

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Determinación de las condiciones de operación del drone
3DR X8+ para la toma de imágenes multiespectrales.**

Autor: Rolando Yunior Martínez Valdés

Tutor: Dr. Alain Sebastián Martínez Laguardia

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Determinación de las condiciones de operación del drone
3DR X8+ para la toma de imágenes multiespectrales.**

Autor: Rolando Yunior Martínez Valdés

Email: rmvaldes@uclv.cu

Tutor: Dr. Alain Sebastián Martínez Laguardia

Email: amguardia@uclv.edu.cu

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad”

Albert Einstein

DEDICATORIA

A la mayor muestra de sacrificio y abnegación que la vida me ha dado: mi madre, por haber tejido el camino recorrido para superar todas las pruebas que se me han presentado, desde que nací hasta llegar a este día.

A mi papá por toda su ayuda incondicional.

A mis tíos, mi fuente de inspiración.

A todos mis familiares y amigos.

AGRADECIMIENTOS

Con toda sinceridad y humildad, no soy yo sino mi corazón quien escribe:

Primeramente, agradezco a Dios que día tras día me dio la fuerza necesaria para culminar esta carrera.

A mi familia, especialmente a mi mamá y mi abuelita que, aunque hoy no está sé que este día nunca llegaría sin su apoyo incondicional, a mi papá, mis tíos Jorge y Pablo, mis primos Yadier y Ohilda, a mi tía Esther, por apoyarme en todo momento, sobretodo en este último año donde reveses quisieron importunar el término de la carrera, pero gracias a la ayuda incondicional de todos, pude sobreponerme y seguir adelante. Muchas gracias por todo.

A Dairon, por ser mi hermano durante toda la vida, por ser un excelente amigo aún en los momentos más difíciles.

A Anna por su apoyo incondicional y a Vivian por sus esfuerzos y ayuda.

A Alain por ser mi tutor y dedicar su tiempo a mi superación y a la realización de este proyecto.

A Mayelín y Roxana por los batidos sabrosos en las noches largas de estudio y sus buenos consejos.

Al negro (Ángel) y a Jorgito mis compañeros de estudios por aguatarme estos cinco años.

A los profesores del Departamento de Automática por ser las principales fuentes del conocimiento adquirido durante estos cinco años y a todos mis compañeros de aula que de una forma u otra me brindaron su apoyo.

RESUMEN

El empleo de la teledetección se encuentra condicionado por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles. Los vehículos aéreos no tripulados, UAVs, por sus siglas en inglés, permiten realizar planes de vuelo de forma autónoma y con precisión, circunstancia imprescindible para la posterior corrección geométrica de las imágenes. Así mismo, permiten embarcar diferentes tipos de sensores que cubren el amplio abanico de aplicaciones propias de la teledetección.

La Agricultura de Precisión ha tenido un desarrollo vertiginoso en el mundo en los últimos años. Entre las principales herramientas de la Teledetección que utiliza la misma está la fotogrametría multispectral donde la banda espectral NIR es la fundamental, para realizar el cálculo de índices vegetativos que permiten obtener de forma rápida y altamente fiable el vigor, el estrés por sequía, las enfermedades y la productividad de las plantaciones.

En este trabajo se muestran las principales características y aplicaciones del UAV 3DR X8+ y de la cámara multiexpectral Parrot Sequoia disponibles actualmente en el departamento de Automática de la UCLV para la toma de imágenes aéreas, así como las condiciones de vuelo del mismo una vez instalada la cámara. Además, se analizan las principales ventajas que ofrece esta nueva tecnología para la Agricultura de Precisión.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
Situación del problema	2
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Teledetección	4
1.1.1 Definición	4
1.1.2 Características de la Teledetección	5
1.2 Agricultura de Precisión.....	7
1.2.1 Países líderes en el empleo de la Agricultura de Precisión.....	8
1.2.2 Aplicaciones de la Teledetección vinculadas a la Agricultura de Precisión.....	9
1.3 Imágenes Multiespectrales	10
1.3.1 Características de las Imágenes Multiespectrales	11
1.3.2 Sistemas de captura de Imágenes Multiespectrales	14
1.3.3 Sensor para la captura de Imágenes Multiespectrales	14

1.3.4	Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV)	18
1.3.4.1	Aplicaciones de los UAV en la Teledetección.....	22
1.4	Consideraciones Finales del Capítulo	22
CAPÍTULO 2. Herramientas para la toma de imágenes multiespectrales		24
2.1	UAV 3DR X8+	24
2.1.1	Componentes del 3DR X8+	25
2.2	Sensor Multiespectral Parrot Sequoia	29
2.3	Configuración del sensor Parrot Sequoia	32
2.3.1	Montaje del sensor en el UAV	32
2.3.2	Activación de la Cámara Parrot Sequoia	33
2.4	Procedimiento general para la toma de imágenes aéreas.	34
2.4.1	Recubrimiento longitudinal y transversal en vuelos con UAVs.	34
2.4.2	Elaboración del Plan de vuelo	36
2.4.3	Tamaño pixel del suelo (GSD)	38
2.4.4	Apoyo topográfico	39
2.4.5	Chequeo previo al vuelo	39
2.4.6	Toma Fotográfica.....	41
2.5	Características de los materiales a utilizar	41
2.5.1	Software a utilizar para realizar el plan de vuelo.....	41
2.5.2	Pasos para crear el plan de vuelo	42
2.6	Toma de imágenes multiespectrales.....	45
2.7	Conclusiones Finales del Capítulo.	46
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		47
3.1	Procedimiento para la toma de las imágenes multiespectrales y su posterior procesamiento.	47

3.2	Planificación de la misión	48
3.3	Comparación entre los diferentes vuelos y análisis de los resultados.....	50
3.3.1	Índices Vegetativos.....	54
3.4	Evaluación de resultados obtenidos	57
3.5	Análisis económico y medioambiental	57
3.6	Conclusiones Finales del Capítulo	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		60
Conclusiones		60
Recomendaciones		61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		62
ANEXOS		67
Anexo I Espectro Electromagnético		67
Anexo II Reflectancia de la vegetación verde captada por el sensor Sequoia según el estado de las plantas.....		67
Anexo III Puntos de control en el campo (GCP)		68
Anexo IV Ventana de navegación del Software Mission Planner		69
Anexo V Planificación de una misión final con waypoints y activadores de cámara. ..		69

INTRODUCCIÓN

El uso y el desarrollo de tecnologías para Agricultura de Precisión son un aspecto clave para mejorar de manera acelerada la actividad agrícola en aspectos económicos y ecológicos en las regiones productivas de los países en vía de desarrollo. Una de las tendencias tecnológicas de mayor utilidad es la Teledetección a través de sensores multiespectrales aerotransportados por vehículos aéreos no tripulados. La llegada al mundo civil de los UAV, junto con los avances en el desarrollo de microsensores, posibilita un nuevo concepto de Teledetección de Alta Resolución donde se pueden superar ciertas limitaciones en los tres niveles de resolución (espacial, espectral y temporal), siendo además una solución económicamente viable en superficies de área menor que una foto satelital. Los UAV se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y Agricultura de Precisión. Esto ha llevado a investigadores de múltiples disciplinas a buscar diferentes formas de incorporar las nuevas tecnologías en los sistemas agronómicos, existiendo hoy en día una necesidad fundamental de técnicas precisas y eficientes en la agricultura, que permitan a los agricultores con un gasto mínimo de insumos alcanzar una alta producción.

En Cuba, el desarrollo de los UAVs es escaso, no obstante, dadas sus variadas aplicaciones, algunas instituciones como GEOCUBA (facultada para la elaboración de mapas de relieve), CEMPALAB (encargada de la investigación en agricultura de precisión), y las FAR (para tareas de vigilancia y rescate), han mostrado interés en estos vehículos. Las universidades no han estado distantes de estos intereses y han venido desarrollando investigaciones en el campo del desarrollo y explotación de los UAV. En el caso particular de la UCLV la misma está trabajando en el tema desde el 2003, año en el que mediante un proyecto de

colaboración entre el Departamento de Automática y la Universidad Politécnica de Madrid se trabajó en el desarrollo de la arquitectura de hardware y software de un UAV. Desde esa fecha y hasta el presente se han desarrollado varios UAV, empleando vehículos de ala fija y de ala rotativa, lográndose un amplio dominio de la tecnología y su desarrollo basado en hardware y software abierto. En la actualidad las investigaciones del departamento y en particular las del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) se dirigen al campo de las aplicaciones de los UAV en las tareas antes mencionadas de: supervisión, mapeo y Agricultura de Precisión. Para este fin se han instalado en los UAV que se han adquirido, múltiples sensores capaces de adquirir información en distintas bandas del espectro (RGB, NIR, IR). Uno de los sensores más novedosos adquiridos por GARP es la cámara multispectral Parrot Sequoia. La misma permite la adquisición simultánea de 4 bandas de color con el mayor valor para los procesos agrícolas y una imagen RGB. No obstante, dada su novedad en el mercado aún no están claras las condiciones más adecuadas para su explotación en un ambiente real. Es por esto que se lanza esta investigación para determinar las condiciones de operación que deben seguir los UAV de GARP en el proceso de adquisición de las imágenes.

La determinación de las condiciones de explotación de los UAV y de parametrización de la cámara permitirán su uso en un mayor número de aplicaciones con mayores posibilidades de éxito, disminuyendo el número de horas voladas para obtener un resultado.

Situación del problema

El problema científico se enfoca entonces en: ¿Cómo obtener una buena toma de imágenes multispectrales a partir de la determinación de las condiciones de vuelo óptimas del UAV 3DR X8+?

Como hipótesis se plantea que mediante la determinación de las condiciones de vuelo óptimas del UAV 3DR X8+ se podrá realizar una buena adquisición de imágenes multispectrales con la cámara Parrot Sequoia.

Objetivos

Objetivo general:

- Evaluar las condiciones de vuelo del 3DR X8+ una vez insertada la cámara multiespectral disponible para la toma de imágenes.

Objetivos específicos:

- Analizar las tendencias mundiales utilizadas para los UAVs relacionadas con la Teledetección.
- Diseñar la interconexión del UAV 3DR X8+ con la cámara Parrot Sequoia.
- Determinar las condiciones de vuelo del UAV 3DR X8+ y la configuración de la cámara Parrot Sequoia para la toma de imágenes aéreas con vista al procesamiento de las mismas y la obtención de diferentes índices de interés agrícola.
- Comprobar mediante evaluaciones experimentales la generación de los ortomosaicos multiespectrales y RGB a partir de las imágenes adquiridas con la cámara Parrot Sequoia.

Organización del informe

El informe está dividido en: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos. Los capítulos están organizados de la siguiente manera:

Capítulo I: Se realiza un análisis de la literatura consultada. Se presentan las principales metodologías que constituyen el eje de esta investigación, introduciendo los temas relacionados. Se plantea la panorámica general existente en torno al problema que se aborda y un estudio de las estrategias que se usan en la actualidad para darle solución.

Capítulo II: Se describen los materiales a emplear en este proyecto. Se analizan las condiciones de vuelo del UAV 3DR X8+ una vez insertada la cámara multiespectral disponible.

Capítulo III: Validación experimental.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan varios tópicos en los cuales se realiza un estudio sobre la Teledetección, sus características y aplicaciones en la actualidad. Son descritas las características de algunas cámaras multispectrales disponibles actualmente en el mercado. Se exponen características de las imágenes multispectrales, se describen las herramientas necesarias para la adquisición de estas imágenes desde un avión de pequeño porte (UAV), así como las características de dicha plataforma y sus aplicaciones generales vinculadas a la Agricultura de Precisión.

1.1 Teledetección

1.1.1 Definición

La teledetección o percepción remota (en inglés Remote Sensing) es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías empleadas en la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios (Hernandez, 2013, García, 2015).

La etimología de la palabra refiere a la adquisición de información sobre un objeto o fenómeno sin hacer contacto físico con el mismo. En el uso moderno, el término generalmente se refiere a la utilización de tecnologías de sensores montados en plataformas espaciales o aéreas que detectan y/o clasifican fenómenos en la Tierra por medio de ondas electromagnéticas propagadas (ej: luz visible, infrarrojo, etc.)(Berra et al., 2015).

Los orígenes históricos de esta disciplina se hallan íntimamente vinculados al desarrollo tanto de la tecnología fotográfica como de la aviación y de la industria aeroespacial. Desde las primeras fotografías aéreas tomadas desde un globo aerostático por el aeronauta Gaspar

Tournachon sobre la ciudad de París en 1858 (Zhang and Kovacs, 2012), fue en las Guerras Mundiales del siglo XX donde la disciplina se sistematiza y consolida a partir del uso militar de la fotografía aérea (Arcos, 2013), lo que a su vez luego da impulso al uso de la misma con fines cartográficos y/o topográficos (ortofotografía, fotogrametría, etc.).

Desde comienzos del tercer tercio de aquel siglo, el sensoramiento remoto vuelca su desarrollo disciplinar hacia la utilización de plataformas satelitales. Surge así la Teledetección Espacial (Hernandez, 2013), que aprovecha el desarrollo de la informática que ocurría en paralelo para ofrecer un sinnúmero de opciones de manejo, procesamiento y modelización de la información en formato digital captada por los sensores remotos espaciales. Como hito temporal merece destacarse el 23 de julio de 1972, fecha de lanzamiento del primer satélite de la serie Landsat, destinados a la observación terrestre y a la evaluación de los recursos naturales (CAMILLI, 2015).

Sobre la base del desarrollo tecnológico acumulado en esta disciplina, la primera década del siglo XXI trajo consigo la disponibilidad de Vehículos Aéreos No Tripulados, UAVs (Unmanned Aerial Vehicle), popularmente conocidos como “drones” (Kemerer, 2007). Si bien el término “drone” originalmente hacía referencia a los UAVs militares, se ha extendido a cualquier tipología de aparato aéreo no tripulado, sea enteramente automático o piloteado por radio-control.

Según investigaciones hechas (Hernandez, 2013), tanto a nivel experimental como operativo, dentro del ámbito civil la Teledetección ya se emplean en múltiples actividades como:

- Inspección y monitoreo de instalaciones y obras de infraestructura
- Investigaciones atmosféricas
- Topografía y cartografía temática

1.1.2 Características de la Teledetección

La teledetección se basa en la captación mediante un sensor de la radiación electromagnética que procede de la superficie terrestre. La característica primaria de estas ondas en su descripción cuántica es la energía (E), la cual se relaciona con su frecuencia

(f) mediante la constante de Planck (h), donde $E = h \cdot f$. De esta forma, la longitud de onda de la radiación (λ) es un parámetro relativo a la velocidad de la onda por un medio (c), ya que $c = \lambda \cdot f$. La radiación electromagnética puede describirse como un haz ondulatorio armónico y continuo (BASTERRA, 2011). La misma puede caracterizarse a partir de dos elementos:

- la frecuencia (f = número de veces que un ciclo pasa por un punto determinado).
- la longitud de onda (λ) que indica la distancia entre dos picos sucesivos de una onda.

Todo objeto con temperatura superior al cero absoluto, radia energía cuanto mayor sea su temperatura. Al aumentar la temperatura, esa radiación será más intensa en longitudes de onda más corta (Berra et al., 2015). Cualquier tipo de energía radiante puede caracterizarse por su longitud de onda o frecuencia. Las distintas longitudes de onda se agrupan normalmente para su estudio en bandas continuas, en las que la radiación posee un comportamiento similar. Recibe el nombre de espectro electromagnético el conjunto de estas bandas o tipos de radiación como se muestra en el Anexo I, según su longitud de onda (Hernandez, 2013).

El espectro incluye desde las longitudes de onda ínfimas (rayos X y Gamma), hasta aquellas usadas en telecomunicaciones, con longitudes de onda mucho mayores. Según (Jeunnette and Hart, 2016), la unidad en que aparecen expresadas las longitudes de onda según el SIU es el μm .

Entre las distintas bandas del espectro electromagnético, solo un restringido rango puede usarse en la Teledetección. Esto se debe principalmente al efecto absorbente de la atmósfera, que filtra cierto tipo de radiaciones. Pueden resumirse en las siguientes (Villar, 2015):

- Espectro visible: ocupa la banda entre $0,4 \mu\text{m}$ y $0,7 \mu\text{m}$ y su denominación se debe a que es la única radiación que puede captar el ojo humano. Dentro del espectro

visible podemos distinguir tres bandas espectrales correspondientes a los tres colores básicos: azul, verde y rojo.

- Infrarrojo próximo: se extiende desde 0,7 μm a 1,3 μm . En la Teledetección se utiliza para la observación del estado de la vegetación y de concentraciones de humedad.
- Infrarrojo lejano o térmico: entre 10 μm y 12,5 μm . Puede detectar procesos de transferencia de calor, ya que en esta banda se sitúa la máxima emitancia para las temperaturas habituales de la superficie terrestre. En consecuencia, en esta banda se observa la energía que emiten los objetos, y no la que reflejan de la luz solar, por lo que es posible utilizar esta banda en observaciones nocturnas.
- Microondas: comprende las longitudes de onda mayores de 1mm. El interés de esta banda es que resulta prácticamente transparente a la cubierta nubosa, lo que la hace idónea para el estudio donde las nubes se dan de manera casi permanente (por ejemplo, las zonas tropicales). Esta región del espectro puede utilizarse también sin luz solar.

La teledetección en términos generales, engloba no solo los procesos que permiten obtener la imagen, sino su posterior tratamiento, en el contexto de una aplicación específica.

1.2 Agricultura de Precisión

El concepto general de la Agricultura de Precisión consiste en el manejo y administración del suelo y los cultivos mediante el monitoreo georreferenciado de variables que influyen en el desarrollo adecuado de las plantas y el rendimiento de la cosecha, la interpretación de los datos adquiridos, la aplicación de insumos agrícolas en cantidades variables de manera geolocalizada, y la retroalimentación de la información para comenzar con el siguiente ciclo de cultivo y optimizar progresivamente el proceso (Zhang and Kovacs, 2012).

La Agricultura de Precisión basa su propósito en tener en cuenta la variabilidad espacial y temporal dentro del terreno de cultivo para decidir sobre el momento, la localización, la cantidad necesaria y el tipo de insumo que hay que administrar, minimizando costos, impacto al medio ambiente y maximizando la producción (Best, 2012).

Siendo los objetivos fundamentales de la Agricultura de Precisión:

- Mejorar la producción de la agricultura tanto en calidad como cantidad.
- Reducir el uso de insumos.
- Reducir el impacto ambiental (menos pesticidas).
- Aumentar la rentabilidad de la agricultura.

Para esto se requiere del uso de tecnologías vigentes tales como: Sistema de Posicionamiento Global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con un Sistema de Información Geográfico para estimar, evaluar y entender dichas variaciones (Díaz, 2013, Jiménez, 2016). El término Agricultura de Precisión hace referencia al manejo de las superficies agrícolas de forma individualizada y específica (Rivera, 2014). En pocas palabras es hacer lo correcto en el lugar adecuado y en el momento preciso, de forma automática, utilizando sensores, ordenadores y otros equipos electrónicos.

1.2.1 Países líderes en el empleo de la Agricultura de Precisión

Las investigaciones en Agricultura de Precisión comenzaron en Estados Unidos., Canadá, Australia y Europa Occidental a mediados de los '80 (CAMILLI, 2015). La Agricultura de Precisión se implementó principalmente adaptando la maquinaria existente, mediante el anexo de controladores y GPS que permiten realizar tareas de Dosificación Variable (DV). Hoy en día, la DV sigue siendo la tarea líder en lo referido a Agricultura de Precisión, principalmente para la aplicación de fertilizantes (Jeunnette and Hart, 2016).

Actualmente se pueden encontrar experiencias relacionadas con la Agricultura de Precisión en China, Corea, Indonesia, Sri Lanka, Turquía, Arabia Saudita, Australia, Brasil, Argentina, Chile, Uruguay, Rusia, Italia, Los Países Bajos, Alemania, Francia, Reino Unido, Estados Unidos y Canadá (Lasso Garzón, 2015, Läderach, 2015).

Los países de Estados Unidos, Canadá y Australia marcan la avanzada en el uso de esta técnica. Según una encuesta realizada en los Estados Unidos en el año 2014, la adopción de imágenes satelitales y fotografías aéreas en la Agricultura de Precisión aumentó de un 16,1 % a un 30,3 % entre el año 2004 y el 2014. Entre el 2004 y el 2014, la tasa de adopción aumentó constantemente de un 61,1 % a un 78,6 %. El conocimiento de los productores sobre la variación en sus campos también es un factor importante que influye tanto en la percepción como en la adopción de las tecnologías de la Agricultura de Precisión. Se observó que aquellas personas que tienen más conocimiento sobre la variación espacial en

las propiedades del suelo de las tierras arrendadas tenían más posibilidades de reconocer y adoptar la tecnología de Agricultura de Precisión (Basso, 2014).

1.2.2 Aplicaciones de la Teledetección vinculadas a la Agricultura de Precisión

A modo no exhaustivo, es posible realizar un listado de las aplicaciones concretas que tiene y/o puede tener el uso de la Teledetección en el contexto de la Agricultura de Precisión:

- **Controles directos en cultivos:** A efectos del control de subvenciones y/o créditos agrarios, o para el monitoreo y gerenciamiento ajustado en empresas rurales que se hallan dispersas geográficamente (Arcos, 2013).
- **Detección de stress hídrico en cultivos:** Válido en esquemas de secano para realizar ajustes prospectivos de rendimientos físicos esperados, como también para el control de la calidad y/o cantidad de aplicación de riego (Basso, 2014).
- **Monitoreo y detección ajustada de enfermedades, malezas y plagas insectiles:** En este aspecto el empleo de drones promete incidir decisivamente en esta tarea, que se torna crítica e intensa en determinados momentos del año. El uso de drones permitiría controlar una mayor superficie de cultivos con similar cantidad de personal (Best, 2012).
- **Índices relativos a calidad en cultivos y estimación de rendimientos:** Por ejemplo, a partir del análisis multiespectral y el empleo de distintos índices de vegetación, es posible estimar contenidos de proteína en cultivos, así como otros parámetros cualitativos similares (Diaz, 2013).
- **Relevamiento e inventario de áreas de cultivos:** Si bien la capacidad de relevamiento diario de un drone en términos de ha/día puede ser acotada, el uso de artefactos de mayor porte y/o a mayores altitudes permite ampliar el tamaño de la faja de terreno relevada. Lo anterior junto con la capacidad de operar todo el tiempo (también en días nublados), hace que sean adecuados para realizar inventarios, mucho más si se trata de cultivos semi-extensivos o intensivos (Diaz, 2013).
- **Supervisión de áreas tratadas con productos fitosanitarios:** el drone puede entrar al cultivo que ha sido recientemente pulverizado y verificar si el control de las plagas ha sido adecuado, sin riesgos para la salud de ninguna persona (García, 2015).

1.3 Imágenes Multiespectrales

Dentro de las tecnologías de percepción remota para la Teledetección existe la obtención de imágenes multiespectrales de terrenos, el suelo y de la cobertura en las áreas cultivadas.

La obtención y procesamiento de estas imágenes se realiza a través de un sistema de teledetección, el cual está compuesto de una fuente de energía electromagnética (sol o iluminación artificial), la cubierta terrestre (suelo y cultivo), el sistema sensor, ya sea satelital, terrestre o aerotransportado, el sistema de recepción (si las imágenes han de transmitirse en tiempo real o desde plataformas satelitales), y finalmente el sistema de tratamiento digital y análisis, que permite interpretar y dar significado informativo a los datos obtenidos (Rivera, 2014).

Según investigaciones hechas (Arcos, 2013), la captura de estas imágenes se realiza simultáneamente en varios rangos del espectro electromagnético llamados bandas, y la necesidad de su adquisición radica en las propiedades espectrales (reflectancia, transmitancia y absorbancia, entre otras) del suelo y de las plantas en sus diferentes etapas de desarrollo, las cuales van ligadas estrechamente a factores como actividad fotosintética, cantidad de agua, clorofila, biomasa, entre otros.

La obtención de estas imágenes han sido utilizadas con éxito en Agricultura de Precisión, ejemplo de ello es su análisis para estimar contenido de carotenoides en hojas de viñedos (Suarez et al., 2009), su utilización para determinar estrés hídrico en las plantas (Emekli et al., 2007a), y la generación de modelos de superficie para estimación de rendimiento en cultivos de maíz por ejemplo (J.Baker et al., 2003).

Las coberturas de interés en agricultura cuentan con unas firmas espectrales típicas, las cuales son curvas de reflectividad espectral que se encuentran en los rangos de longitudes de onda del espectro de la luz visible (~400nm a ~700nm) y el infrarrojo cercano, medio y térmico (~700nm a ~1400nm). En el caso de las coberturas vegetales, las diferencias entre las firmas espectrales de la vegetación sana y estresada son notables y su análisis cuantitativo es posible mediante diversas técnicas como el cálculo de índices vegetativos. Como resultado de estos análisis se hace posible la realización de diagnósticos en variables claves tales como productividad (Taule et al., 2012).

1.3.1 Características de las Imágenes Multiespectrales

La Teledetección a partir de sensores montados en drones presenta varias ventajas respecto a la fotografía aérea convencional, e incluso frente a las imágenes captadas desde plataformas satelitales en aplicaciones agrícolas que requieran escalas de detalle; pero no así para estudios zonales o regionales. Estas ventajas se circunscriben a tres aspectos fundamentales:

- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Frecuencia de cobertura.

La resolución espacial se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen producida por un sensor remoto (García and Herrera, 2015). Si las imágenes remotas van a ser usadas para identificar y tratar problemas de cultivo en el campo, el productor debe considerar como de afinada debe ser una imagen para que le permita discernir qué es lo que está pasando en el lote.

Las imágenes aéreas procedentes de aviones tripulados convencionales pueden llegar a alcanzar resoluciones submétricas (25 cm x pixel) que han permitido mapear las infestaciones de diversas malas hierbas en estado fenológico de floración en cultivos de girasol por ejemplo (Granados, 2010, M. et al., 2014). Sin embargo, las imágenes multiespectrales proveniente de satélites de mayor resolución espacial son la de los satélites Geo-Eyes (1.64 m / Pixel) y Quickbird (2.4 m / Pixel) (Granado, 2011).

Respecto a la resolución espacial, los sistemas satelitales que ofrecen mejores niveles de detalle (Ikonos, Quickbird, Worldview, etc) presentan en sus cámaras multiespectrales tamaños de píxel mayores al metro; las resoluciones submétricas se verifican en sus cámaras pancromáticas (M. et al., 2014). En el caso de que se requiera mayores resoluciones espaciales para discriminar, por ejemplo, las infestaciones de malas hierbas en estado fenológico temprano, es decir cuando presentan entre 2 y 6 pares de hojas, la resolución espacial requerida es mucho mayor (1-6 cm/ pixel) se hace necesaria la utilización de UAV para estos objetivos (Nebiker et al., 2016, García, 2015).

De igual manera, la necesidad de una resolución espacial alta también ocurre cuando se trata de cartografiar el estado hídrico de árboles frutales mediante imágenes con rango espectral térmico (8-12 μm), en los que hay que identificar las coronas puras de un gran número de árboles y separar los píxeles de vegetación de los del suelo desnudo (Garcia, 2015).

La resolución espectral se refiere a la habilidad de los sistemas de percepción de distinguir y diferenciar entre radiaciones electromagnéticas de distintas longitudes de onda, siendo básicamente, número y anchura de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor (J.Baker et al., 2003), a mayor resolución espectral, más útil será la información que pueda ser deducida, en cuanto a resoluciones espectrales podemos distinguir entre imágenes(Lasso Garzón, 2015):

- Multiespectrales: Que generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas de unos 100 nm de ancho.
- Hiperspectrales: Que adquieren información en varias decenas o centenas de bandas estrechas con longitud de ondas inferior a 5 nm de ancho.

En cuanto a la frecuencia de cobertura (a veces llamada resolución temporal), es una medida acerca de cada cuanto tiempo, está disponible un sistema de percepción remota, para recoger información de un punto específico en la tierra (Garcia, 2015). Para la mayoría de los satélites, la frecuencia de cobertura para cualquier sitio particular es igual al ciclo de repetición, o la duración en tiempo que le toma dar la vuelta a la tierra(Turner et al., 2012).

En la figura 1-1 se muestra con la mayor resolución espacial la distribución de objetos en el suelo de la imagen tomada desde diferentes plataformas aéreas.

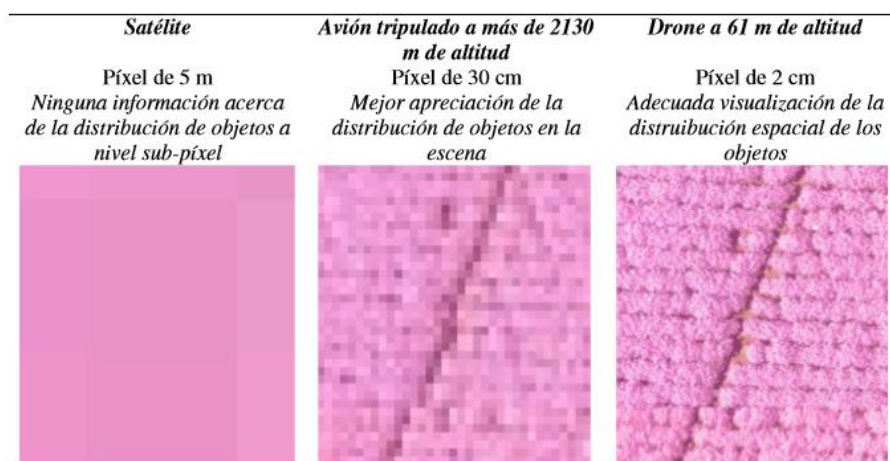


Figura 1-1: Comparación de la resolución espacial según altitud de vuelo, (Jeunnette and Hart, 2016).

La fotografía aérea convencional puede ofrecer resoluciones espaciales aproximadas a las de los drones, pero con costos operativos sustancialmente mayores y mucha menor flexibilidad en la planificación del trabajo. En cuanto al costo, cabe considerar que solo las misiones satelitales con resoluciones espaciales medias (del orden de los 30 m, ej. Landsat 8) son gratuitas; a partir de este umbral aumenta la cantidad de misiones satelitales privadas, cuyas imágenes son costosas (Leo and C., 2015). Como se muestra en la Tabla 1-1 según investigaciones hechas (Turner et al., 2014, Mulla, 2013), se revisaron diferentes plataformas y concluyeron que la información en imágenes con una elevada resolución espacial, actualmente solo se consigue mediante la utilización de cámaras instaladas en UAV.

Tabal 1-1: Resolución espacial típica de plataformas aéreas a diferentes alturas de vuelo.

Plataformas con sensores remotos	Resolución espacial típica (longitud x pixel)	Altura de vuelo
Satélite	2-15 m	10-15 km
Avión tripulado	0.2-2 m	2-5 km
UAV	1-20 cm	30-500 m

1.3.2 Sistemas de captura de Imágenes Multiespectrales

Los sistemas de adquisición de imágenes (Best, 2012, Z, 2008) son tecnologías que se han venido evaluando en la Agricultura de Precisión, los cuales consisten en el registro de la interacción entre la radiación electromagnética del sol y las coberturas vegetales, e implican el análisis y procesamiento de las características de la imagen obtenida como lo son su reflectancia en distintas bandas espectrales, la forma y las dimensiones de los objetos. Algunas aplicaciones de estos sistemas son la cartografía y evaluación de áreas cultivadas, detección de zonas afectadas y análisis de suelos.

Estos sistemas se componen básicamente del sensor y la plataforma que lo transporta (García, 2015). Las características de resolución espacial, radiométrica, temporal y espectral de las imágenes capturadas dependen de las características técnicas y operacionales de estas partes.

1.3.3 Sensor para la captura de Imágenes Multiespectrales

La captura de imágenes multiespectrales se ha visto beneficiada por los sistemas de adquisición de productos espaciales y la búsqueda y evolución de sensores de imagen que permitan una aproximación a los productos generados por plataformas satelitales, lo que ha llevado a la adopción, modificación y creación de plataformas que se integran de manera funcional a vehículos autónomos no tripulados, permitiendo la captura de imágenes por demanda. Esta búsqueda se refleja en el uso de cámaras comerciales de consumo para realizar mapeo aerofotogramétrico (Brucas et al., 2013), la aparición y caracterización de cámaras de consumo modificadas para incluir la captura de imágenes en la banda del infrarrojo cercano (Berra et al., 2015) y el desarrollo, prueba y evaluación de nuevas cámaras multi e hiperespectrales (Proctor and He, 2015) embarcadas en UAVs.

En la actualidad se ha conseguido desarrollar sensores multiespectrales miniaturizados que pueden ser embarcados en UAV, estos sensores pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Por regla general, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación, por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia (Z, 2008, Emekli et al., 2007b).

El sensor de imagen puede ser diferenciado con base a la altura de vuelo de la plataforma, la frecuencia de rendimiento mínimo para formación de imágenes secuenciales y la resolución espacial, factores que afectan el valor x píxel de la zona y por tanto establecen las limitantes técnicas específicas de cada sistema, como lo establecen D. J. Mulla (Mulla, 2013) y J. Torres (Torres et al., 2013). La descripción de sistemas de captura de imagen, la resolución de problemas relacionados con su uso y el procesamiento de las imágenes para la generación de productos espaciales es el objeto de estudio de la fotogrametría digital, área de la ciencia que surgió desde el análisis de imágenes aéreas y satelitales con el fin de obtener la capacidad de modelar espacialmente un objeto (en este caso, el suelo) y poder así emplear este modelo para diferentes aplicaciones.

La variedad de sistemas de captura de imágenes (plataformas y sensores) permiten realizar mediciones de alta resolución temporal de manera más económica, lo cual ha facilitado realizar análisis de coberturas del suelo en intervalos de tiempo cada vez más pequeños (Torres et al., 2013), lo que a su vez ha permitido introducir la tecnología en áreas del conocimiento y actividades donde la cartografía de áreas de mediana extensión sirve como herramienta valiosa para la toma de decisiones, ofreciendo ventajas en la administración de cultivos en zonas de difícil acceso.

Para este proyecto la cámara debe ser capaz de capturar las bandas RGB, NIR e IR del espectro o sea debe tener características multispectrales, las cuáles se pueden lograr si la cámara posee un sensor multispectral o se le acopla un filtro en la lente según la banda del espectro que se necesite capturar y debe tener un peso ligero debido a que el UAV posee una capacidad de carga útil muy limitada (Jiménez, 2016). En el mercado existen disímiles cámaras de distintos fabricantes entre las cuales existe una gran variabilidad en cuanto a prestaciones y precios.

Actualmente existen en el mercado varias cámaras multispectrales diseñadas para uso específico en agricultura y monitoreo vegetal con UAVs; el esquema general de tales cámaras consiste en la construcción de arreglos de sensores con tantas cámaras como bandas espectrales se requieran; la inclusión de un sensor por banda espectral evita traslapes al hacer uso de filtros que restringen las longitudes de onda lo más parecido

posible a las de las bandas de plataformas satelitales de adquisición de imágenes multiespectrales (M. et al., 2014).

La compañía Tetracam es una de las más destacadas en este sector, desarrollando varios modelos de cámaras entre los que se destaca la **Tetracam ADC Micro**, la cual es la más pequeña de sus productos (90g) calificando como una solución ideal para aplicaciones en las que el peso es un factor crítico. La misma contiene un sensor de 3,2 Mpx, optimizado para la captura de longitudes de onda de luz visible mayores a 520 nm y de infrarrojo cercano hasta 920 nm, 2 GB de almacenamiento estándar (ampliable a 8 GB) y el formato en el que guarda las imágenes es RAW, realiza procesamiento paralelo rápido y mantiene un consumo ultra bajo de energía (160 mA) con un costo general de 2995 USD (Tetracam(2017a)).

La **Tetracam MCA Mini** se presenta como una opción de más prestaciones, la cual posee un sistema de filtrado avanzado conteniendo opciones de 4, 6 o 12 sensores multiespectrales opcionales convirtiéndose en un espectroscopio configurable capaz de detectar los diversos estados de salud o distintas etapas de crecimiento en la vegetación. Cada sensor posee un filtro de banda espectral específico que se inserta entre el lente y el sensor. Una limitación del mismo es su alto costo que varía de 10000 a 30000 USD según la cantidad de sensores (Tetracam(2017b)), mantiene un consumo de 1 A.

La cámara francesa **MultiSPEC 4C** es una opción desarrollada por los expertos en agronomía de Airinov y personalizada por eBee Ag de SenseFly. La misma contiene 4 sensores separados de 1.2 Mpx los cuales proveen datos de imágenes en 4 bandas específicas (Verde (550 nm), Roja (660nm), Borde Rojo (735 nm) y NIR (790 nm)), y guarda las imágenes en formato RAW, posee un sensor de irradiación superior para compensar las variaciones de la luz solar en las fotos y un peso de 160g ideal para UAV. Además, con una lente de ángulo ancho permite una alta velocidad de mapeo gracias al gran solapamiento entre las fotos. Entre sus aplicaciones fundamentales están la detección de LAI, biomasa y fenología entre otros, con un costo de alrededor de 11000USD. Este precio la convierte en un producto de difícil adquisición (multiSPEC.(2016)).

Las cámaras para vegetación de **SenseFly** tienen un alto prestigio en el mercado siendo la **S110** una buena opción pues con un sensor de 12 Mpx capta las bandas azul, verde, roja y

NIR hasta 1100 nm según el modelo, y es soportada de forma completa por el software de eBee. La misma no es más que una cámara Canon modificada para la toma de fotos con drones por la compañía SenseFly con un costo de 1400 USD (senseFLy, 2014).(MicaSenseRedEdge, 2017)

La **MicaSense RedEdge™** es una cámara avanzada, ligera, multiespectral, optimizada para su uso en pequeños sistemas de aeronaves no tripulados con 150 g de peso solamente, y disponible para su uso en aviones tripulados también. La misma está diseñada fundamentalmente para proporcionar datos precisos en las bandas espectrales azul, verde, rojo, borde rojo y NIR simultáneamente para aplicaciones de teledetección agrícolas. La misma tiene un costo de 6400 USD siendo uno de los mejores sensores disponibles en el mercado, aunque su precio es elevado y un consumo de 800 mA (MicaSenseRedEdge, 2017).

Parrot Sequoia es un sensor muy potente y muy compacto. Con un peso de solo 107 gramos, este sensor tiene 4 filtros para analizar nutrientes y biomasa de los cultivos, y además cuenta con una cámara RGB de 16 Mpx para generar mapas con alto detalle, ideal para conteo de plantas recién nacidas. El mismo cuenta con 64 GB de memoria incluida, GPS e IMU integrada, permitiendo con su integración con Pix4d, realizar con una elevada optimización el procesamiento de las imágenes capturadas para generar mapas aéreos de los campos. Consume menos de 1A y cuenta además con un sensor que capta la luz incidente, igual a la MicaSense, gracias a este sensor que guarda las condiciones de iluminación y calibra los 4 sensores multiespectrales, se pueden obtener índices de vegetación precisos y guarda las imágenes en formato TIFF. Además, el mismo posee un precio altamente competitivo de 3500 USD, lo que lo hace el sensor de mejor relación calidad precio hallado en el mercado para realizar de manera satisfactoria la captura de imágenes multiespectrales (2016).

Actualmente para este proyecto se cuenta con la cámara multiespectral Parrot Sequoia, adquirida por el GARP formando parte de un proyecto Norte-Sur-Sur (NSS) con la Universidad de Leuven (Bélgica).

1.3.4 Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV)

Desde la invención del globo aerostático tripulado se reconoció la importancia de la observación de la tierra desde puntos elevados, mientras que la fotografía hizo su aporte permitiendo el registro de estas imágenes. Gracias al desarrollo de la industria aeronáutica y aeroespacial se ha permitido aumentar la versatilidad y alcance de los vehículos que llevan los sensores; los satélites y los vehículos aéreos son tradicionalmente las principales plataformas que han venido siendo usadas con el fin de obtener imágenes para la adquisición de datos globales de gran escala (Rivera, 2014), transportando dispositivos de captura de imagen como sensores de barrido y cámaras multiespectrales.

Anteriormente, la teledetección aérea se realizaba principalmente con el uso de aeronaves pilotadas y sensores satelitales (Basso, 2014), sin embargo, en los últimos años se han ido reemplazando por vehículos aéreos no tripulados (UAV), que son aviones dirigidos por control remoto desde una estación terrestre y con ciertos niveles de autonomía en el vuelo.

El monitoreo de los cultivos a partir de la recolección de datos de imagen se ha realizado utilizando sensores aerotransportados mediante plataformas tripuladas y no tripuladas (J.Baker et al., 2003), presentando ventajas frente al uso de imágenes satelitales, ya que estas no cuentan con la resolución espacial y temporal que requiere el monitoreo de un cultivo, además de ser susceptible la inutilidad de los datos debido a factores atmosféricos como la presencia de nubes, que imposibilitan la observación de la cobertura a nivel del suelo. Las imágenes capturadas desde plataformas aéreas suplen las necesidades de obtención inmediata y por demanda de imágenes con características superiores a las satelitales.

Los UAV suelen ser de bajo costo, peso ligero y baja velocidad de vuelo siendo muy adecuados para la recopilación de datos de teledetección.

Actualmente existen en el mercado sistemas de navegación que incorporan dispositivos microelectromecánicos, sensores inerciales, sistemas de posicionamiento global, barómetros, control de alcance extendido más allá de la visión del operador y la programación de misiones de vuelo autónomo. Con el uso integrado de estas tecnologías de precio asequible se permite replantear el alcance de los aeromodelos como se indica en (Rivera, 2014) migrando hacia los UAV, cuyos esquemas físicos de construcción (Lasso

Garzón, 2015) se han optimizado para obtener tiempos de vuelo y capacidades de carga superiores manteniendo un tamaño pequeño, permitiendo el transporte de dispositivos de captura de imagen útiles en agricultura, entre otras aplicaciones en el campo de defensa y seguridad (Turner et al., 2014), usos civiles y medio ambiente como monitoreo de erosión del suelo [19], morfodinámica de cauces (Zhang and Kovacs, 2012) y mapeo rápido de zonas afectadas por desastres naturales (Martín, 2016); todas estas aplicaciones convergen en la generación de datos georreferenciados para monitoreo (Nebiker et al., 2016).

En la actualidad, existen dos grandes plataformas para vehículos aéreos no tripulados, el tipo “Ala fija” y el tipo “Ala rotatoria”.



Figura 1-2: UAV Ala rotatoria.

Los UAV con ala rotatoria, como se muestra en la figura 1-2, son aquellos en los cuales, las fuerzas de sustentación se logran mediante el giro de las hélices en el aire, siendo estos también conocidos como multirrotores o helicópteros, las características más importantes de estos son (Garcia, 2015):

- Despegue y aterrizaje vertical, reduciendo las necesidades de espacio para las maniobras de aterrizaje y despegue.
- Posibilidad de volar a puntos fijos, vuelo estacionario, muy útil para aplicaciones de inspección.
- Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo, ya que los sistemas de ala fija siguen trayectorias curvilíneas, con radios de giro relativamente grandes y velocidades de ascenso y descenso bastantes estrictas, sin embargo, los multirrotores pueden volar siguiendo cualquier trayectoria en las tres dimensiones.



Figura 1-3: UAV Ala fija.

Los aparatos de ala fija como se muestra en la figura 1.3, son los considerados como aviones, y sus principales características son:

- Son más eficientes que los multirrotores, ya que, a igualdad de tamaño, tienen mayor autonomía.
- Vuelan a mayor velocidad, por lo que al tener además mayor autonomía recubren más superficie, siendo más útiles en tareas de cartografía o teledetección.
- Tienen menor huella sonora, siendo más indicados para operaciones de vigilancia.
- Tienen mayor rango meteorológico, en términos de temperatura, viento y lluvia.

El diseño de los multirrotores permite embarcar cargas de pago más voluminosas. Los UAV de ala fija tienen la ventaja de ser capaces de volar a altas velocidades durante largos períodos de tiempo con características aerodinámicas más simples. Algunos de ellos ni siquiera requieren una pista o lanzador para el despegue y el aterrizaje. Los vehículos aéreos no tripulados de ala rotatoria tienen la ventaja de ser capaces de despegar y aterrizar verticalmente y flotar sobre un objetivo. Sin embargo, debido a su complejidad mecánica y poseer baterías de menor capacidad, tienen un rango pequeño de vuelo (Díaz, 2013). Los UAV en general tienen varias ventajas:

- Pueden ejecutar misiones de vuelo de forma rápida y repetidamente.
- La cobertura de nubes no impide la adquisición de fotos durante los períodos críticos del crecimiento.
- Permiten la entrega rápida de la información para el usuario.
- Son flexibles en cuanto a la altura, el calendario de las misiones de vuelo y pueden obtener imágenes de muy alta resolución.
- Vuelos a baja altura e imágenes de ultra-alta resolución espacial: Los drones pueden volar a muy baja altura, lo que permite obtener imágenes aéreas con una elevada resolución

espacial (1-10 cm/píxel), todo ello en función de las necesidades del usuario y la finalidad del estudio (Granado, 2011).

Los UAV se han desarrollado en los últimos años como una plataforma aérea para la adquisición de imágenes relacionadas con el control localizado de malas hierbas (CAMILLI, 2015). En el contexto del control localizado de malas hierbas en fase temprana, uno de los beneficios más relevantes es la posibilidad de volar a bajas alturas (Díaz, 2013), lo que permite la captura de imágenes de muy alta resolución espacial en las que se pueden detectar y clasificar objetos de pocos centímetros. Esto posibilita el uso de imágenes procedentes de UAV para la discriminación y cartografía de malas hierbas en fase temprana (2-6 hojas verdaderas) con el fin de diseñar mapas de tratamiento localizado en post-emergencia temprana (Dunford et al., 2009). La mayor dificultad de este objetivo radica en que en ese estado fenológico las plantas de cultivo y las malas hierbas son similares en apariencia y espectralmente (Granado, 2011) y por ello se requieren imágenes con píxeles de 1-6 cm. Actualmente no es posible obtener una resolución espacial tan elevada con los sensores utilizados en satélites y aviones tripulados.

Los UAV tienen dos segmentos claramente definidos (Hernandez, 2013):

- Segmento de Vuelo: Formado por el Vehículo Aéreo y los sistemas de Recuperación (aterrizaje sobre ruedas o patines, red, cable, paracaídas...).
- Segmento de Tierra: Formado por la Estación de Control (está en tierra y, recibe la información enviada por los drones y a su vez les dan órdenes) y los sistemas Lanzador (pueden ser hidráulicos, neumáticos, etc.).

Gran cantidad de universidades y centros de investigación, tanto privados como públicos, realizan investigaciones con vehículos aéreos autónomos, destacándose los aviones por tener menor complejidad y ser más económicos. Entre las principales instituciones a nivel mundial que siguen su desarrollo e investigación se encuentran la NASA (Allen et al., 2002), la Agencia de Defensa y Seguridad de Suecia (FOI) (GRankvist, 2006), el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) (King, 2004), la Universidad Tecnológica de Delft en Holanda (Bennani and Looye, 1998), la Universidad de Aalborg en Dinamarca, la

Universidad de Cranfield, en el Reino Unido (Lancaster, 2004), la Universidad de Stanford (Jang and Tomlin, 2003), la Universidad de La Florida (Lee, 2004), entre otras.

Actualmente para este proyecto se cuenta con el UAV 3DR X8+ (ala rotativa), el cual llegó a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas en el 2016 y fue adquirido por el grupo GARP formando parte de un proyecto Norte-Sur-Sur (NSS) con la Universidad de Leuven (Bélgica) y la Universidad Agraria de la Molina (Perú), denominado: UAV-technology for agro-ecosystems mapping.

1.3.4.1 Aplicaciones de los UAV en la Teledetección

Dentro de la gran variedad de aplicaciones que se les está dando a los UAV en la Teledetección, las más generales son las que a continuación detallamos (Garcia, 2015):

- Topografía aérea: Obtención de ortofotos, modelos digitales del terreno y modelo de elevaciones, obteniendo cartografía, superficies, cubitaciones, mediciones. Actualmente casi todas las constructoras de primer nivel tienen su departamento de UAV, para realizar topografía y cartografía.
- Multimedia: Obtención de imágenes y videos aéreos, seguimiento y control de obras, publicidad, eventos. Este tipo de aplicaciones hoy en día son las que mejor están funcionando debido a que hay una demanda muy extendida por parte de estudios de filmación y fotografía.
- Agricultura de Precisión: Estudio y vigilancia de cultivos, relacionado con plagas, riegos.
- Operaciones Industriales: Inspecciones termografías para la industria realizando chequeos y verificación de paneles solares, tendidos eléctrico, torres de alta tensión, aerogeneradores.
- Gestión forestal: Para detección de incendios, estudios de hidrología y estudios medioambientales, todavía en fase de desarrollo e investigación.

1.4 Consideraciones Finales del Capítulo

En el presente capítulo se ha evidenciado el auge alcanzado a nivel mundial de la teledetección y sus herramientas para la captura de imágenes, específicamente de los aviones de pequeño porte UAV y los sensores para la captura de imágenes multiespectrales.

Presentado el marco teórico y luego de un análisis de la bibliografía consultada, se arriban a las siguientes conclusiones:

- La Teledetección ha demostrado ser una eficaz herramienta para el análisis en diversos campos y aplicaciones.
- La aplicación de la Agricultura de Precisión es una vía segura para aumentar las producciones, ahorrando los insumos agrícolas y cuidando el medio ambiente.
- Para la toma de imágenes aéreas se utilizará el UAV 3DR X8+ y la cámara multiespectral Parrot Sequoia.
- La resolución espacial, multiespectral, y temporal son aspectos fundamentales a tener en cuenta para la adquisición de imágenes según la aplicación a realizar.

CAPÍTULO 2. Herramientas para la toma de imágenes multiespectrales

En este Capítulo se describen las herramientas fundamentales empleadas en el sistema de adquisición de imágenes: el UAV y la cámara multiespectral, así como sus especificaciones técnicas y condiciones de explotación óptimas. Para determinar las condiciones de vuelo, con vista a realizar de manera satisfactoria la toma de imágenes vinculadas a la Agricultura de Precisión, se realizará un estudio de las resoluciones espaciales, espectrales y temporales tratadas en el capítulo anterior, así como la influencia de la altura de vuelo para la obtención de las resoluciones de imágenes deseadas. También se establece el método de vuelo a utilizar para dicha toma de imágenes multiespectrales y se muestran los pasos a seguir con el software planificador de vuelos Mission Planner.

2.1 UAV 3DR X8+

El UAV es un componente que debe ser seleccionado cuidadosamente según la tarea de fotogrametría a ejecutar debido a que si tiene una capacidad de carga reducida puede ser que no sea capaz de levantar el vuelo con la cámara multiespectral, o que su velocidad de desplazamiento sea demasiado alta para las capacidades de disparo de dicha cámara entre otras cualidades.

En este proyecto se va a utilizar el UAV 3DR+ mostrado en la figura 2-1a, el mismo fue adquirido por el grupo GARP, posee una reputación de fiabilidad y robustez en el mercado de aviones autónomos y se destaca por sus altas prestaciones en aplicaciones de fotogrametría. Este proyecto junto con el desarrollo de aplicaciones para la fotogrametría está siendo analizado por las empresas AZCUBA (Empresa del Azúcar en Cuba) y por GEOCUBA. Las características del mismo serán analizadas en este epígrafe.

2.1.1 Componentes del 3DR X8+

El 3DR X8+ es un pequeño avión autónomo de ala rotatoria. Su diseño específico permite un funcionamiento flexible y se puede implementar de forma segura en diferentes entornos y condiciones meteorológicas. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la fotogrametría, la Agricultura de Precisión, el estudio medioambiental, la búsqueda y salvamento, informes de noticias, entre otras aplicaciones.

Los componentes del UAV 3DR X8+ son la estructura aérea, el sistema de radio control, el piloto automático *Pixhawk*, la telemetría, la cámara y la estación de tierra la cual se compone por una PC portátil en el terreno de vuelo y el software *Mission Planner* como planificador de vuelo.

El UAV 3DR X8+ que se muestra en la figura 2-1 posee características como:

Estructura Aérea:

- Batería: 4S 14.8V 10.000 mAh 10C.
- Equipo del piloto automático: Pixhawk v2.4.5.
- Firmware del piloto automático: ArduCopter 3.2.
- GPS: 3DR u-blox GPS con brújula (módulo LEA-6H, actualización de 5 Hz).
- Estación terrestre Radio: 3DR Radio v2 (915 MHz o 433 MHz).
- Controlador: FlySky FS-TH9X con módulo de telemetría FrSky.
- Dimensiones: 13.7 in x 20.1 in x 11.8 in (35 cm x 51 cm x 20 cm).
- Capacidad de la carga útil: 800 g (1.7 libras).
- Peso del vehículo con la batería: 2.56 kg (5.6 libras).
- Peso: 2.600 g.
- Velocidad Máxima de Vuelo: 30 m / s.
- Altura de vuelo: 100m.
- Tiempo de vuelo máximo estimado: 15 min /1 Km Distancia de Control - Depende del equipo instalado a bordo, pero en promedio, se obtiene entre 12-15 minutos de tiempo de vuelo por carga.

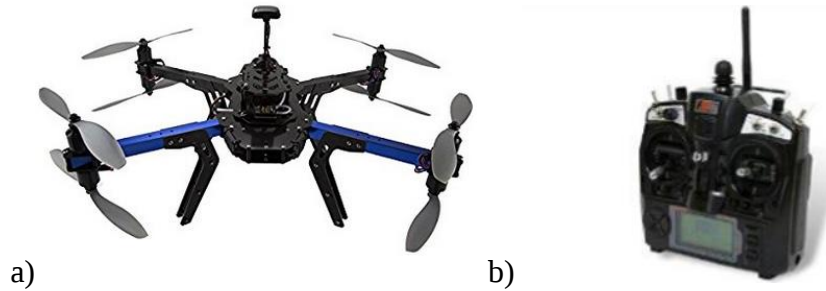


Figura 2-1: Set aéreo.

Sistema de comunicación FlySky FS-TH9X:

Es el dispositivo que permite pilotear el vehículo de manera remota, el mismo utiliza una frecuencia de 2.4 GHz, además es alimentado con ocho baterías AA y cuenta con una pantalla que muestra información del vuelo y se comunica con el receptor *FS-R6B* situado en el UAV, el cual cuenta con seis canales. En la figura 2-1b se muestra el control que posee el sistema UAV. El receptor comunica al controlador la nueva dirección a tomar.

- Rango Manual: 1000m.
- Frecuencia: 2.4 GHZ.

Piloto Automático Pixhawk:

El controlador de vuelo empleado es el *Pixhawk* mostrado en la figura 2-2. Es un sistema de piloto automático avanzado fabricado por la compañía 3DR ([3D Robotics](http://3dr.com)). Dicho controlador incorpora una IMU (*Inertial Measurement Unit*) o unidad de medición inercial en su estructura. Este dispositivo incluye un conjunto de sensores capaces de medir la velocidad, la orientación y las aceleraciones del cuerpo.

La IMU cuenta, con los elementos de medición básicos (acelerómetro, giróscopo y magnetómetro) y posee además un barómetro para medir la presión atmosférica. Con esta presión, que varía en función de la altura a la cual se esté midiendo, se puede obtener la altura a la que se encuentra el sensor.

- Tipo: *Pixhawk*.
- Sensores incluidos: GPS, IMU, Magnetómetro, Sensor de Velocidad Aérea, Sensor de Voltaje, Barómetro.
- Frecuencia registrada: 10Hz.

- Rango del Autopiloto: Ilimitado.



Figura 2-2: Controlador de vuelo *Pixhawk*.

Especificaciones técnicas:

Procesador:

- Núcleo ARM Cortex M4 de 32 bits con FPU
- 168 Mhz / 256 KB RAM / Flash de 2 MB
- Copiloto a prueba de fallos de 32 bits

Sensores:

- MPU6000 como acel y giro principal
- Gyroscopio ST Micro de 16 bits.
- ST Micro acelerómetro / brújula de 14 bits (magnetómetro).
- Barómetro MEAS.

Interfaces:

- 5 puertos series UART, 1 de alta potencia, 2 con control de flujo HW.
- Entrada RSSI (PWM o voltaje).
- I2C, SPI, 2x CAN, USB.
- Entradas ADC de 3,3 V y 6,6 V.

Dimensiones:

- Peso 38 g (1,3 oz), ancho 50 mm (2.0 "), altura 15.5 mm (6 "), longitud 81.5 mm (3.2 ").

Radio Telemetría FrSky:

El receptor posee dos entradas analógicas que pueden ser usadas para monitorizar el voltaje de la batería, sensor de temperatura, etc y transferir esos datos al transmisor. Se pueden configurar la alarma sonora cuando el voltaje de salida es superior o inferior al nivel programado. También el receptor es capaz de aceptar los flujos de datos de serie a través de un simple cable de 3 hilos RS232, información como el GPS, la altitud, etc los datos pueden ser transferidos al transmisor sin errores, y se envía al puerto RS232 en el transmisor. La telemetría empleada se muestra en la figura 2-3.

Especificaciones del receptor:	
Modelo: DTF Rango voltaje: 6.0V-13.0V Consumo: 50mA Potencia de salida: 60mW Resolución: 11bit (3072)	Modelo: D8R-II Plus Peso: 16.2g Tamaño: 54*27*17mm Rango de voltaje: 4.0V-7.2V Consumo: 100mA Alcance: 1.5km Resolución: 11bit (3072) Voltaje salida analógica: 0~3.3V



Figura 2-3: Conjunto de telemetría de largo alcance jD-RF900.

GPS Ublox Neo-M8N:

Este módulo suministra una velocidad de transmisión de 38400 bps y además el GPS NEO-M8 incluye el módulo de la brújula y el juego de cajas y el cable de 6 pines compatible *Pixhawk*.

La serie *NEO-M8* mostrada en la figura 2-4 cuenta con un *front-end* adicional LNA para facilitar la integración de la antena y un filtro SAW *front-end* para una mayor inmunidad de interferencia.



Figura 2-4: GPS Ublox Neo-M8N

Características:

- Módulo Ublox Neo-M8N.
- -167 dBm de sensibilidad de navegación.
- Velocidad de actualización de navegación hasta 10 Hz.
- Batería de reserva recargable de litio de 3V.
- Regulador de 3.3V de bajo ruido.
- LED indicador de energía y de arreglo.
- 2 cables de 30cm son incluidos, uno de 6 vías compatible con Pixhawk2.4 y otro de 5 vías compatible con APM.
- Diámetro 60 mm.

2.2 Sensor Multiespectral Parrot Sequoia

A bordo del UAS se instaló la cámara aérea multiespectral Parrot Sequoia como se muestra en la Figura 2-5, la cual cuenta con una excelente precisión, una integración sencilla y muy flexible y genera imágenes en cuatro bandas independientes (verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) y una RGB. Su reducido tamaño y peso, hacen de la Parrot Sequoia una cámara ideal para adaptarse a todos los tipos de aviones no tripulados: tanto ala fija como multi-rotor, con o sin cardanes y sus conexiones wifi y USB hacen que los datos sean accesibles desde todos los soportes: ordenador, smartphone o tableta.



Figura 2-5: Montaje del sensor en ala rotatoria y ala fija respectivamente.

Con un peso de solo 107 gramos, Sequoia es un sensor muy potente y muy compacto. Esta cámara tiene 4 filtros para analizar nutrientes y biomasa de los cultivos, y además cuenta con una cámara RGB de 16 mpx para hacer mapas con alto detalle, ideal para conteo de plantas recién nacidas y permite, además, gracias a su integración con Pix4D, hacer mapas de elevación del más alto detalle.

El sistema se compone por una parte de la cámara multiespectral que inspecciona el terreno, y, por otro lado, dispone de un sensor solar que mide y registra durante el vuelo de forma continua las condiciones de luz en las mismas bandas del espectro que el sensor multiespectral. Los datos lumínicos recogidos permiten confirmar los valores de los datos espectrales identificados. Esta configuración permite obtener los valores instantáneos para comparar la actividad solar y el estado del cultivo.

Características de la Cámara Sequoia

La solución Parrot Sequoia se compone de dos sensores como se muestra en la figura 2-6. El sensor "multispectral", ubicado frente a las plantas, el mismo capta la luz que reflejan las plantas en cuatro partes diferentes: el verde, el rojo, así como dos bandas infrarrojas invisibles para el ojo humano. La reflectancia de las plantas se muestra en el Anexo II. El sensor "sunshine", ubicado encima del dron, memoriza la intensidad de la luz que emana del sol en estas mismas cuatro bandas de luz.



Figura 2-6: Sensor Parrot Sequoia y Sensor de Irradiación.

El sensor multiespectral Parrot Sequoia integra también un módulo GPS que aumenta significativamente la precisión de los datos recogidos sin tener que recurrir a los datos memorizados por la plataforma de transporte: avión, drone, tractor, etc. Sus diferentes componentes internos le permiten conocer en todo momento su altitud, su velocidad de vuelo y su situación para adaptar su velocidad de captura en consecuencia.

Principales Características

- Cámara multiespectral especialmente indicada para la Agricultura de Precisión.
- Configuración sobre WIFI.
- Auto-calibrado usando el sensor de sol.
- Cámara RGB 16 Mpx para el Movimiento Scout.
- Memoria interna de 64Gb de capacidad.
- Captura imágenes en cuatro canales diferentes: verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano.
- Sensor luminoso que graba las condiciones de luz y calibra automáticamente los cuatro sensores multiespectrales como se muestra e la figura 2-7.

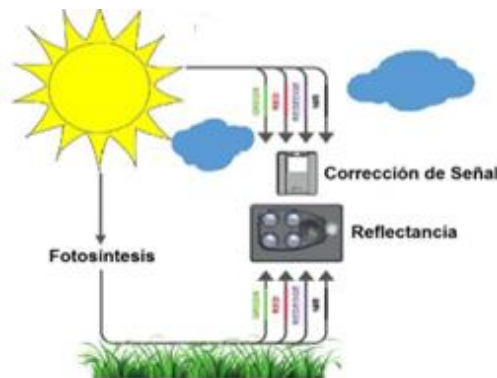


Figura 2-7: Concepto de la autocalibración a partir del sensor de Irradiación.

- Alta tasa de foto (1 imagen por segundo).
- Independiente del avión no tripulado.
- Protocolo estándar (PTP) para la comunicación con aviones no tripulados.
- Peso de la cámara 107 gr.
- Dimensiones: 41 x 28 x 59 mm.

- Peso del sensor de luz 35 g.
- Tamaño de pixel del suelo: Distancia 110 mm / pixel (por banda) a 120 m (400 pies).
- Velocidad de Captura: 1 captura por segundo (todas las bandas), de 8 bits RAW.
- Alimentada por USB.

Sensor multiespectral:	Sensor RGB:
Tamaño de pixel 1.34 μm Distancia focal 3.98 mm Resolución 1280x960	Tamaño de pixel 1.34 μm Distancia focal 4.88 mm Resolución 4608x3456
Tamaño de las bandas espectrales: Verde: 530-680 nm Rojo: 640-680 nm Borde Rojo: 730-740 nm Infrarrojo Cercano: 770-810 nm	

2.3 Configuración del sensor Parrot Sequoia

2.3.1 Montaje del sensor en el UAV

El sensor Sequoia se instala directamente en el *frame* del 3DR X8+ con un soporte dedicado. El sensor para ser conectado al sistema toma la energía de la batería principal del dron (Batería Lipo 4S 14.8V) a través de un regulador de 5V (OKI-78SR DC/DC), que tiene una capacidad de corriente de 1.5A (La Sequoia consume menos de 1A). En la figura 2-8 se muestra el diagrama de energía actual para el sensor Parrot Sequoia.

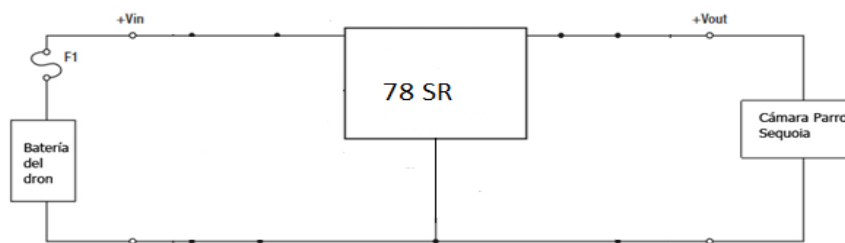


Figura 2-8: Diagrama de energía para sensor Parrot Sequoia.

La cámara debe estar conectada sólidamente a la estructura con la geometría conocida con el fin de aprovechar la información proporcionada por el sensor de irradiación y su IMU.

2.3.2 Activación de la Cámara Parrot Sequoia

La Cámara Parrot Sequoia aloja una interfaz Wi-Fi que permite especificar un método de disparo de imágenes al sensor, accediendo a una URL web específica en cualquier navegador. Sequoia es también accesible a través del protocolo PTP / PTP-IP a través de USB. Este protocolo permite el acceso a muchas funciones de la cámara, incluyendo la captura y el gatillo para el control automático con un software de planificación de vuelo.

Modos de captura de imágenes:

- **Lapso de tiempo:** Este es el método empleado en la actualidad, los valores mínimos que se pueden configurar son de 0,5fps (cuadros por segundo) para los sensores multiespectrales y 1fps para el sensor RGB.
- **GPS:** Los límites a los valores que se pueden configurar son 5m mínimo y máximo de 1 kilómetro.

La obturación se hace por tiempo debido al error inherente al sistema GPS (5m) que podría provocar la pérdida de imágenes o el no cumplimiento de los solapes. Esto trae como factor negativo la obtención de un mayor número de imágenes con el consecuente esfuerzo para su procesamiento.

Extracción de los datos de los sensores:

- **USB:** Se utiliza el cable micro USB (suministrado) para conectar el sensor multiespectral al ordenador. En Windows se accede por Inicio/Informática/Sequoia/Interno. Para Mac: Se abre la transferencia de imágenes.
- **Wi-Fi:** Se chequea si la conexión Wi-Fi aparece en la lista de conexiones disponibles. Si no es así, pulsar cuatro veces el botón del sensor multiespectral. El indicador del sensor dispara destellos de luz azul cuando la Wi-Fi está activada. Posteriormente se conecta el ordenador, a la red Wi-Fi: Sequoia_XXXX. Se abre el navegador de Internet y se accede a la dirección IP 192.168.47.1, en ella se va a la ficha Galería y se recuperan las fotos tomadas durante el vuelo.

- Tarjeta SD: Se inserta la tarjeta SD en el ordenador. También el sensor de irradiación puede actuar como un lector de tarjetas SD.

Formato de las imágenes:

Las imágenes se guardan en la memoria interna o en la tarjeta SD como un archivo GEOTIFF de 10 bits RAW para las 4 bandas y como un archivo JPG de cámara RGB. Almacena 5 imágenes para cada imagen (una por banda + RGB).

2.4 Procedimiento general para la toma de imágenes aéreas.

El UAV que realiza una cobertura fotográfica de un área, lo hace realizando sucesivas pasadas adelante y atrás sobre la misma, generalmente en dirección Este-Oeste. Esta trayectoria de vuelo asegura la consistencia en la orientación y el ángulo del sol, lo que ayuda en la interpretación de la información que brinda la foto.

2.4.1 Recubrimiento longitudinal y transversal en vuelos con UAVs.

Mientras el UAV realiza el avance según la trayectoria de vuelo trazada, se debe de diferenciar entre recubrimiento longitudinal y recubrimiento transversal. Si se sobrevuela el terreno y se toman fotografías de eje vertical se está recubriendo el territorio con fotogramas que se solapan tanto longitudinal como transversalmente. Por defecto los recubrimientos, ver figura 2-9, son del 80% cuando se trata del eje longitudinal y del 60% cuando se habla del eje transversal, aunque estos porcentajes pueden variar según el terreno y el trabajo que se vaya a realizar.

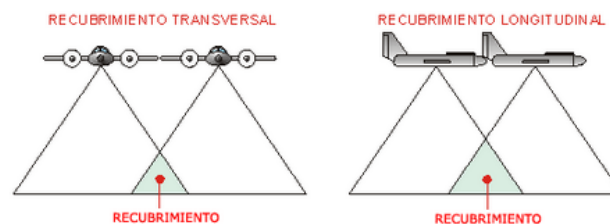


Figura 2-9: Zonas comunes entre sí en las fotografías consecutivas.

Para poder trabajar con las fotografías resultantes, los centros de las mismas tienen que tener una desviación mínima tomando como referencia la vertical del avión, no obstante, las cámaras que se utilizan en los trabajos fotogramétricos tienen una calibración óptima de este parámetro.

El sensor Parrot Sequoia será capaz de tomar las fotos deseadas, teniendo en cuenta el solapamiento deseado entre las fotos y la resolución de la superficie del suelo en las imágenes. Estos elementos son mostrados en las tablas 2-1 y 2-2.

	Tiempo entre los disparos en dependencia de la velocidad			
Altura (m)	5 m/s	10 m/s	13 m/s	20 m/s
30	1.1	0.5	0.4	0.3
40	1.4	0.7	0.5	0.4
50	1.8	0.9	0.7	0.5
60	2.2	1.1	0.8	0.6
70	2.6	1.3	1.0	0.7
80	2.9	1.4	1.1	0.74
90	3.3	1.6	1.2	0.8
100	3.7	1.8	1.4	0.9
110	4.1	2.1	1.6	1.0
120	4.4	2.2	1.7	1.1

Tabla 2-1: Tiempo mínimo entre disparos en función de la altura de la altura del vuelo y la velocidad del UAV.

Leyenda de la tabla 2-1:

En Verde: Todos los sensores se pueden activar.

En Azul: El sensor RGB no se puede activar.

En Rojo: El sensor multiespectral y el sensor RGB no se pueden activar.

	Distancia entre los disparos (m)			
Altura (m)	70% Solapamiento	75% Solapamiento	80% Solapamiento	85% Solapamiento
30	8.4	7	5.6	4.2
40	11.2	9.3	7.5	5.6
50	14	11.7	9.1	7
60	16.8	14	11.2	8.4
70	19.6	16.4	13.1	9.8
80	22.4	18.7	15	11.2
90	25.2	21	16.8	12.6
100	28	23.4	18.7	14
110	30.8	25.7	20.6	15.4
120	33.7	28	22.4	16.8

Tabla 2-2: Distancia mínima entre dos disparos en dependencia de la altura del vuelo y rango de solapamiento.

Estos son parámetros que influirán en la calidad de las fotos y en dependencia de ellos se ajustarán la altura de vuelo y la velocidad del UAV 3DR X8+ para la toma fotográfica.

Antes de la toma de imágenes es necesario realizar un procedimiento a seguir de forma que el trabajo quede organizado. El flujo de trabajo consiste en 4 puntos básicos: plan de vuelo, apoyo topográfico, chequeo previo al vuelo y la toma fotográfica.

2.4.2 Elaboración del Plan de vuelo

Antes de realizar una misión con un UAV es imprescindible diseñar un plan de vuelo. A raíz de un estudio previo que se les hacen a todos los elementos que forman parte de la misión, se presenta el modo a llevar a cabo el vuelo y se elabora un procedimiento en el que se detalla la forma y conjunto de medios necesarios para el mismo. Para la elaboración de este plan se seguirán una serie de pasos de gran importancia para la misión, los cuales se presentan en este epígrafe.

Esta fase, en la que se decide la altura de vuelo, es de vital importancia para conseguir imágenes con la resolución adecuada. Es necesario tener en cuenta el objetivo que se persigue y el cultivo en que se trabaja, ya que esto influye sobre la altura a la que se volará y a su vez ésta determina la resolución espacial de las imágenes, el número de imágenes necesarias para cubrir el cultivo y la duración del vuelo, aspecto muy importante para evitar problemas con la autonomía del vehículo (Torres et al., 2013). La mayoría de los requerimientos para la altura se establecen a partir de la resolución espacial requerida.

La escala es la relación matemática que existe entre las dimensiones reales y las de la fotografía o dibujo que representa la realidad sobre un plano o un mapa. Cada punto dentro de una foto tiene su propia escala media, dependiendo del lugar con respecto al centro de la foto y de la altura del terreno. Esta escala media mantiene una estrecha relación con los conceptos distancia focal y altura media del vuelo, de la forma:

$$\frac{f}{H} = \frac{1}{E} \quad (2.1)$$

Donde:

f = Distancia focal

H = Altura media del vuelo

E = Denominador de la escala

Esta expresión (1) básica en fotogrametría, es fundamental a la hora de planear un vuelo ya que dependiendo de la distancia focal de la cámara que se vaya a utilizar y de la escala media de los fotogramas que se desee obtener, hay que volar a una altura u otra.

Se realizaron tres pruebas de vuelo a 40m, 80m y a 120m con el UAV 3DR X8+ y la cámara Parrot Sequoia insertada. Teniendo en cuenta los parámetros de la cámara fotográfica y la altura de vuelo se puede determinar la escala de vuelo. Partiendo de la fórmula fotogramétrica ecuación (2.1), que relaciona la distancia focal, la altura y la escala, teniendo en cuenta los parámetros de la cámara donde $f = 3.98\text{mm}$ para Sensor Multiespectral y $f = 4.88\text{ mm}$ para Sensor RGB junto con las respectivas alturas de vuelo, se obtuvieron los siguientes valores de escala de vuelo en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Escala en función de la altura de vuelo y las características técnicas de la cámara Parrot Sequoia.

Altura de vuelo (m)	Sensor RGB	Sensor Multiespectral
40m	1/8000	1/10000
80m	1/16000	1/20000
120m	1/24000	1/30000

Para elaborar el plan de vuelo se realiza el diseño del vuelo en función de la resolución que se pretende obtener (o la escala), de la orografía del terreno y de la previsión meteorológica. Se programa un plan de vuelo con un software, donde se establece la ruta a seguir por el avión. El vuelo se ejecuta de forma autónoma (excepto el despegue y el aterrizaje). En este se define la altura a volar por el UAV, la cual estará determinada por el sensor y la distancia de muestreo del suelo (GSD) a la que se deseen obtener en las fotos, por ejemplo, si la cámara es de 1280×1024 pixeles (1.3 mpx) la GSD obtenida a 210m del suelo será de 14cm. Además, la trayectoria trazada debe tener en cuenta el ángulo de visión de la cámara para asegurar una buena superposición de las imágenes (Jiménez, 2016). No solo se podrán programar los desplazamientos, junto con las velocidades de ascenso o desplazamiento, sino que también se programarán la forma en que se realiza el vuelo e, incluso, el punto al que debe estar apuntando la cámara en todo momento, el lugar en que se debe sacar la fotografía y la inclinación de la cámara en ese punto (Acosta, 2011).

2.4.3 Tamaño pixel del suelo (GSD)

Como se muestra en la figura 2-10, el GSD (del inglés Ground Sample Distancia) se puede definir como el tamaño pixel del suelo o distancia de muestreo en el terreno, es decir si en una aplicación determinada se hace necesario un GSD de 8 cm significa que cada pixel en el terreno recoge un área de 8 x 8 cm. El GSD va relacionado con la distancia focal y la altura de vuelo, si se quiere realizar un proyecto de mayor resolución se deberán de utilizar alturas de vuelo menores.

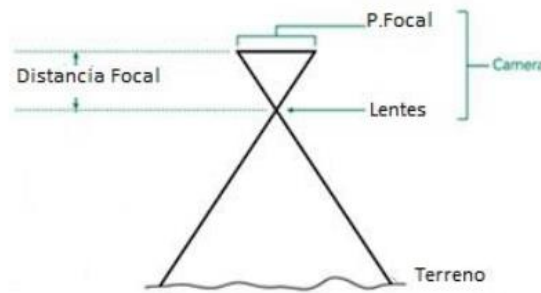


Figura 2-10: Relación del GSD con la distancia focal y la altura de vuelo.

Partiendo de la fórmula:

$$GSD = \frac{H * \text{tamaño pixel}}{focal} \quad (2.2)$$

Teniendo en cuenta que se realizaron tres pruebas de vuelos a 40m, 80m y 120m, aplicando las características técnicas de la cámara para Sensor Multiespectral (*tamaño de pixel*=3.75μm y la *distancia focal* =3.98mm) y para Sensor RGB (*tamaño de pixel*=1.34μm y *distancia focal* =4.88mm) en la fórmula (3), podemos conocer cuál sería la GSD resultante para cada altura de vuelo respectivamente donde cada pixel va a representar un área de terreno.

Tabla 2.2: GSD (cm/pixel) en función de la altura de vuelo y las características técnicas de la cámara (ecuación 2.2).

Altura de vuelo (m)	Sensor RGB	Sensor Multiespectral
40m	1 cm/pixel	3 cm/pixel
80m	2 cm/pixel	7 cm/pixel
120m	3 cm/pixel	11 cm/pixel

Como se cuenta con la cámara Parrot Sequoia y estos parámetros no varían porque son datos técnicos de la misma, si se pretende obtener otra GSD de un valor menor a los obtenidos se procederá a variar la altura de vuelo y en función de esto se determinan entonces las condiciones de vuelo del UAV para obtener dicha GSD. Una vez seleccionadas las alturas de vuelo para el desarrollo de los objetivos, se diseña el plan de vuelo con el software propio del UAV y finalmente se implementa en el vehículo

2.4.4 Apoyo topográfico

La georreferenciación es la técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y geometría de referencia específicas. Es una operación habitual dentro del sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) tanto para objetos ráster (imágenes de mapa de píxeles) como para objetos vectoriales (puntos, líneas, polilíneas y polígonos que representan objetos físicos)(Lasso Garzón, 2015).

Las imágenes tomadas con la cámara Parrot Sequoia están georreferenciadas, pero no fue posible introducir los GCPs (point control group, por sus siglas en inglés) con solo dos coordenadas (latitud y longitud), por lo que los modelos obtenidos a partir de las imágenes tomadas por este sensor fueron optimizados con la corrección de distancia entre los GCP. En el Anexo III se muestran las coordenadas de los puntos de control utilizados. Con la introducción de los GCPs y las correcciones de distancias en los modelos realizados se logró enmendar errores de aproximadamente un metro.

2.4.5 Chequeo previo al vuelo

Previo al vuelo se necesita tener información general sobre el terreno y sobre otros factores referentes al mismo, además de que todo tiene que estar en orden para evitar que en la misión no se obtengan los resultados esperados. Para la planificación de la misión de vuelo se empleará el software *Mission Planner* que después de ser instalado se abrirá dando clic en el ícono del sistema y posteriormente se podrá conectar *Mission Planner* con *Pixhawk* para recibir telemetría y controlar el vehículo o cargar el firmware a emplear.

Para esta misión primeramente se debe analizar el terreno que el cliente seleccionó para realizar el vuelo y posteriormente realizar con el Mission Planner las siguientes tareas:

- Actualizar la caché de fotos de la zona de vuelo en el software: se procede conectando el software a internet y este obtiene la información del territorio en *Google Earth*.
- Trazar la ruta de la misión.
- Fecha: Fecha en la que se realizará la misión.
- Zona de despegue y aterrizaje: Se selecciona la zona de despegue y aterrizaje en el polígono de la misión.
- Tiempo de comienzo - Tiempo de parada.
- Altitud local: Esta se puede conocer por el GPS del autopiloto.
- Piloto/Co-Piloto: El Piloto es el encargado del despegue y el aterrizaje de la aeronave y el Co-piloto debe estar frente a la computadora observando el recorrido del vuelo desde el software Mission Planner. Deben tener buena comunicación entre ellos y estar a una corta distancia uno del otro. De esta forma no se compromete la misión pues cualquier problema que pueda tener la aeronave el Co-piloto se lo comunica al Piloto para que el mismo detenga la misión.
- Condiciones de iluminación: Vienen dadas según las condiciones ambientales, es decir si está nublado, soleado, completamente oscuro o lluvioso. Para la realización de una misión apropiada lo ideal es un día soleado.
- Velocidad del viento y dirección: La velocidad del viento se debe tomar con un Anemómetro. La dirección del mismo se verifica que sea del noroeste pues Cuba presenta la característica de tener vientos alisios en esta dirección por lo tanto las rutas de la misión se planifican en ese sentido, nunca transversal pues puede causar inestabilidad en el vuelo y afectar así la misión.
- Elevación del vuelo: Altura a que debe volar el UAV pues así las fotos tienen buena calidad y se evitan la interferencia de elementos que puedan perjudicar las imágenes tomadas.
- Comprobar las condiciones del avión y sus componentes:
 - Comprobar el voltaje de la batería, comprobar si el motor y la hélice están sujetas apropiadamente, conectar las alas y asegurarse de que están conectadas correctamente, comprobar la batería de la cámara y la memoria:

la batería debe tener más del 50% de la carga y la memoria debe estar vacía y cerrada.

2.4.6 Toma Fotográfica

Posteriormente se toman las fotografías. Según el plan de vuelo realizado, se ejecutará la ruta donde se realizará la captura de imágenes. Se podrá visualizar en la PC en tiempo real toda la información de telemetría, estado del aparato y posición del mismo mediante GPS.

2.5 Características de los materiales a utilizar

Para la realización de la misión de vuelo es necesario poseer una serie de materiales como el UAV, cada uno de sus componentes y la cámara multiespectral y además se hace necesario:

- Comprobar el modo de la cámara (TV) y la velocidad del obturador de la cámara debe estar acorde a las condiciones de luz (soleado: 1200, nublado: 1000, muy oscuro: 800).
- Comprobar el estado de la batería del radio receptor.
- Comprobar el estado de la batería de la PC portátil.
- Instalar y conectar la batería al autopiloto.
- Conectar el módulo telemetría a la estación a tierra, poner en marcha el *Mission Planner* y establecer el enlace con el UAV.
- Cuando el autopiloto inicialice, comprobar el estado de la IMU, GPS y telemetría.
- Cargar la misión en la aeronave.

2.5.1 Software a utilizar para realizar el plan de vuelo

El *Mission Planner* es el software que se utilizará como estación a tierra, el cual es la interfaz para el hardware y este realiza la preparación inicial, configuración, prueba y análisis después de la misión (Torres-Sánchez et al., 2013).

Este software posee las siguientes características:

- Carga el firmware (el software) en el piloto automático que controla al vehículo.
- Establece, configura y pone en punta al vehículo para un rendimiento óptimo.

- Planifica, guarda y carga misiones autónomas en piloto automático con una sencilla entrada de way-point de apuntar y hacer clic en Google u otros mapas.
- Descarga y analiza los registros de la misión creados por el piloto automático.

Con el hardware de telemetría adecuado:

- Supervisa el estado del vehículo mientras está en funcionamiento.
- Realiza registros de telemetría record (Torres-Sánchez et al., 2013) que contienen mucha más información que los registros de los pilotos automáticos a bordo.
- Observa y analiza los registros de telemetría.
- Opera el vehículo en FPV (vista en primera persona).

2.5.2 Pasos para crear el plan de vuelo

Para crear la misión de vuelo se siguen los siguientes pasos:

- Primeramente, se abrirá el Planificador de Misiones y se selecciona el menú desplegable *Puerto COM* en la esquina superior derecha de la pantalla (cerca del botón *Conectar*). Luego se selecciona *AUTO* o el puerto específico de su tarjeta (*PX4 FMU* o *Arduino Mega 2560*) como se muestra en la figura 2-11 y establecer la velocidad de transmisión en baudios como 115200.

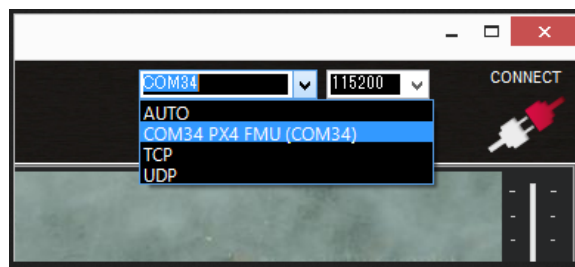


Figura 2-11: Conexión con el Mission Planner.

- **Instalar el firmware:**

En la configuración inicial del planificador de la misión ir a *Instalar la pantalla de firmware*, seleccionar el ícono apropiado que coincida con su marco (ej. *Quad*, *Hexa*, etc) como se muestra en la figura 2-12.

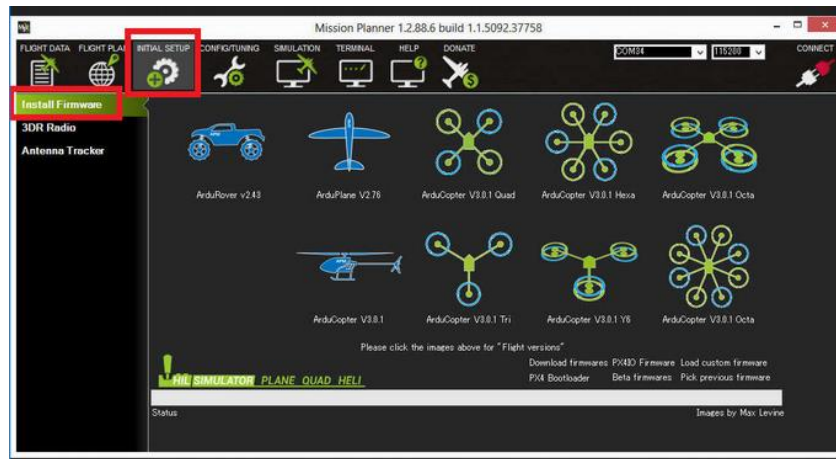


Figura 2-12: Planificador de misión: Instalar FirmwareScreen.

Después de que el planificador de la misión detecte qué tablero se está utilizando (es decir, *Pixhawk*) le pedirá que desenchufe la tarjeta, la enchufe y presione la *Autorización* dentro de algunos segundos (durante este breve período el bootloader acepta peticiones para cargar nuevo firmware). Si todo va bien, aparecerá algún estado en la parte inferior derecha, incluyendo las palabras "borrar ...", "programar ...", "verificar" y "Cargar terminado". El firmware se ha subido correctamente a la placa.

- **Planificación de la Misión:**

Al entrar al *Mission Planner* después de haber cargado las imágenes de la zona a volar, aparece la vista de la Tierra y se acerca la imagen hasta llegar al territorio donde se va a realizar la misión. Luego dar click derecho y seleccionar *Auto WP* y luego *Survey (GridvZ)* como se muestra en la Figura 2-13. La opción *Survey (Grid)* del *Planificador de Misión* define automáticamente los waypoints necesarios para cubrir un polígono arbitrario.

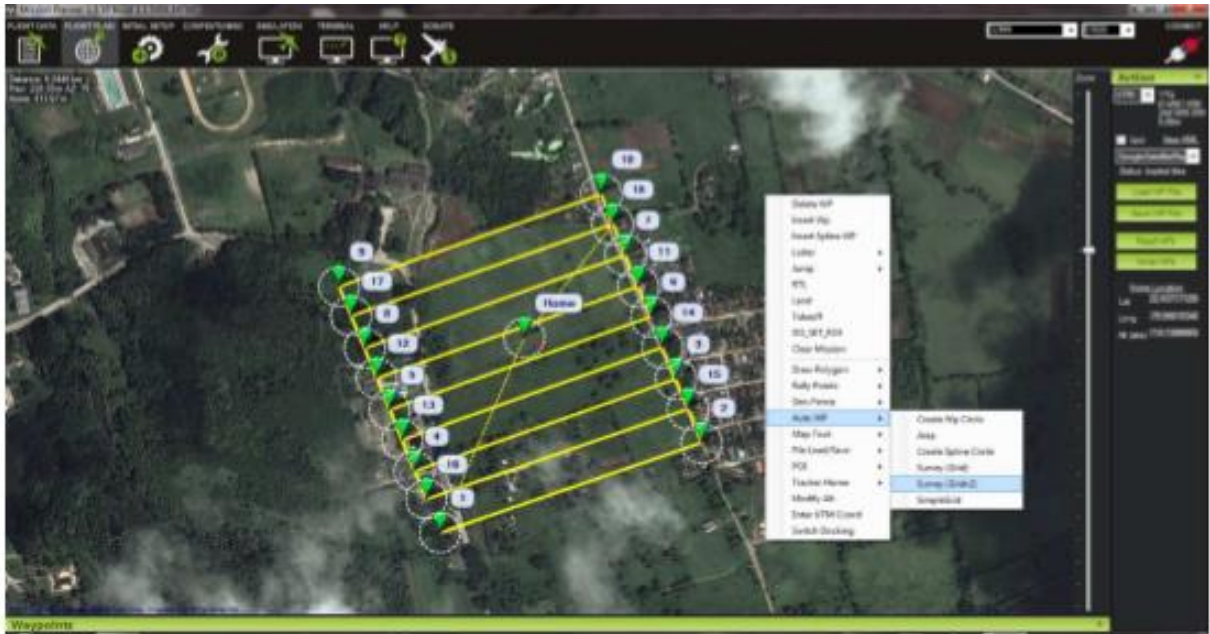


Figura 2-13: Pantalla Principal del Software Mission Planner

Al salir la nueva ventana pulsar el botón Box y marcar, en el terreno seleccionado para el vuelo, un cuadro que borde el área donde realizará el recorrido el avión. En Aircraft se selecciona el UAV que se va a utilizar (AduCopter Octa) y en Camera se encuentran una serie de cámaras que se proponen a utilizar (Sequoia) como se muestra en el Anexo IV.

Al marcar el recorrido en el cual se va a desarrollar la misión, el software muestra una serie de datos aproximados referentes a la distancia del vuelo, distancia entre líneas, distancia entre imágenes, tiempo de vuelo, número de pasos, entre otros datos.

Mission Planner mostrará una pantalla de configuración en la que podrá definir la marca, modelo de la cámara y otros parámetros, incluyendo la superposición que desee entre las imágenes, el tamaño de la lente, etc. Los valores del comando `DO_SET_CAM_TRIGG_DIST` se calculan automáticamente en base a esta información. El planificador de misiones generará una lista de waypoints que cubre el área especificada, e incluye puntos de despegue y aterrizaje. El comando `DO_SET_CAM_TRIGG_DIST` se llama para especificar la distancia en metros entre dos disparos de la cámara durante la misión. Al final de la misión se llama de nuevo `DO_SET_CAM_TRIGG_DIST` para volver a cero el parámetro (deja de capturar

imágenes). En el Anexo V se muestra la planificación de una misión final con waypoints y activadores de cámara.

Una vez planificada la misión se procede a escribir la misma en el UAV 3DR X8+ como se muestra en la figura 2-14, en la parte derecha de la pantalla principal dando clip en *WriteWps*, posterior a esto se regresa a la pantalla principal (Flight Data) para comprobar el estado del drone (estado de GPS, Batería y comprobación de ángulo entre otros), si todo está correcto se procede a armar el drone mediante el botón de armado conectado al Pixhawk y se puede comenzar la misión.

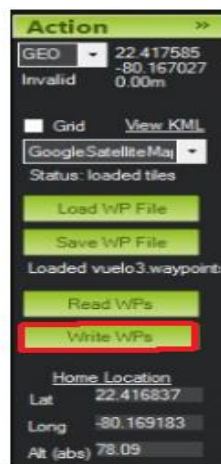


Figura 2-14: Cargar la misión en el UAV 3DR X8 +.

2.6 Toma de imágenes multiespectrales

Las condiciones atmosféricas influyen de manera directa en la adquisición de las imágenes y por este motivo ha de realizarse la toma de datos en las primeras horas de la mañana, cuando el ángulo de incidencia de la luz solar aún no es elevado buscando tener la mayor radiación fotosintéticamente activa o *PAR* (photosynthetically active radiation), las condiciones atmosféricas deberán ser favorables para el vuelo (poca nubosidad y sin vientos). Antes de realizar el vuelo se deben realizar algunos procedimientos; primero se delimitó el área del experimento con puntos GPS, se verificaron las condiciones de tráfico aéreo, se realizó el plan de vuelo, se verificó las conexiones y el funcionamiento del equipo.

El proceso para la toma de las imágenes es similar al vuelo fotogramétrico, en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de mosaicos. Es decir, el solape entre fotogramas y pasadas del vuelo han de ser del 80% y 60%, respectivamente.

En el campo de cultivo, se instala la cámara a bordo del UAV y, tras el despegue manual, se activa la ruta de vuelo programada para que el vehículo comience automáticamente a recorrer el campo de cultivo tomando numerosas imágenes hasta que lo ha sobrevolado por completo. En ese momento se pasa a control manual para proceder al aterrizaje. Durante todo el tiempo de vuelo el UAV envía a la estación base información sobre diferentes aspectos como: posición, estado de las baterías o potencia de los motores.

Tras finalizar el plan de vuelo se realizará la descarga de datos de telemetría de vuelo y fotografías para el posterior procesamiento de dicha información.

2.7 Conclusiones Finales del Capítulo.

Para la ejecución satisfactoria de una misión de vuelo con UAV resulta fundamental la elaboración previa de un plan de dicho vuelo. Posterior a un estudio previo realizado a todos los elementos que van a integrar la misión, se determina la trayectoria, la altura y la velocidad de vuelo para lograr la correcta planificación y ejecución del mismo.

El UAV y el sensor son las herramientas fundamentales en la adquisición de imágenes multiespectrales para asegurar la obtención de buenos resultados en el posterior procesamiento de las mismas. El UAV 3DR X8+ y el sensor Parrot Sequoia son perfectamente acoplables y con una buena planificación de vuelo se pueden realizar las labores de mapeo a alturas de 40m, 80m y 120m a una velocidad constante de 6m/s, obteniendo valores de GSD y un solapamiento óptimos para el posterior procesamiento por parte del software seleccionado y el cálculo de índices.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan varios epígrafes en los cuales se abordan las características del área a sobrevolar, se evalúa mediante pruebas experimentales las condiciones de vuelo del UAV 3DR X8+ con la cámara Parrot Sequoia instalada. También se efectúa el análisis de los resultados alcanzados, realizándose comparaciones entre los diferentes vuelos realizados en cuanto a las resoluciones espaciales obtenidas en las imágenes del ortomosaico multiespectral. Se incluye además el análisis económico y medioambiental de los elementos requeridos para lograr el objetivo del proyecto.

3.1 Procedimiento para la toma de las imágenes multiespectrales y su posterior procesamiento.

Para la toma de imágenes multiespectrales y su posterior procesamiento se llevó a cabo el procedimiento que se muestra en la figura 3-1. Luego de la solicitud hecha por el cliente, se procede a estudiar el aérea de vuelo para tener conocimiento de las características del terreno a sobrevolar. Si las características del entorno no son favorables para realizar la misión, es decir si existen estructuras altas en comparación con la altura de vuelo requerida o es una zona de fuertes vientos (lugares cerca del mar), se le comunica al cliente y se termina la misión. Si el entorno cumple con los requisitos primeramente se analizan los requerimientos en cuanto a resolución espacial necesarios para la aplicación solicitada por el cliente y en función de esto se fijarán la altura, velocidad de vuelo y luego se traza el **Plan de vuelo** en el software Mission Planner. Se comprueba el estado del UAV y si algunos de sus componentes no están en buen estado, se valora la reparación en el terreno, si no es posible se termina la misión. Si es posible la reparación se corrigen los problemas técnicos y se vuelve a comprobar el UAV. Si todo está correcto se realiza el vuelo, luego de

la finalización del mismo las imágenes pasan a ser procesadas, se entregan los resultados al cliente y se concluye la misión.

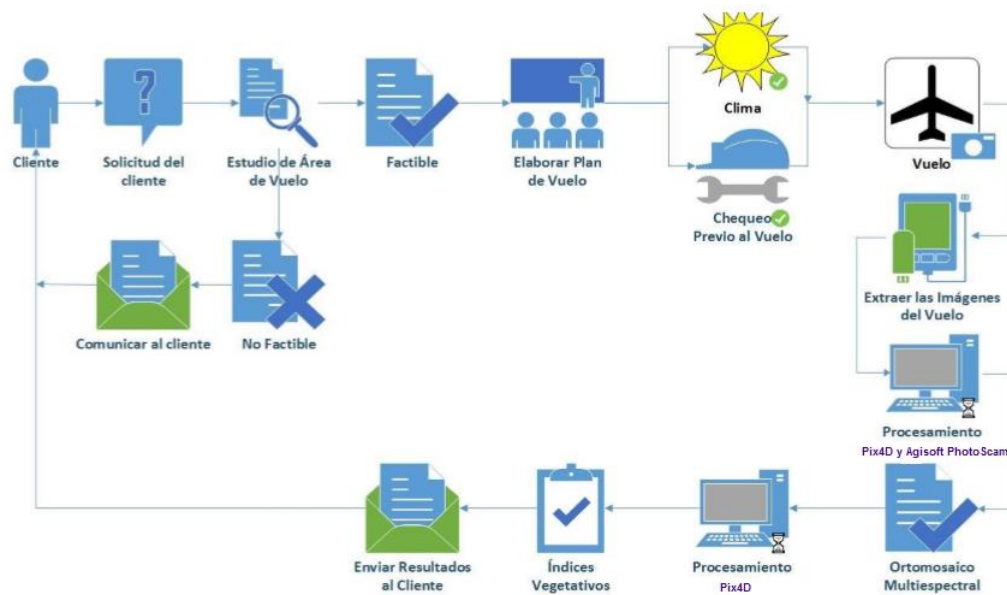


Figura 3-1: Procedimiento para la toma y posterior análisis de imágenes multiespectrales.

3.2 Planificación de la misión

Se realizaron los vuelos en un campo de retoño de caña (Ver figura 3-2) el cual presenta como característica que es una zona llana que posee una vegetación con escasa densidad boscosa y no presenta cables de transmisión eléctrica ni ningún otro impedimento que puedan obstaculizar la misión. La zona de estudio es la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (ETICA) Centro Villa Clara que se encuentra en el municipio de Ranchuelo, provincia de Villa Clara, en el Km 246 de la Autopista Nacional.

El propósito fundamental de esta institución es diseñar, validar y ejecutar proyectos de ciencia e innovación tecnológica que contribuyan a obtener producciones de caña de azúcar de más calidad y a menor costo, con criterios de sostenibilidad del agroecosistema y

Distance: 1.3312 km
 Prev: 236.86 m AZ: 63
 Home: 236.95 m

Waypoints

WP	Radius	Loiter Radius	Default Alt	Relative	Verify Height	Add Below	Alt Warn	Spline
24	DO_CHANGE_SPEED	0	6.5	0	0	0	0	0
25	LAND	0	0	0	0	22.416837	80.169183	0

Se actualizó la caché de las fotos de la zona de vuelo en el software *Mission Planner* y se trazaron las rutas de los diferentes vuelos.

La fecha en la cual se realizaron los vuelos fue el 4 de abril del 2017, a tempranas horas de la mañana porque en este horario las condiciones climáticas son las que más se acercan a las ideales debido a que, por lo general, en las mañanas no hay fuertes vientos. Los vuelos se realizaron a una altura de 40 m, 80 m y 120 m con un solape longitudinal del 80% y un solape transversal del 60% y a una velocidad constante de 6m/s. Estos solapes son los que permiten contar con la información necesaria para realizar la restitución fotogramétrica. Las condiciones de iluminación fueron buenas dado que fue un día soleado. Se comprobaron las condiciones del avión y de sus componentes como es requerido y se fueron cargando las misiones en la aeronave a medida que iban concluyendo los vuelos. Posteriormente, con las imágenes tomadas se construyeron con los softwares Pix4D y Agisoft PhotoScan los respectivos ortomosaicos RGB y multiespectrales, para así calcular diferentes variables de interés y establecer comparaciones entre los resultados obtenidos a partir de las condiciones de vuelo implementadas para la toma de imágenes.

3.3 Comparación entre los diferentes vuelos y análisis de los resultados

Posterior a la toma de las imágenes multiespectrales se pueden obtener, principalmente, dos resultados de gran interés técnico: ortofotografía y modelo digital de superficie (MDS). En ambos casos, la gran ventaja es la resolución obtenida directamente proporcional a la cámara empleada y a la altura de vuelo, frente a la ofrecida por los vuelos tripulados o imágenes de satélite.

En este subepígrafe se analizan los resultados de diferentes vuelos para determinar las condiciones bajo las que deben ser tomadas las imágenes. El montaje de las ortofotos se ha realizado mediante técnicas estereoscópicas convencionales, basadas en la superposición de imágenes aéreas a través del software de procesamiento de imágenes Pix4D y el Agisoft PhotoScan. La GSD de las ortofotos realizadas fue de 3 cm/pixel, 7 cm/pixel y 11 cm/pixel para el Sensor Multiespectral y de 1cm/pixel, 2cm/pixel, 3cm/pixel para el sensor RGB en función de las respectivas alturas de vuelo y las características técnicas de la cámara. Mediante el apoyo en puntos de control escogidos en el campo, y las correcciones de los datos aportados por la plataforma UAV se corrigen los desfases y se georreferencian las imágenes.

Vuelo I

El vuelo I se realizó a 40 metros de altura, a una velocidad de 6m/s con un tiempo entre disparos de 1.4 seg, velocidad del viento 1-2 m/s y dirección del viento NE. Se tomaron un total de 2425 imágenes. Se obtuvieron imágenes multiespectrales georreferenciadas con una GSD de 3 cm/pixel e imágenes RGB con una GSD de 1cm/pixel. El procesamiento de las imágenes RGB se realizó con el software Pix4D, usando la plantilla 3D Maps, pero no se muestran buenos resultados. Como se puede observar en la figura 3-2, están presentes varios huecos en la zona central de la ortofoto RGB debido a que no se logró el solape necesario con estas condiciones de altura y de velocidad de vuelo, en concordancia con los datos brindados por el fabricante (Tabla 2-1) donde se sugiere a esa altura y velocidad desactivar el sensor RGB.



Figura 3-2 Ortomosaico RGB correspondiente al Vuelo I.

Por otra parte, con este mismo grupo de imágenes, pero usando el software Agisoft PhotoScan se lograron construir un ortomosaicos RGB mucho más completo como se muestra en la figura 3-3, pero con igual número de deficiencias para aplicaciones de catastro que las presentadas por el software Pix4D.



Figura 3-3: Ortomosaico RGB con Agisoft PhotoScan, correspondiente al vuelo I.

A partir de estos resultados obtenidos se infiere que no es posible realizar con la cámara multiespectral Parrot Sequoia ortomosaicos RGB a 40 metros de altura y a una velocidad de vuelo de 6 m/s. Sin embargo, en la elaboración de ortomosaicos multiespectrales y mapas de índices, ambos softwares cumplieron las funciones necesarias a partir de estas condiciones de vuelo.

Vuelo II y III

Estos vuelos se realizaron a 80 m y 120 m de altura respectivamente y a una velocidad de 6m/s con un tiempo entre disparos de la cámara de 2.9 seg y 4.4 seg respectivamente, velocidad del viento 1-2 m/s y dirección del viento NE. Se obtuvieron imágenes multiespectrales georreferenciadas con una GSD de 7 cm/pixel e imágenes RGB con un tamaño de pixel de 2 cm/pixel para el vuelo II y correspondiente al vuelo III se obtuvieron imágenes multiespectrales georreferenciadas con una GSD de 11 cm/pixel e imágenes RGB con una GSD de 3 cm/pixel. En la figura 3-3 y figura 3-4 se muestran los ortomosaicos RGB correspondientes al vuelo II y III respectivamente.



Figura 3-3 Ortomosaico RGB correspondiente al vuelo II.



Figura 3-4 Ortomosaico RGB correspondiente al vuelo III.

Con el ajuste de la resolución, gracias a la altura de vuelo, el ortomosaico RGB obtenido puede tener múltiples aplicaciones: elaboración de mapas de relieve en cartografía, detección de problemas fitosanitarios con síntomas visibles, medición y análisis de incendios forestales, identificación y estudio de propiedades de la vegetación como

estimación de la biomasa, radiación absorbida. Siguiendo las mismas consideraciones de resolución para la generación de los ortomosaicos multiespectrales se hace posible analizar de manera satisfactoria el contenido de clorofila en los cultivos, así como el cálculo de índices normalizados de vegetación para resaltar el vigor vegetal (NDVI), analizar estrés hídrico, así como también en el caso de que se requiera discriminar las infestaciones de malas hierbas en estado fenológico temprano, es decir cuando presentan entre 2 y 6 pares de hojas, la resolución espacial requerida es de 1-6 cm/ pixel (Nebiker et al., 2016, García, 2015), por lo que para esta aplicación se pueden emplear los ortomosaicos multiespectrales que se obtuvieron a 40 m de altura con GSD de 3 cm/pixel. Por otra parte, se pudieran también predecir los niveles de rendimientos y proteína que se pueden lograr para algunos cultivo (Ginestet, 2014) ya que la resolución requerida es de 0.2 m/pixel y con las resoluciones multiespectrales obtenidas en este trabajo se hace posible esta predicción. Además también según (Aguilar-Rivera et al., 2012) se emplearon imágenes con resolución espacial entre 10-20 m/pixel para la identificación, evaluación y elaboración de cartografía del cultivo de caña de azúcar en "La Huasteca" México, predicción que se hace posible también con los resultados obtenidos en este trabajo. Sin embargo, en un estudio (Díaz et al., 2017) se dice que las manchas de roya naranja en la caña tienen un promedio de 2.39 mm de largo y 0.53 mm de ancho por lo que con las resoluciones obtenidas en los vuelos realizados no se hace posible la detección de estas manchas directamente en la caña.

Con estas condiciones de vuelo se lograron los objetivos de procesamiento propuestos, quedando a discusión con el usuario la selección de la altura de vuelo en relación con la resolución que se quiera obtener, todo en función de la aplicación que se quiera desarrollar.

Como se mostró en el Capítulo 1, epígrafe 1.3.1, la fotografía aérea tomada desde plataformas UAVs presenta ventajas en cuanto a la resolución espacial y temporal sobre las plataformas satelitales. Esto está dado por los períodos de re-visita casi quincenales de los satélites, sumado a la obvia vulnerabilidad de cualquier misión satelital ante la presencia de cobertura nubosa sobre la escena, los drones presentan una disponibilidad casi permanente ya que pueden capturar imágenes aún en días nublados sin inconvenientes.

En base a los resultados obtenidos, se observa que la fotografía aérea mediante la integración de sensores sobre plataformas UAV, presentan mejores resoluciones como se

muestra en la tabla 1-1 del Capítulo 1, menores costes asociados (a pequeña escala), mayor rapidez de disponibilidad de datos y mayor facilidad de ser replicables.

3.3.1 Índices Vegetativos

Se evaluó la calidad de las imágenes multiespectrales capturadas por la cámara Parrot Sequoia para generar índices de vegetación y relacionarlos con parámetros biofísicos del cultivo de la caña de azúcar. El software seleccionado en este proyecto para la generación de índices vegetativos fue el Pix4D. El mismo cuenta con varias herramientas poderosas que permiten el aprovechamiento de las imágenes multiespectrales generadas a partir del sensor Sequoia que cuenta con 4 bandas espectrales, la verde, la roja, borde rojo y la NIR.

Usualmente el índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel (Cervigón, 2015).

La vegetación verde y vigorosa refleja mucha menos radiación en la banda visible roja (banda R), región de absorción de la clorofila, que en la banda del infrarrojo cercano (banda IR), región de alta reflectancia del componente celulósico. Cuando la vegetación sufre estrés, los valores de la banda R aumentan y los de la banda IR decrecen. El cálculo de diferentes índices vegetativos permite interpretar la información de las imágenes NIR y RGB captadas mediante técnicas de fotogrametría, mostrando el NDVI el vigor de las plantas, el GNDVI el nivel de nitrógeno, el CWSI el nivel de estrés hídrico de las plantas y el SAVI un ajuste de los estudios agronómicos al tipo de suelo en las plantaciones entre otros (Jiménez, 2016). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es un concepto que integra el contraste de la alta absorbancia (baja reflectancia) de la banda roja (R) del espectro visible con la alta reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) mediante la ecuación:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (3.1)$$

Con las imágenes obtenidas en el vuelo III se construyeron, con los softwares Pix4D y Agisoft PhotoScan, los ortomosaicos, para así calcular las diferentes variables de interés,

establecer comparaciones entre los resultados obtenidos y comprobar la calidad de las imágenes bajo las condiciones de vuelo establecidas.

Se extraen las bandas espectrales a utilizar, como se muestra en la figura 3-4. Las bandas NIR y la Roja son las necesarias para los cálculos de NDVI.

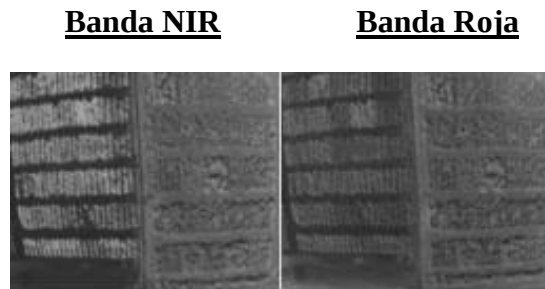


Figura 3-4 : Imágenes correspondientes a un disparo de la cámara Parrot Sequoia. (a) banda NIR, (b) banda roja.

En estas imágenes se puede apreciar la menor reflectancia de las plantas en el espectro Rojo, mayor reflectancia en el verde y siendo aún mayor en el NIR. La banda NIR es la fundamental en el cálculo de los índices, si la misma fuera modificada con colores se pudiera apreciar la variación a través del campo de la vitalidad de las plantas.

La tarea es crear una prescripción precisa para el campo sobre la base de estas variaciones con el cálculo de un índice de vegetación en este caso el NDVI. Se toman como referencias las imágenes tomadas del vuelo III que fueron procesadas por el software Pix4D. Los datos rojos e infrarrojos se combinan para crear el NDVI. La imagen de NDVI real es blanco y negro como se muestra en la figura 3-6.



Figura 3-6: Imagen NDVI en escala de grises correspondiente al vuelo III.

A menudo esta imagen se convierte en una imagen a color para facilitar su interpretación como se muestra en la figura 3-7. Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre resultan en un número que varía de -1 a 1. Sin embargo, si no hay hojas verdes da un valor cercano a cero. Un cero significa que no hay vegetación y cerca de 1 (0,8 - 0,9) indica la densidad más alta posible de hojas verdes.

Mediante el mapa de índice NDVI obtenido, se puede apreciar el vigor vegetal y los niveles de clorofila que se manifiestan en los cultivos de caña de azúcar. La correlación entre los valores de NDVI y el estado de salud de las plantas es alta, de manera tal que se muestran los mayores valores en las zonas más saludables, bajos valores en las zonas más afectadas y casi nulo en las zonas con carencia de vegetación.

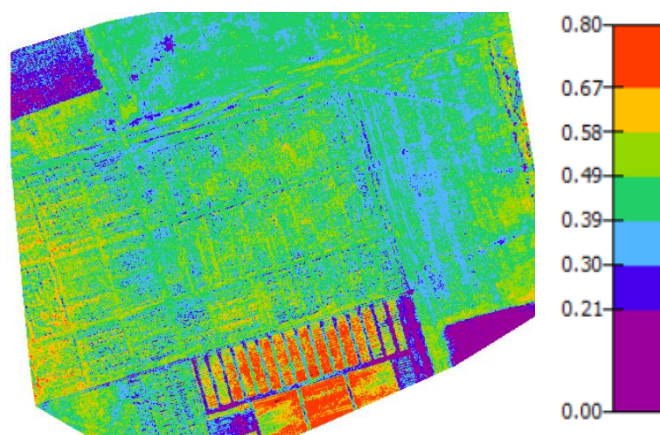


Figura 3-7: Mapa NDVI en escala de colores.

En este caso (Figura 3-7) las lecturas máximas de NDVI fueron de 0.80 estando la media por encima de 0.58 indicando un cultivo de caña saludable. También se puede apreciar la presencia de maleza en los surcos, la cual pudiera ser eliminada mediante la aplicación de herbicidas en las zonas de más alta reflectancia del pasto.

La menor superficie de alta productividad, correspondiente al nivel máximo de vigor vegetal de la zona de estudio está en la escala entre los valores 0.67 y 0.80, también se muestran valores de NDVI entre 0.2 y 0.3, considerado de nivel pobre a moderado, debido a que parte de la zona cañera se encontró en alto estrés hídrico (para caña de azúcar, el NDVI disminuye drásticamente cuando la disponibilidad de agua decrece, debido a la

variabilidad climática geográfica o debido a la sequía) y según autores como (Knop, 2007) y (Rahman and Hedayutul, 2004) para un dosel verde y totalmente desarrollado de caña de azúcar se registran datos de NDVI entre 0.7 y 0.8.

3.4 Evaluación de resultados obtenidos

Cuanto menor sea el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial (GSD). Las GSD obtenidas en esta investigación a partir de las condiciones de vuelo implementadas en el UAV permiten calcular diferentes índices de vegetación y así conocer el estado de los cultivos. Aunque es de resaltar que estudios puntuales sobre una determinada enfermedad requieren de una caracterización específica de la resolución necesaria para la detección de la misma.

Se obtuvieron ortofotos sin distorsiones ni huecos, a excepción de las imágenes tomadas a 40 m de altura y a velocidad de vuelo de 6 m/seg donde no se muestran buenos resultados después del procesamiento de las mismas cuando se obtienen los ortomosaicos RGB, sin embargo en la elaboración de los ortomosaicos multiespectrales se obtuvieron buenos resultados y es válido resaltar que el valor de la cámara Parrot Sequoia es fundamentalmente para la captura de imágenes multiespectrales y que la banda RGB es un valor agregado. De igual forma es válido destacar que el cálculo de índices vegetativos realizado con el Pix4D devuelve resultados más cercanos a la realidad gracias a la inclusión de la información de irradiación al momento de tirar las fotos.

3.5 Análisis económico y medioambiental

El uso de la fotografía aérea mediante el empleo de UAVs y la introducción nuevas herramientas tecnológicas, ha constituido un paso de avance en la práctica y desarrollo de la Agricultura de Precisión.

Esta investigación aporta un gran salto para la Agricultura de Precisión en nuestro país. Con un sensor multiespectral y un UAV con las condiciones de vuelo óptimas garantizadas se hace posible obtener imágenes de alta resolución que cuentan con un gran volumen de información para disimiles aplicaciones en la agricultura y a partir de la obtención de esta

información se hace posible la toma de decisiones que colaboren a disminuir el impacto medio ambiental y los costos productivos, propiciado por el tratamiento homogéneo con fertilizantes e insecticidas en las áreas cultivables. Por lo tanto, se entiende que se abren nuevas líneas de avance en la mejora continua del análisis de los recursos naturales, pudiéndose aplicar al sector forestal y agrícola técnicas antes prohibitivas por los costes asociados y la inoperatividad de sus resultados a escalas de gestión aplicables.

En la tabla 3.1 se muestran los costos de las herramientas fundamentales que se emplean para la realización de este proyecto.

Tabla 3.1. Relación de precios de las herramientas del proyecto.

Herramientas	Precio
El UAV y sus componentes	400 USD
PC portátil para trabajo en el campo	300 USD
Cámara Parrot Sequoia	3500 USD
Licencia de Software Pix4D	6500 USD
Licencia de Software Agisoft PhotoScam	4000 USD

Se tiene un costo total de 15100 USD.

Con esta propuesta se cuenta con una alternativa nacional para dar pasos en la aplicación de la Agricultura de Precisión, pudiendo ser perfeccionada la misma según los nuevos estudios que sean necesarios en los campos sin depender de los costos, las demoras de las importaciones y además podrá ser aplicada en sistemas de similares características.

3.6 Conclusiones Finales del Capítulo

El presente trabajo demostró que hay un gran potencial en la utilización de sistemas no tripulados (UAV) con sensores multiespectrales en el campo de la percepción remota aplicado al monitoreo e identificación de anomalías en cultivos.

También se demostró que con las condiciones de vuelo implementadas en el UAV 3DR X8+, las imágenes de la cámara Parrot Sequoia son útiles para generar mosaicos multiespectrales con los cuales se pueden calcular índices de vegetación como el NDVI.

Los productos obtenidos mediante la carga de sensores sobre plataformas UAV tienen mayor resolución, menor coste, mayor versatilidad y aplicabilidad que los obtenidos mediante métodos clásicos y posibilitan la aplicación de técnicas de Teledetección a escalas y costes que antes eran inalcanzables, posibilitando su aplicación en diferentes sectores.

El índice normalizado de vegetación NDVI demostró ser un parámetro eficaz para supervisar las condiciones del dosel de caña de azúcar, para posteriormente, vigilar la variabilidad temporal que determina la interacción del cultivo con otros factores agroclimáticos y, por lo tanto, modelar la productividad agrícola.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Durante el avance de esta investigación se estudiaron y evaluaron las condiciones de vuelo óptimas del UAV 3DR X8+ para la toma de imágenes multiespectrales con la cámara Parrot Sequoia. Los principales resultados obtenidos se exponen a continuación:

1. Las condiciones de operación más adecuadas para una correcta captura de las imágenes mediante el UAV son: clima soleado, vientos ligeros o en calma y una misión planificada con un solapamiento longitudinal del 80% y lateral del 60%.
2. Los requerimientos de resolución espacial estarán relacionados con la aplicación que se desee realizar y pueden ser variados a medida que se vuele a una altura u otra, ya que dependen directamente de los parámetros técnicos de la cámara y de la altura de vuelo del UAV.
3. Se realizó de manera satisfactoria la interconexión del UAV 3DR X8+ con la cámara Parrot Sequoia.
4. Las longitudes de onda adquiridas por los sensores monocromáticos de la Sequoia son adecuadas para el cálculo de los índices de vegetación asociados a la identificación de factores como: estimación de niveles de productividad en cultivos, clasificación de vegetación y análisis de su vigor, determinación de estrés por sequía o déficit de nitrógeno y detección de enfermedades.
5. Los sensores multiespectrales son la solución tecnológica más económicamente viable en la actualidad para la toma de imágenes a alta resolución espacial, siendo la cámara Sequoia de la firma Parrot una de las mejores opciones, dada su versatilidad y relación calidad-precio.

Recomendaciones

Para establecer la continuidad que debe tener este trabajo se recomienda:

1. Realizar análisis puntuales con los expertos en agronomía para determinar los índices y las resoluciones más adecuados para las aplicaciones agrícolas de mayor interés nacional.
2. Realizar experimentos similares a los descritos en esta tesis con la cámara Parrot Sequoia instalada en el UAV de ala fija X8 para comprobar si a las mismas alturas con una mayor velocidad de vuelo se pueden mantener los mismos resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MODULO + RECEPTOR 8CH FRISKY TELEMETRIA (F y H) [Online]. Available: <https://www.banggood.com/es/Latest-WiFi-Telemetry-Serial-Port-Module-for-APM-Pixhawk-Flight-Controller-p-1054831.html> [Accessed 20 de mayo, 2017].
2016. Sequoia Datasheet.
- ACOSTA, M. H. 2011. Aprobacion operacional de vuelo para un UAS.
- AGUILAR-RIVERA, N., MENDOZA, G. G. & MARTÍNEZ, J. F. 2012. Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México.
- ALLEN, M. J., RYAN, J. & PARLE, C. E. H. A. J. F. 2002. String stability of a linear formation flight control system. National Aeronautics and Space Administration. *Dryden Flight Research Center*.
- ARCOS, L. V. C. 2013. Programas de Maestría y Doctorado en Ingeniería Telemática Seminario de Investigación Sistema de Sensado Remoto para Agricultura de Precisión.
- BASSO, B. 2014. Curso Internacional de Agricultura de Precisión. *Perspectivas y avances del uso de UAV en AP en EE. UU.*
- BASTERRA, I. 2011. Teledetección-Imágenes Satelitales-Procesamiento Digital de Imágenes. *Departamento de Geociencias, Facultad De Ingeniería–UNNE, Chaco, Argentina*.
- BENNANI, S. & LOOYE, G. 1998. Flight control law design for a civil aircraft using robust dynamic inversion. In: Proceedings of the IEEE/SMC-CESA98 Congress, Tunisia.
- BERRA, E., GIBSON-POOLE, S. & MACARTHUR, A. 2015. Estimation of the spectral sensitivity functions of un-modified and modified commercial off-the-shelf digital cameras to enable their use as a multispectral imaging system for UAVs. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 207.
- BEST, S. 2012. Agricultura de precisión. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile).

- BRUCAS, D., BERTESKA, U. & VISOCKIENE, S. 2013. Implementation and Testing of Low Cost UAV Platform for Orthophoto Imaging. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 1, 230-239.
- CAMILI, L. 2015. EMERGING TECHNOLOGIES, APPLICATIONS, REGULATIONS, AND MARKET CHALLENGES IN THE CONSUMER AERIAL DRONE INDUSTRY. Conference: San Francisco State College of Business, At San Francisco.
- CERVIGÓN, J. J. D. 2015. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. . UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
- DIAZ, C. A. 2013. *Adquisición de imágenes de bajo costo aplicadas a la agricultura de precisión usando vehículos aéreos no tripulados* Universidad de San Francisco de Quito.
- DÍAZ, O. D. L. C. A., TERRY, I. A., LEMA, E. R., MUJICA, F. R. D., CRUZ, Y. G., ÁVALOS, B. L. V. & MELILLO, J. B. 2017. Caracterización de los síntomas de la roya naranja (*Puccinia kuehnii* (W. Kruger) E. J. Butler) en cuatro cultivares de caña de azúcar en Cuba. *Centro Agrícola* 44, No.2.
- DUNFORD, R., MICHEL, K., GAGNAGE, M., PIÉGAY, H. & TRÉMELO, M.-L. 2009. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 4915-4935.
- EMEKLİ, Y., BASTUG, R., BUYUKTAS, D. & EMEKLİ, N. Y. 2007a. Evluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. *Agricultural Water Management*, 205-212.
- EMEKLİ, Y., BUYUKTAS, D. & EMEKLİ, N. Y. 2007b. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. *Science Direct*, Vol.3, 205-212.
- GARCÍA, C. & HERRERA, F. 2015. Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil*, 25.
- GARCÍA, C. E. 2015. Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados.
- GARCIA, J. J. D. 2015. *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. . Trabajo Fin de Master, Universidad Complutense de Madrid.
- GINESTET, P. C. 2014. Estimación de rendimientos y contenido de proteína en el cultivo de Trigo Candeal mediante la utilización de sensores remotos. *Curso Internacional de Agricultura de Precisión*. 13. 2014 09 24-25, 24 y 25 de septiembre 2014. Manfredi, Córdoba. AR.
- GRANADO, F. L. 2011. Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research*, 51, 1-11.

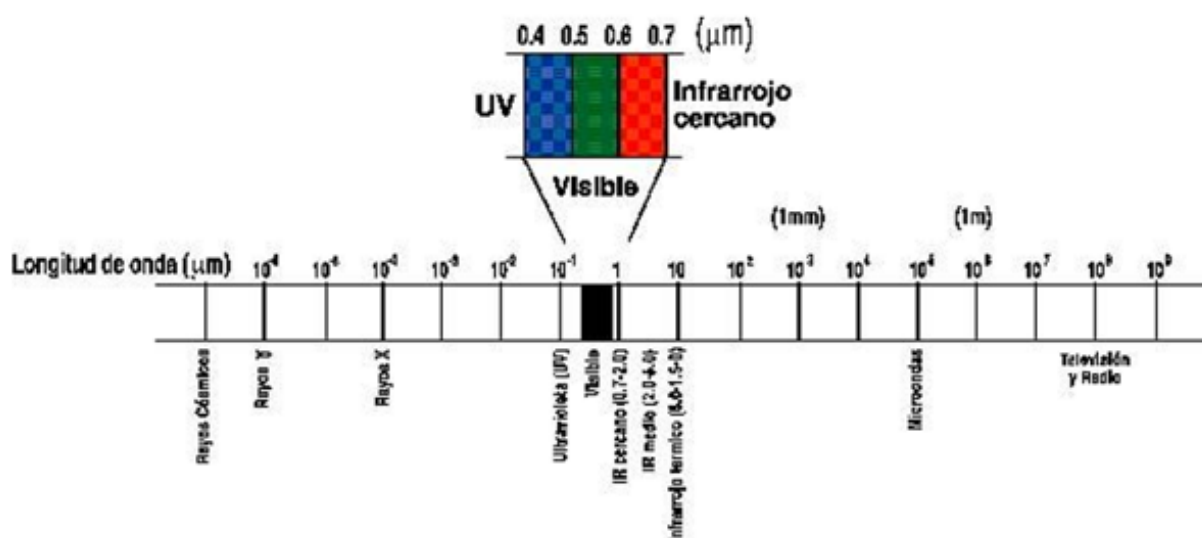
- GRANADOS, L. L. 2010. Sunflower yield related to multitemporal aerial photography, land elevation and weed infestation. *Precision Agriculture*, 5, 568-585.
- GRANKVIST, H. 2006. Autopilot design and path planning for a uav. *Defence and Security, Systems and Technology*, Swedish Defence Research Agency (FOI).
- HERNANDEZ, J. M. 2013. "Teledetección ambiental de alta resolución mediante aplicación de vehículos aéreos no tripulados. In: MARTIN, R. Y. (ed.). Chile.
- J.BAKER, D., GRANT, D., HAYDEN, H. & ELLSWORTH, J. 2003. The use of qualitative airborne multispectral imaging for managing agricultural crops- a case study in South- Eastern Australia. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 725_738.
- JANG, J. S. & TOMLIN, C. 2003. Longitudinal stability augmentation system design for the dragonfly uav using a single gps receiver. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA.
- JEUNETTE, M. N. & HART, D. P. Remote sensing for developing world agriculture: opportunities and areas for technical development. SPIE Remote Sensing, 2016. International Society for Optics and Photonics, 99980Y-99980Y-13.
- JIMÉNEZ, E. E. 2016. *Sistema de procesamiento de imágenes NIR e IR aéreas para agricultura de precisión*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Departamento de Automática y Sistemas Computacionales.
- KEMERER, A. T. 2007. Multi-temporal mapping of vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. In: CANDON, A. G. (ed.).
- KING, E. T. 2004. Distributed coordination and control experiments on a multi-UAV testbed. PhD thesis. Citeseer.
- KNOP, I. 2007. Precision agriculture options for the Australian sugarcane industry. *AM SRDC Technical Report 3/2007 Sugar Research and Development Corporation*, 124.
- LÄDERACH, S. 2015. Fernerkundung in der Agronomie mit Micro-UAV und neuen leichtgewichtigen Multispektralsensoren. *Masterthesis. Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz*.
- LANCASTER, R. 2004. *Formation flight autopilot design for the GAF Jindivik Mk 4A UAV*. PhD thesis. Citeseer.
- LASSO GARZÓN, F. X. 2015. *Aplicación de Tecnologías de Percepción Remota con Cámara Multiespectrales y Equipos de Vuelo no Tripulado en la Estimación de condición de cultivos*. Mexico/Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey/2015.
- LEE, K. 2004. Development of unmanned aerial vehicle (UAV) for wildlife surveillance. PhD thesis. University of Florida.

- LEO, D. & C., N. 2015. Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión.
- M., P. J., SÁNCHEZ, A. T. & GRANADOS, F. L. 2014. Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (uav). Vol.10.
- MARTÍN, I. R. 2016. Diseño y construcción de un Vehículo Aéreo no Tripulado para teledetección agroforestal.
- MICASENSEREDGE. 2017. Available: <http://easysshopdrone.com> [Accessed 1 marzo, 2017].
- MULLA, D. J. 2013. "Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps". *Biosystems Engineering*, 114, 358-371.
- MULTISPEC.(2016). *The multiSPEC 4C a multispectral sensor for agriculture* [Online]. Available: <http://www.airinov.fr/en/uav-sensor/agrosensor/> [Accessed 22 febrero, 2017].
- NEBIKER, S., LACK, N., ABÄCHERLI, M. & LÄDERACH, S. 2016. Light-Weight Multispectral Uav Sensors and Their Capabilities for Predicting Grain Yield and Detecting Plant Diseases. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 963-970.
- PROCTOR, C. & HE, Y. 2015. Workflow for Building a Hyperspectral Uav: Challenges and Opportunities. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 415.
- RAHMAN, M. R. & HEDAYUTUL, A. H. M. 2004. *NDVI Derived Sugar cane area Identification and crop condition Assessment*. [Online]. Available: <http://ftp.ida.liu.se/~746A27/Literature/NDVI%20derived%20sugar%20cane%20area%20identification.pdf> [Accessed 20 mayo, 2017].
- RIVERA, A. F. G. 2014. Agricultura De Precisión Y Sensores Multiespectrales Aerotransportados.
- SENSEFLY 2014. S110 RGB/NIR/RE Camera User Manual. .
- SUAREZ, L., TEJADA, P. J. Z., DUGO, V. G. & FERERES, E. 2009. Detección de estrés hídrico y calidad de fruto en cultivos mediante el índice PRI a partir de imágenes de alta resolución espacial. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección* 29-32.
- TAULE, M. D. P. M. D. L., MÉNARD, S. & K, P. J. 2012. L'imagerie multispectrale comme outil d'analyse et de diagnostic pour la productivité des sols en agriculture de précision.
- TETRACAM(2017A). *Cámara Multiespectral Tetracam ADC Micro* [Online]. Available: http://www.tetracam.com/Products-ADC_Micro.htm [Accessed 20 febrero, 2017].
- TETRACAM(2017B). *Tetracam Mini MCA* [Online]. Available: http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm [Accessed 24 febrero, 2017].

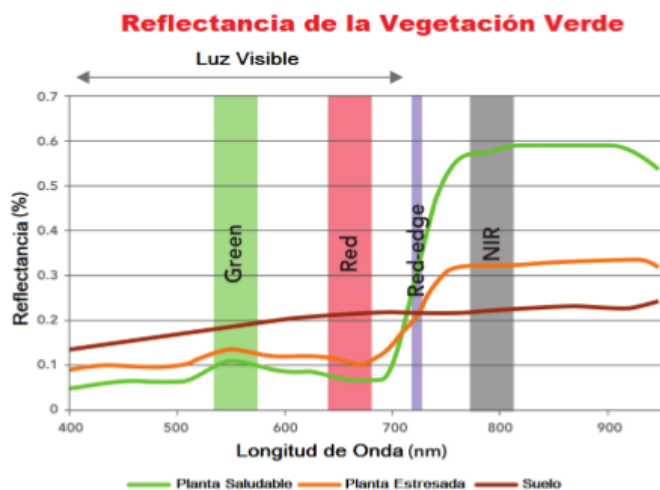
- TORRES, J., LOPEZ, F. & CASTRO, A. D. 2013. "Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management". *PLOS ONE*, 8, 1-16.
- TURNER, D., LUCIEER, A., MALENOVSKÝ, Z., KING, D. H. & ROBINSON, S. A. 2014. Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds. *Remote Sensing*, 6, 4003-4024.
- TURNER, D., LUCIEER, A. & WATSON, C. 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*, 4, 1392-1410.
- VILLAR, A. A. 2015. 3. TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.
- Z, S. B. I. 2008. Fundación para la Innovación Agraria. *Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión*, Vol.3.
- ZHANG, C. & KOVACS, J. M. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13, 693-712.

ANEXOS

Anexo I Espectro Electromagnético



Anexo II Reflectancia de la vegetación verde captada por el sensor Sequoia según el estado de las plantas.



Anexo III Puntos de control en el campo (GCP)

No.	Latitud	Longitud
1	-80.1686	22.4146
2	-80.1687	22.4149
3	-80.1688	22.4154
4	-80.1691	22.4153
5	-80.1690	22.4150
6	-80.1690	22.4147

No.	Latitud	Longitud
1	-80.10061	22.24972
2	-80.10186	22.25049
3	-80.10273	22.25023
4	-80.10248	22.24947

Anexo IV Ventana de navegación del Software Mission Planner



Anexo V Planificación de una misión final con waypoints y activadores de cámara.

