (B'): 227 m

Perímetro: 908 m

Área: 51.529 m²

Coordenadas ACF:

(14) 41°40'23"N 2°21'36"E

(15) 41°40'23"N 2°21'45"E

(16) 41°40'16"N 2°21'45"E

(17) 41°40'16"N 2°21'36"E

Figura 29 Dimensiones del ACF

La primera línea de vuelo coincidirá con la recta que une los puntos (17) y (14) del área ACF (ver puntos en la Figura 24), estando las sucesivas líneas paralelas a la primera, a una distancia de 37,8m la una de la otra. Como podemos ver, a lo largo de las líneas de vuelo, las capturas fotográficas longitudinales sobrepasan en dos los límites del área AOF tanto en su inicio como final, por su parte la dimensión transversal también sobrepasa en aproximadamente 30 m el AOF, esto es para garantizar en cualquier caso el correcto solapamiento de imágenes tanto en el inicio como en el final de línea.

4.6 Resumen del caso práctico

Objetivo: Mapear superficie agrícola.

Ubicación: Entre Cánoves i Samalús y Cardedeu

Datos área AOF:

- Superficie: Plana y horizontal.
- Dimensión transversal: 162 m.
- Dimensión longitudinal: 162 m.
- Perímetro: 648 m.
- Área: 26.244 m²

Coordenadas puntos área AOF:

(1) 41°40'22"N 2°21'37"E

(2) 41°40'22"N 2°21'44"E

(3) 41°40'17"N 2°21'44"E

(4) 41°40'17"N 2°21'37"E

Coordinada punto despegue y aterrizaje:

(5) 41°40'22"N 2°21'36"E

Dron: DJI Mavic 3M

Parámetros de Vuelo:

- Escala fotográfica: 1/1250
- Distancia longitudinal huella (Dl): 40,5 m
- Distancia transversal huella: 54 m
- Altura al dron: 30 m
- Área huella fotografía: 2187 m

Solapamiento Longitudinal 60%:

- Distancia (Dl) = 40,5 m.
- Con Solape de (N+1) sobre (N); (Dsl) = 24,3 m.
- Sin solape de (N+1) sobre (N); (Dssl) = 16,2 m.
- Con Solape de (N+2) sobre (N); (Dsln2) = 8,1 m.
- Total fotografías por línea longitudinal = 14

Solapamiento Transversal 30%:

- Distancia (Dt) = 54 m
- Con Solape de (N+1) sobre (N); (Dst) = 16,2 m
- Sin solape de (N+1) sobre (N); (Dsst) = 37,8 m.
- Total líneas = 7 líneas

Parámetros de Vuelo:

- Velocidad vuelo: 15 m/s.
- Patrón de Vuelo: Rejilla
- Distancia entre dos fotografías: 16,2 m.
- Intervalo entre fotografías: 1,08 m/s
- Total Fotografías sobre el área de captura: 98 fot.
- Tamaño de la memoria : 512 Gb
- Tiempo total plan vuelo: 156,29 s.
- Distancia total plan vuelo: 2344,4

4.7 Presupuesto de la implementación

Cuando compramos el dron DJI Mavic 3M, el contenido de la caja generalmente incluye los siguientes componentes:

Dron DJI Mavic 3M

- El propio dron con su sistema de cámaras y sensores integrados.

Control remoto

- El mando para controlar el dron.

Batería de vuelo inteligente

- Al menos una batería recargable para el dron.

Cargador

- Cargador para la batería del dron.

Cable de alimentación

- Para conectar el cargador a una toma de corriente.

Hélices

- Un juego de hélices (al menos dos pares) y repuestos.

Protector de gimbal

- Protector para el gimbal y la cámara del dron durante el transporte. Protege al estabilizador y a la cámara de colisiones, polvo y agua tanto durante el transporte como en vuelo.

Cables de conexión

- Cables para conectar el control remoto de diferentes dispositivos (generalmente incluye cables USB-C, Micro USB, y Lightning).

Manual de usuario

- Guía de inicio rápido y manual de usuario detallado.

Otros accesorios

- Tornillos de repuesto y destornillador.

El contenido puede variar según el paquete específico y la región de compra.

Para realizar el presupuesto económico para la compra del dron DJI Mavic 3M y los accesorios necesarios, primero se necesita identificar los componentes principales. Los precios aquí representados son precios de mercado, Y los precios pueden variar dependiendo del distribuidor y de la región. En ningún caso se han considerado ofertas ni promociones, y por descontado se pueden obtener mejores precios, pero eso dependerá en buena parte del saber hacer del comprador.

A continuación, detallo la lista de los componentes considerados y sus costos aproximados, sin incluir los accesorios ya contenidos en la caja con la compra del dron ya mencionados anteriormente:

Dron: DJI Mavic 3M tiene un precio de 4518€ [20].

Accesorios:

- Baterías adicionales: 3 baterías y estación de carga para las baterías, con un precio de 618€ [21].
- Juego de hélices de repuestos: 2 juegos con un precio de 29,5€ [22].
- Filtros para cámara RGB: son útiles para mejorar la calidad de video y fotografía en diferentes condiciones de luz, tienen un precio de mercado de 49€ [23].
- Mochila transporte: Para el transporte del dron y sus accesorios de manera segura, con un precio de mercado de 113,8€ [24].
- 2 Tarjetas de memoria microSD de 256 GB, con un precio de mercado unitario de 28,06€, lo que hace un total de 56,12€ [25].
- Seguro a todo riesgo (anual) oscila un precio de 350€/año teniendo en cuenta que se contrate con la aseguradora Mapfre [26].

Concepto	Precio (EUR)
DJI Mavic 3M	4.518,00 €
Baterías adicionales y estación de carga	618,00 €
Hélices de repuesto	29,50 €
Juego de filtros	49,00 €
Mochila de transporte	113,80 €
Tarjetas de memoria	56,12 €
Seguro a todo riesgo	350,00 €
TOTAL	5.734,42 €

Tabla 14 Presupuesto

Este es un presupuesto estimado que puede variar según el proveedor y la región de compra. Es recomendable realizar un “Global Sourcing” solicitando diferentes ofertas en tiendas y distribuidores autorizados para obtener los mejores precios y ofertas disponibles.

5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones sobre los objetivos

Mediante la agricultura de precisión pretendemos ser capaces de aumentar la productividad del sector primario con el uso de las llamadas Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC). Por otro lado, uno de los principales objetivos de este trabajo ha sido saber definir las características específicas que debe tener un dron para ser utilizado en la agricultura para de esta manera poder optimizar recursos y maximizar la producción.

Cabe destacar que gracias a la inspección llevada a cabo “in situ” de la superficie agrícola a mapear en el Área de Objetivo Fotográfico (AOF), situada entre los municipios de Cárboles i Samalús y Cardedeu, se pudo determinar que la topografía del área es predominantemente plana y horizontal. Esta consideración es crucial para el plan de vuelo, ya que una superficie plana implica menores riesgos comparado con una superficie montañosa de niveles variables. Además, se identificaron elementos en el interior del AOF, como postes y árboles, que también influyen en la altura de vuelo de la aeronave y deben ser considerados para garantizar la seguridad del vuelo. Esta inspección de campo subraya la necesidad esencial del trabajo de campo previo para asegurar la viabilidad y seguridad de los vuelos con drones.

El proceso de selección del dron resultó ser muy enriquecedor y formativo, dado que las páginas web de las empresas no solo presentan sus catálogos de productos, sino que también aportan información innovadora que facilita la toma de decisiones. Este conocimiento adquirido ha sido vital para la selección adecuada del equipo en función de las necesidades específicas del proyecto. Adicionalmente, profundizar en los términos legislativos vigentes en España nos ha proporcionado una visión necesaria sobre la existencia de numerosas restricciones tanto administrativas como operacionales que pueden llegar a dificultar la planificación del plan de vuelo.

Este trabajo también nos ha permitido abordar los aspectos básicos necesarios para llevar a cabo el mapeo de terrenos. Este enfoque didáctico es crucial para que los futuros pilotos comprendan tanto las capacidades avanzadas de los drones como las responsabilidades que el piloto debe asumir y que el dron no puede realizar de manera autónoma. Actividades como las que citaremos a continuación, son responsabilidad del piloto y de nadie más:

1. Revisión de Normativas y en su caso obtención de permisos;
2. Inspección del área de vuelo para identificar posibles obstáculos, como árboles, edificios, líneas eléctricas y otros riesgos potenciales.

3. Evaluar la presencia de personas no involucradas en el vuelo y asegurarse de que el área esté despejada para que el vuelo sea totalmente seguro.
4. Planificación del Vuelo definiendo la ruta de vuelo y todos los puntos de interés y datos necesarios como determinar la duración del vuelo para asegurarse de que las baterías tengan suficiente carga para completar la misión.

Estos y otros aspectos pre-vuelo demuestran la vital importancia de la intervención del piloto y la necesidad de una formación adecuada en los aspectos más básicos y avanzados del vuelo con drones.

Finalmente, se concluye que el proyecto propuesto de enrutamiento del dron para aplicaciones en la agricultura de precisión es factible y viable, y que la implementación de este proyecto permite al agricultor mejorar la producción y ofrece una ayuda para el monitoreo de sus activos. Los beneficios esperados incluyen una mejora significativa en la productividad y eficiencia agrícola, lo que repercute positivamente en la gestión y rendimiento de las explotaciones agrícolas.

5.2 Conclusiones personales

Este TFG ha supuesto para mi una buena experiencia, me ha hecho ver posibles oportunidades de trabajo futuras que hasta ahora no había considerado. El hecho de obtener la titulación de piloto de drones es ver el futuro con relativo optimismo.

También el propio trabajo me ha ayudado a planificar y organizar un trabajo a medio largo plazo que hasta la fecha no había realizado.

Del mismo modo, el hecho de realizar consultas en internet, me ha obligado a evaluar de forma rigurosa y objetiva la información con el fin de no introducir falsos datos en el trabajo.

Algo que me ha supuesto un esfuerzo añadido importante ha sido el mejorar mi redacción escrita. Sinceramente nunca ha sido mi fuerte.

En conclusión, la experiencia ha sido muy positiva, pero me hubiese gustado realizar un plan de vuelo sin la ausencia de dron para llevarlo a cabo.

5.3 Trabajo futuro

Tras realizar el presente trabajo y habiendo realizado las tareas propias de un plan de vuelo previas a este, me gustaría proceder a llevarlo a la práctica en su totalidad. A continuación y a modo de resumen indicó el mapa conceptual básico para llevarlo a efecto.

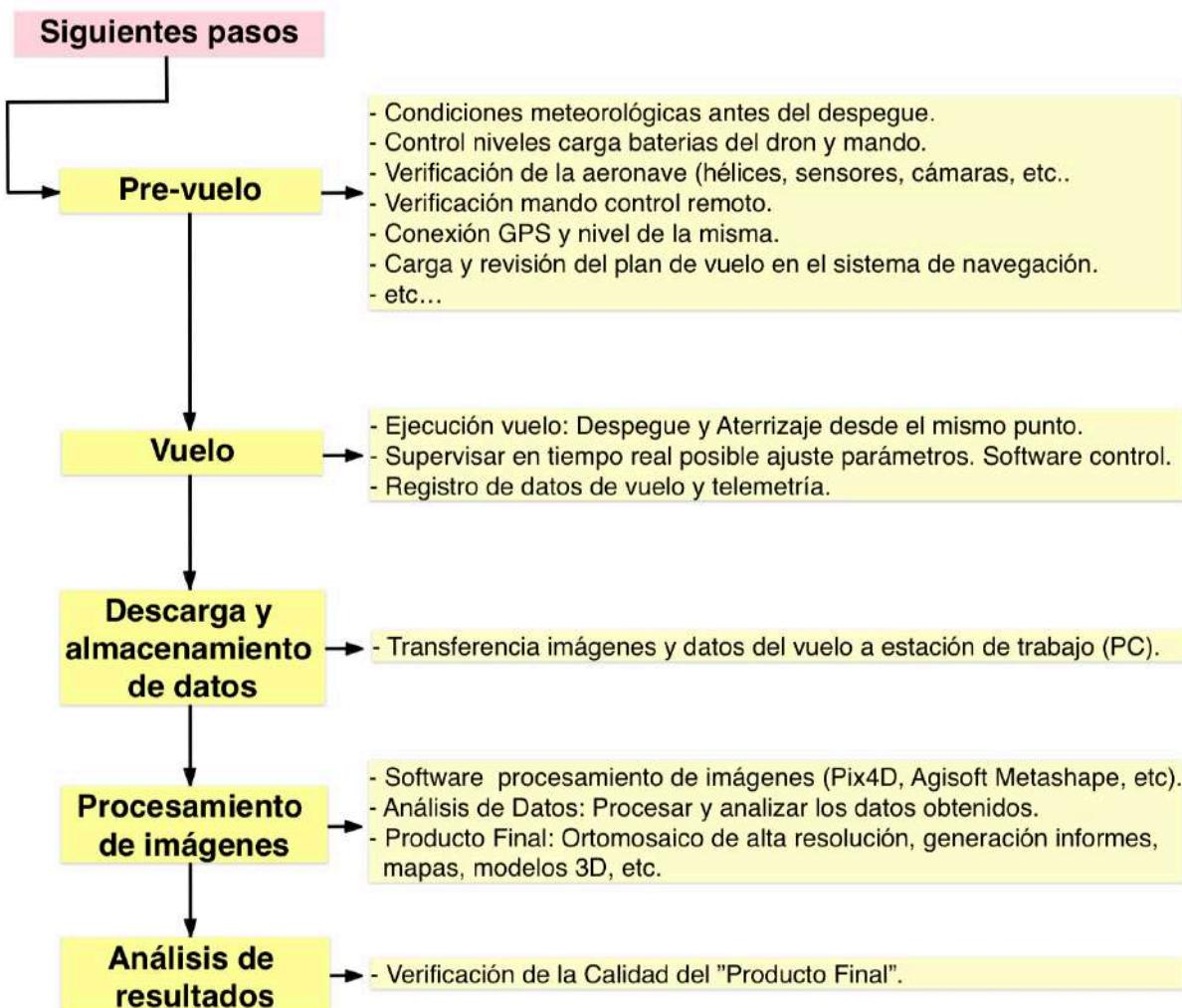


Figura 30 Diagrama de flujo 4 - Trabajo a futuro

En este apartado también contemplaremos las consideraciones pertinentes en el caso de que queramos analizar un vuelo en un terreno montañoso, es decir una superficie a fotografiar a nivel variable.

En el siguiente esquema vamos a considerar un suelo con desnivel, como sería el típico terreno montañoso. A continuación suponemos el siguiente perfil.

Nuestro dron tiene una línea de vuelo constante y esta situación nos plantea la siguiente consideración, en función del perfil orográfico y la linea de vuelo. Llamamos “Altura de vuelo” a la diferencia entre la “Línea de vuelo” y el “Suelo”.

Consideraciones:

$$\text{Altura vuelo máxima} = (H_{\max}) ; \quad \text{Altura vuelo mínimo} = (H_{\min})$$

$$(H_{\min}) \geq (H) \leq (H_{\max})$$

$$(H) = (H_{\max}) - (H_{\min})$$

En la siguiente grafica podemos ver que tenemos en azul el campo de variación de (H) dentro del entorno de la huella (L).

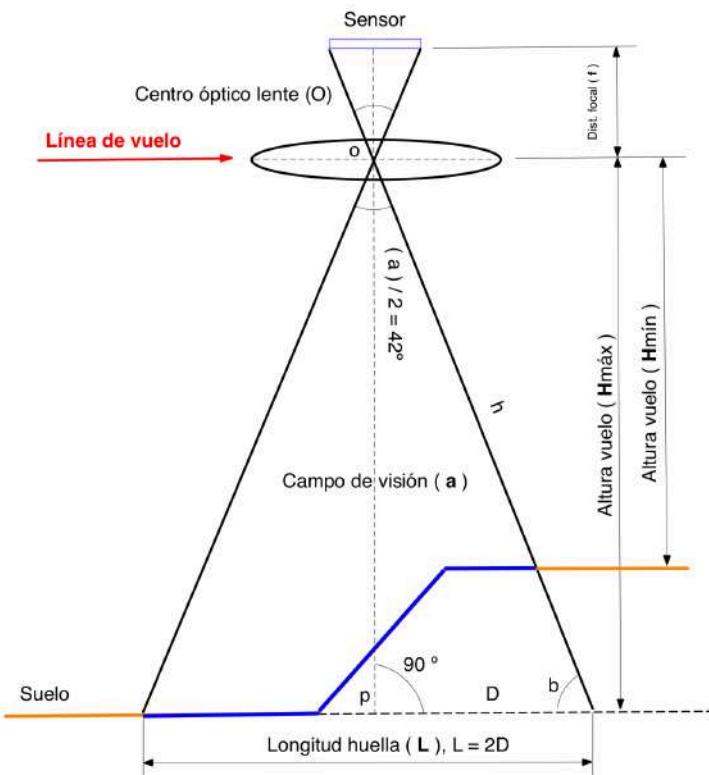


Figura 31 Superficie a nivel variable

Distancia focal (f): 24 mm

Equivalencias: 24 mm = 0,024 m

Campo de visión (a): 84°

Altura vuelo (H_{max}): 60 m

Altura vuelo (H_{min}): 40 m

Rango alturas (H): $40 < H < 60$ m

Cambio variación (H): 20 m

Escala fotográfica (E):

$$1/E = f/H ; \quad E = H/f$$

$(Emáx) = \text{Escala relativa a la altura máxima (}Hmáx\text{)}$

$(Emín) = \text{Escala relativa a la altura mínima (}Hmín\text{)}$

$(Emín) = \text{Escala relativa a la altura mínima (}Hmín\text{)}$

$$Emín = Hmín / f ; Emín = 40 / 0,024 = 1666$$

$(Emáx)$ son diferentes entre sí ($Emín$)

Esta desigualdad provocará distorsiones en la fotografía tomada, el detalle sobre el suelo (terreno) apreciado sobre la fotografía (sensor) variará según la escala considerada.

Evitar desigualdades entre las escalas, supone que el dron pueda ajustar la línea de vuelo según el perfil del terreno o suelo, de esta manera la “Altura relativa” entre el dron y el suelo se mantendrá constante. Cabe destacar que de este modo no solamente se garantiza una mejor obtención de datos cartográficos, sino también una mejor seguridad del vuelo. La reconstrucción del modelo, tras el tratamiento de las imágenes mediante el software escogido, vendrá condicionada por la ratio de solapamiento entre fotografías. En el caso del modelo escogido, DJI Mavic 3M, viene predeterminado un solapamiento longitudinal del 80% y un solapamiento transversal del 70%. Ambos pueden ser modificados por el piloto atendiendo a las características propias del proyecto. Se aconseja, que en el caso de superficies con grandes fluctuaciones o desniveles, la ratio de solapamiento sea elevada, pudiendo rebajar para el caso de superficies de trabajo planas y horizontales.

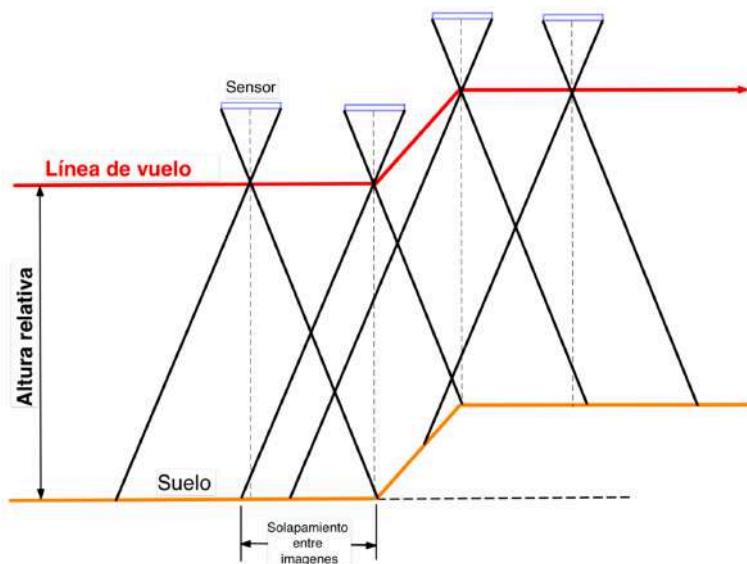


Figura 32 Solapamiento del área de imágenes en superficie variable

GLOSARIO

- **AB** = Altura del árbol desde la altura de nuestros ojos.
- **AC** = Altura total árbol.
- **ACF** = Área de Captura Fotográfica.
- **Afl** = Avance fotográfico longitudinal.
- **Aft** = Avance fotográfico transversal.
- **AOF** = Área de Objetivo Fotográfico.
- **AP** = Agricultura de Precisión.
- **EASA** = Agencia Europea de Seguridad Aérea.
- **FAO** = Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- **GNSS** = Sistema global de navegación por satélite.
- **GPS** = Sistema de Posicionamiento Global.
- **ICGC** = Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.
- **IDC** = Iberoamerican Drone Conference.
- **MP** = Megapíxel.
- **NDVI** = Índice de vegetación de diferencia normalizada.
- **nm** = Nanómetro.
- **OB** = Distancia de nuestros ojos al árbol.
- **OC** = Altura del suelo a nuestros ojos.
- **ODS** = Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- **RGB** = Rojo, verde y azul.
- **RPO** = Regreso al Punto de Origen.
- **RMVV** = Resistencia Máxima a la Velocidad del Viento.
- **RMS** = Valor medio.
- **UAV** = Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo aéreo no tripulado).

REFERENCIAS

- [1] «Ministerio de Derechos Sociales, Consumo y Agenda 2030 - Agenda 2030». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/index.htm>
- [2] «content.pdf». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/5d85a726-91df-47f2-b986-9970261a1ed4/content>
- [3] Lorena, «Los mejores drones para agricultura», IDC. Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://idc.apddrones.com/drones/los-mejores-drones-para-agricultura/>
- [4] «¿Qué es la agricultura de precisión?», eyesCloud3D. Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eyescloud3d.com/>
- [5] «AGRICULTURA DE PRECISIÓN · Un Sector Agrario del Siglo XXI». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://web.larioja.org/landing/agricultura-de-precision/>
- [6] «¿Tienes un UAS/dron? Conoce los requisitos mínimos para volar de forma segura | AESA-Agencia Estatal de Seguridad Aérea - Ministerio de Fomento». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.seguridadaerea.gob.es/es/content/tienes-un-uasdron-conoce-los-requisitos-minimos-para-volar-de-forma-segura>
- [7] «BOE.es - Búsqueda sencilla de legislación». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/legislacion.php?campo%5B2%5D=tit&dato%5B2%5D=Real%20Decreto%201036/2017&accion=Buscar&checkbox_solo_tit=S&sort_field%5B0%5D=PESO&sort_order%5B0%5D=desc
- [8] Rexct-29, «Todo lo que deberías saber antes de volar tu dron», One Air. Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.oneair.es/normativa-drones-espana-aesa/>
- [9] «Dron DJI», DJI Dron. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.djidron.com/>
- [10] «Mavic 3 Multiespectral - M3M | Dron para análisis de cultivos | ATyges ®», ATyges. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://atyges.es/tienda/dji-mavic-3m-seguro-24-meses/>

- [11] DJIdron, «Las 8 características principales del Mavic 3M», DJI Dron. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.djidron.com/drones/las-8-caracteristicas-principales-del-mavic-3m/>
- [12] «DJI_Mavic_3M_UM-es_v1.2.pdf». Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230531/DJI_Mavic_3M_UM-es_v1.2.pdf
- [13] «DJI - Página oficial», DJI Official. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dji.com/es>
- [14] Tato, «Tamaño del sensor y equivalencias», Tato Rosés. Accedido: 26 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tatoroses.eu/tamano-del-sensor-y-equivalencias/>
- [15] «Espectro visible», *Wikipedia, la encyclopédie libre*. 16 de junio de 2024. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_visible&oldid=160780650
- [16] «El Tiempo». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.es>
- [17] «Google Earth». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://earth.google.com/web/@52.71734141,-8.60428356,36.53782774a,339.36388347d,60y,-130.18048655h,50.48155636t,0r/data=OgMKATA>
- [18] AreaDron, «¿En qué consiste la navegación por waypoints para drones? -», areadron.com. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.areadron.com/en-que-consiste-la-navegacion-por-waypoints-para-drones/>
- [19] «▷ Cómo planificar el vuelo del drone: trayectoria, ángulo cámara, altura...», Aerial Insights. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.aerial-insights.co/blog/como-planificar-capturas-de-dron/>
- [20] «DJI Mavic 3M Multispectral Drone with 2 Years of DJI Care Enterprise Basic». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1742483-REG/dji_cp_en_00000444_sb2_mavic_3_multispectral_with.html
- [21] «DJI Battery Kit for Mavic 3 Enterprise». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:

https://www.bhphotovideo.com/c/product/1730103-REG/dji_cp_en_00000421_01_battery_kit_for_mavic.html

[22] «DJI Low-Noise Propellers for Mavic 3 (Pair)». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.bhphotovideo.com/c/product/1670694-REG/dji_cp_ma_00000424_01_low_noise_propellers_for_mavic.html

[23] «Neewer ND/PL Filters for DJI Mavic 3 Classic (4-Pack)». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.bhphotovideo.com/c/product/1780743-REG/neewer_66602266_4_pack_nd_pl_filters_for.html

[24] «Lowepro DroneGuard BP 250 Backpack for DJI Mavic Pro/Air Quadcopter». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.bhphotovideo.com/c/product/1319574-REG/lowepro_lp37099_droneguard_bp_250.html

[25] «SanDisk 256GB Extreme UHS-I microSDXC Memory Card with SD Adapter». Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.bhphotovideo.com/c/product/1692705-REG/sandisk_sdsqxav_256g_an6ma_256gb_extreme_uhs_i_microsd.html

[26] «Seguro para Drones - Seguros MAPFRE», MAPFRE España. Accedido: 27 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapfre.es/empresas/seguro-drones/>