



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Geomática

**PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL  
MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL  
VANT PHANTOM 3 ADVANCED**

**Ing. Miguel Antonio Avila Mora**

Asesorado por la Msc. Licda. Sara Michelle Catalán Armas

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL  
MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL  
VANT PHANTOM 3 ADVANCED**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**ING. MIGUEL ANTONIO AVILA MORA**

ASESORADO POR LA MSC. LICDA. SARA MICHELLE CATALÁN ARMAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN GEOMÁTICA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Mtra. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Mtra. Gabriela María Domínguez
EXAMINADOR	Mtro. Marlon Antonio Pérez Türk
SECRETARIO	Mtro. Hugo Humberto Rivera Pérez



DTG. 375.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL VANT PHANTOM 3 ADVANCED**, presentado por el Ingeniero **Miguel Antonio Avila Mora**, estudiante de la **Maestría en Ciencias en Geomática** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, noviembre de 2020.

AACE/asga







Guatemala, Noviembre de 2020

EEPM-1374-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL VANT PHANTOM 3 ADVANCED”** presentado por el Ingeniero **Miguel Antonio Ávila Mora** quien se identifica con Carné **201043952** correspondiente al programa de **Maestría en Ciencias en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todas”*



**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
**Director**

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**






Guatemala, noviembre de 2020

EEPFI-1373-2020

Como Coordinador de la **Maestría en Ciencias en Geomática** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"PARÁMETROS FOTOGAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL VANT PHANTOM 3 ADVANCED"** presentado por el Ingeniero **Miguel Antonio Ávila Mora** quien se identifica con Carné **201043952**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

  
**Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Turk**  
**Coordinador de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**



Guatemala, Noviembre de 2020

EEPFI-1375-2020

En mi calidad como Asesora del Ingeniero **Miguel Antonio Avila Mora** quien se identifica con Carné **201043952** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL VANT PHANTOM 3 ADVANCED”** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Ciencias en Geomática** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*



**MSc. Licda. Sara Michelle Catalán Armas**

**Asesora**



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PARÁMETROS FOTOGRAMÉTRICOS Y DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA EL  
MONITOREO DEL ECOSISTEMA DE MANGLAR PACÍFICO DE GUATEMALA CON EL  
VANT PHANTOM 3 ADVANCED**

Tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 15 de junio de 2017.

**Ing. Miguel Antonio Avila Mora**





## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Universidad de San Carlos de Guatemala**

Centro de estudios académicos que ha contribuido a mi formación profesional y me brindó el conocimiento en tan importante ciencia.

### **Consultor TopoSIG**

Por su apoyo incondicional en la elaboración de esta investigación y poner a mi disposición el equipo fotogramétrico que permitió realizar la captura de todas fotografías utilizadas en la investigación.

### **Asesora**

Quien siempre estuvo al pendiente de mi investigación y demostró ser de gran apoyo profesional durante la elaboración de esta.

### **Compañeros**

Quienes durante el periodo de aprendizaje demostraron ser grandes profesionales que siempre estuvieron dispuestos a compartir su experiencia y conocimiento.



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN .....	IX
OBJETIVOS .....	XI
HIPÓTESIS .....	XIII
INTRODUCCIÓN .....	XV
1.ANTECEDENTES.....	1
2.MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Fotogrametría .....	7
2.2. Importancia de las fotografías aéreas .....	8
2.3. El uso de las fotografías aéreas .....	9
2.4. Fotointerpretación.....	9
2.5. Fotografía aérea .....	11
2.6. Características del punto principal en una fotografía aérea vertical ..	12
2.7. Proceso de toma de fotografías aéreas .....	15
2.8. Monitoreo forestal .....	17
2.9. El ecosistema de manglar .....	17
2.10. Vehículos aéreos no tripulados.....	18
2.11. Los vant Phantom 3 Advanced .....	20
2.12. Características destacadas .....	20

3.MARCO METODOLÓGICO .....	23
3.1. Área de estudio .....	23
3.2. Diseño experimental .....	23
3.3. Materiales y equipo .....	25
3.4. Método .....	25
3.5. Selección de vant.....	26
3.6. Selección de parámetros fotogramétricos .....	27
3.7. Diseño de plan de vuelo.....	27
3.8. Toma de fotografías aéreas .....	29
3.9. Alinear fotografías .....	29
3.10. Crear nube de puntos densa.....	30
3.11. Crear malla .....	30
3.12. Crear DEM.....	30
3.13. Crear ortomosaico .....	31
4.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	33
4.1. Matriz de parámetros fotogramétricos .....	33
4.2. Evaluación de parámetros fotogramétricos .....	34
4.3. Resultados finales.....	36
5.DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	39
CONCLUSIONES .....	43
RECOMENDACIONES .....	45
REFERENCIAS.....	47

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Exposición $\alpha$ toma de una fotografía aérea .....	12
2.	Características del punto principal en una fotografía aérea. ....	14
3.	Línea de vuelo en un par de fotografías aéreas continuas. ....	16
4.	Localización de tratamientos .....	24
5.	Proceso metodológico .....	26
6.	Plan de vuelo Phantom 3 Advanced.....	28
7.	Resultados del procesamiento fotogramétrico .....	37

## TABLAS

I.	Tratamientos .....	24
II.	Parámetros fotogramétricos evaluados .....	27
III.	Combinación de parámetros fotogramétricos .....	33
IV.	Resultados de procesamiento fotogramétrico.....	35
V.	Parámetros fotogramétricos de los tratamientos.....	36



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Eje angular
%	Porcentaje





## GLOSARIO

<b>DEM</b>	Modelo digital de elevación.
<b>DJI</b>	Casa de fabricación del vehículo aéreo no tripulado Phantom 3 Advanced.
<b>Ecosistema de manglar</b>	Ecosistema costero compuesto por una comunidad de plantas siempre verde, formada por árboles y/o arbustos halófitos, distribuidos en esteros, lagunas costeras y desembocaduras de ríos.
<b>INAB</b>	Instituto Nacional de Bosques de Guatemala.
<b>Ortofoto</b>	Representación gráfica de la realidad de un objeto espacial debidamente ubicado sobre un plano de referencia mundial.
<b>Plan de vuelo</b>	Línea imaginaria previamente establecida para realizar una misión fotogramétrica.
<b>REDD+</b>	Estrategia nacional para la reducción de emisiones de carbono por deforestación evitada, degradación de bosque e incremento de stock de carbono.
<b>SIG</b>	Software para manejo, visualización, análisis en interpretación de información de carácter espacial.

<b>Traslape</b>	Sobre posición de carácter longitudinal y transversal que existe entre un par o varios pares de fotografías.
<b>UAV</b>	Siglas en inglés para referirse a un vant ( <i>unmanned aerial vehicle</i> ).
<b>Vant</b>	Vehículo aéreo no tripulado.

## RESUMEN

Esta investigación basa sus principios en la fotogrametría digital, la cual consiste en obtener a través de fotografías aéreas modelos que permitan visualizar de una forma precisa la realidad de objetos espaciales que se encuentran dentro de un espacio geográfico.

Conocida como una técnica antigua y costosa para realizar tareas de agrimensura, es remplazada por nuevas tecnologías como los equipos convencionales de medición topográfica, los sistemas de información geográficos y el acceso libre de sensores remotos.

En la década de 2010 surgen los vehículos aéreos no tripulados Phantom 3 Advanced de la casa de fabricación DJI, como dispositivos de entretenimiento con fines de aplicación cinematográfica. Sin embargo, los rápidos avances tecnológicos desarrollaron distintas aplicaciones móviles y de escritorio en las que puede realizarse la planificación de vuelos según parámetros fotogramétricos como traslape longitudinal y transversal, altura de vuelo, velocidad de vuelo, corrección por reflejo solar, entre otros.

Esta investigación se basa en evaluar los distintos parámetros del vant Phantom 3 Advanced, estableciendo los que pueden ser utilizados para monitorear la cobertura forestal del ecosistema de manglar pacífico de Guatemala, garantizando la obtención de un modelo fotogramétrico de manera rápida y segura.



# OBJETIVOS

## General

Establecer los parámetros adecuados de traslape, altura y hora del día para la planificación de un vuelo fotogramétrico y la toma de fotografías en la zona del ecosistema de manglar pacífico con el vehículo aéreo no tripulado Phantom 3 Advanced.

## Específicos

- Evaluar diferentes alturas para la toma de fotografías aéreas en un levantamiento fotogramétrico del ecosistema de manglar pacífico.
- Evaluar la hora adecuada para la toma de fotografías aéreas en un levantamiento fotogramétrico del ecosistema de manglar pacífico.
- Evaluar el traslape necesario para la construcción de mosaicos y modelos del terreno al momento de tomar las fotografías aéreas en un levantamiento fotogramétrico del ecosistema de manglar.



## **HIPÓTESIS**

Puede el vehículo aéreo no tripulado Phantom 3 Advanced, ser una útil herramienta fotogramétrica, capaz de generar modelos de alta resolución que permitan visualizar e interpretar la cobertura forestal del ecosistema de manglar pacífico de Guatemala.





## INTRODUCCIÓN

El monitoreo forestal siempre se ha considerado como una dura tarea, en la que difícilmente puede tenerse un control absoluto de la dinámica y/o comportamiento de un bosque, a pesar de que existen diferentes técnicas para su control y monitoreo, algunas veces estas son de costos muy elevados o la zona forestal es de difícil acceso, como en el caso de los manglares por ser zonas inundables.

Estos factores demandan la búsqueda de nuevas formas o técnicas que puedan ser útiles en el monitoreo forestal y, al mismo tiempo, accesibles y efectivas para quienes deseen implementarlas. El acceso a dispositivos tecnológicos como *vant* y el desarrollo de aplicaciones móviles, brindan la oportunidad de satisfacer estas demandas técnicas, dando lugar a una nueva forma de realizar monitoreo forestal.

Los *vant* son dispositivos aéreos inteligentes que funcionan de forma automática por medio de un sistema de posicionamiento global por el cual puede configurarse una línea de vuelo. El diseño de vuelo es enviado vía wifi desde una tablet o móvil previamente diseñado en una aplicación portable en la que se puede establecer diferentes parámetros fotogramétricos como altura, velocidad de vuelo, traslapes y otros.

La casa de fábrica DJI ha desarrollado el *vant* Phantom 3 Advanced, plataforma aérea de cuatro hélices o cuadricóptero, con capacidad de vuelo automatizado; que incorpora dentro de su sistema una cámara de alta definición.

La plataforma es compatible con el manejo automatizado a través de aplicaciones fotogramétricas móviles.

El objetivo de esta investigación es evaluar la función fotogramétrica del vant estableciendo diferentes rangos en los parámetros del diseño de vuelo como: alturas entre 150-300 metros, traslapes entre 60-75 %, velocidad de vuelo, y hora del día adecuada. Al final se identifican los parámetros fotogramétricos adecuados que garantizan la obtención de una ortofoto y de un modelo digital del terreno de la cobertura del ecosistema de manglar pacífico de Guatemala.

## 1. ANTECEDENTES

Los vehículos aéreos no tripulados o *unmanned aerial vehicle* (UAV) por sus siglas en inglés y/o drones han sido utilizados en otros países como potentes herramientas de monitoreo de detección de cambios en el tiempo (Li, W., Sun, K., Li, D., Bai, T., y Sui, H., 2017), para obtener datos de pastizales en el sector agrícola, incendios forestales en el sector forestal, monitoreo de fisuras de edificios en ingeniería, entre otros, resultan ser una base fundamental que da lugar evaluar las capacidades de uso de la fotogrametría en el monitoreo forestal del ecosistema de manglar pacífico y la investigación forestal. Cada una de las publicaciones y aplicaciones científicas aquí descrita es importante para conocer los alcances de esta herramienta:

El vasto espacio de las áreas ocupadas por pastizales se encuentra en zonas muy remotas que muchas veces tienen un acceso imposible. Las ventajas de los UAV sobre los satélites y aviones es que son menos costosos y más seguros que los aviones pilotados; son flexibles en términos de altura y temporalidad de las misiones de vuelo; y pueden obtener las imágenes a alta resoluciones. Estas imágenes hiperespaciales permiten la cuantificación de la cobertura vegetal, la composición y estructura en múltiples escalas espaciales. El uso de ellos es directamente aplicable a organismos operacionales que se necesitan medir y monitorear (Hewson, J., Steininger, M. K., y Pesmajoglou, S., 2014).

Para llevar a cabo su uso se deben cumplir con varios requisitos: una plataforma asequible y fiable; con capacidad para vuelos a altitudes bajas; despegar y aterrizar en zonas rodeadas por terreno accidentado; y una toma de

datos de fácil aplicación metodológica. El número de procesamiento de imágenes y ortorectificación son desafíos abordados en la actualidad, pero el potencial para representar la superficie de la tierra acorde con las perspectivas de datos de campo a través de extensiones espaciales más amplias no tiene rival (Rangoa, A., Laliberte, A., Herrick, J., Winters, C., Havstad, K., Steele, C., y Browning, D., 2009).

- El monitoreo automático y mediciones de incendios forestales utilizando los drones se ha presentado como una lucha contra los mismos en la que el uso de esta herramienta juega un papel importante. El monitoreo del fuego se define como el cálculo en tiempo real de la evolución del frente de fuego y potencialmente otros parámetros relacionados con la propagación del fuego. La investigación demuestra cómo obtener automáticamente esta información por medio de cámaras de infrarrojos o visuales a bordo. Es importante hacer notar como el uso de varios de ellos pueden colaborar en las actividades de vigilancia de incendios, lo que permite cubrir los incendios de mayor extensión o para obtener puntos de vista complementarios de un incendio (Merino, L., de Olavide, P., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J., Maza, I., y Oller, A., 2010).
- Una encuesta basada en el uso de los drones para el seguimiento y gestión del tráfico ha demostrado ser una alternativa viable en la que se ejerce un menor tiempo para la supervisión y gestión del tránsito en tiempo real. Proporciona como solución a este problema el llamado ojo en el cielo (Kanistras, K., Goncalo, M., Matthew, J., y Kimon, V., 2012).
- El monitoreo de la erosión del suelo en Marruecos presenta una aplicación de teledetección ambiental utilizando un drone que está dirigido específicamente a reducir la brecha entre los datos a escala de campo y la escala satelital en monitoreo de erosión del suelo en Marruecos. Las

misiones de estos se llevan a cabo en diferentes sitios de estudio con diferentes extensiones y alturas con el fin de proporcionar datos específicos de muy alta resolución del sitio y un panorama general de menor resolución, para aprovechar al máximo el potencial del vehículo. Dependiendo de la escala y del área de cobertura, para la georreferenciación son utilizados los puntos de control terrestre basados en la alta precisión o el archivo de registro con valores de orientación exteriores respectivamente. El procesamiento fotogramétrico de estas fotografías permite la creación de modelos digitales del terreno y ortofotos con muy alta resolución (d'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Klaus, D. P., y Johannes, B. R., 2012).

- En Fraunhofer, Alemania un vehículo es utilizado para escanear edificios con el propósito de inspeccionar y vigilar con una cámara digital de alta resolución. Las fotografías tomadas son tratadas para obtener una completa imagen 2D a una alta resolución que permite observar daños y grietas. El software de procesamiento de imágenes ha permitido desarrollar patrones estadísticos específicos, que pueden ser analizados más lejos de un punto de reconocimiento visual (Eschmann, C., Kuo, C. M., Kuo, C. H., y Boller, C., 2012).
- Los datos recogidos a través del programa de monitoreo forestal comunitario pueden ser tan exactos como los reunidos por los científicos profesionales, pero adquiridos a un menor costo y capaces de proporcionar datos más detallados sobre la ocurrencia, magnitud y causas de la pérdida de bosques, la degradación y nuevo crecimiento a escala comunitaria. Por lo tanto, para contribuir al desarrollo de enfoques más eficaces para la ordenación forestal comunitaria, se evalúa la posibilidad de utilizar drones pequeños de bajo coste (es decir, vehículos aéreos a control remoto) en programas forestales comunitarios; sus posibles ventajas y desventajas para las comunidades, las organizaciones asociadas y los usuarios finales

de datos de los bosques; y en qué medida su utilización, junto con estudios sobre el terreno y el conocimiento ecológico local, mejoraría la vigilancia de los bosques tropicales. Creyendo que la utilización de pequeños aviones no tripulados puede mejorar la ordenación forestal comunitaria y que este enfoque es factible en muchos lugares en todo el trópico (Paneque Gálvez , J., McCall, M., Napoletano, B., Wich, S., y Kho, L., 2014).

- Vant de diversas formas, tamaños y funcionalidades han surgido en las últimas décadas, y sus aplicaciones civiles son cada vez más atractivas. El bajo costo, flexibilidad y la alta resolución de sistemas de teledetección que usan son importantes para llenar los vacíos de datos y complementar las capacidades de los sistemas de teledetección con tripulación (aviones tripulados y satélites). En este caso, se refiere a esta creciente iniciativa de la teledetección con sus ventajas únicas en la investigación y prácticas de silvicultura. En el estudio se resumen los diversos enfoques de teledetección en que puede ser aplicado, entre estos: cartografía, claros del dosel, medición de la altura del dosel, seguimiento de incendios forestales y apoyo a la gestión forestal intensiva. Los beneficios de la teledetección con vant incluyen bajos costos del material y de operación, control flexible de la resolución espacial y temporal, recopilación de datos de alta resolución y la ausencia de riesgo para las tripulaciones. Las aplicaciones forestales actuales de teledetección están todavía en una fase experimental, pero se espera que se expanda rápidamente. Para orientar mejor el desarrollo de la teledetección de la silvicultura sostenible con vehículos no tripulados, es importante llevar a cabo de manera sistemática y continua los estudios comparativos para determinar los parámetros remotos en la detección para diversas condiciones de los bosques y/o aplicaciones forestales (Tang, L., y Shao, G., 2015).

- El campo de la investigación y la gestión de la vida silvestre se beneficia de las innovaciones tecnológicas, como las técnicas de teledetección que ayudan a superar los retos de estudiar y monitorear fauna y flora. Los esfuerzos preliminares para aplicar el uso de los vehículos aéreos no tripulados en diversos estudios y disciplinas están aún por ganar terreno significativo en la práctica. Esta se logra por la presentación de un análisis detallado de las posibles aplicaciones de estos en todo el campo de la ciencia de vida silvestre con base en los resultados de una revisión sistemática de la literatura primaria. Los ejemplos proporcionados por estudios de caso, como las aplicaciones sugieren el potencial de largo alcance de los vehículos para el estudio de la vida silvestre (Chabot, D., y Bird, D. (2015).
- Los vant ofrecen una solución flexible, precisa y asequible a algunos de los retos técnicos de vigilancia y conservación de la naturaleza. Sin embargo, se ha prestado poca atención a sus posibles impactos sociales. La seguridad, privacidad, bienestar psicológico, seguridad de datos y la comprensión más amplia de los problemas de conservación, sostienen que los impactos sociales negativos son probables en algunas circunstancias y deben ser motivo de preocupación para la conservación, por dos razones: porque la conservación debe seguir las buenas prácticas de ética; y porque los impactos sociales negativos podrían socavar la eficacia de la conservación en el largo plazo. Un llamado a la investigación empírica establece si se producen riesgos sociales identificados por el uso de estos, la forma en que podría ser mitigado y la autorregulación del uso por el sector de la conservación para asegurar una buena práctica ética y minimizar el riesgo de consecuencias no deseadas (Sandbrook, C., 2015).





## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Fotogrametría

Etimológicamente, el término fotogrametría se deriva del griego y está formado por los siguientes tres vocablos:

- Photo: significa luz
- Gramma: significa lo grabado, lo dibujado, lo escrito
- Metrón: significa medir

Derivado de estas raíces griegas, el término fotogrametría significa: medir lo que ha sido grabado, dibujado o escrito a través de la luz (deAgostini, R., 1978).

También se define el término fotogrametría según la *American Society of Photogrammetry* como el arte, la ciencia y la tecnología que permite obtener información adecuada acerca de los objetos y del ambiente que nos rodea, mediante los procesos de grabar, medir e interpretar imágenes fotográficas y modelos impresos por medio de energía electromagnética, acústica y fenómenos magnéticos.

## **2.2. Importancia de las fotografías aéreas**

La importancia del uso y la aplicación de las fotografías aéreas se basan en la definición propia de la fotografía aérea, misma que se presenta desde dos puntos de vista:

- Desde el punto de vista práctico la fotografía aérea es la representación real de la superficie terrestre en el momento de la exposición o toma de la fotografía.
- Desde el punto de vista teórico la fotografía aérea es tomada desde el aire con un avión, helicóptero, globo aéreo o nave espacial, que registra información de la superficie terrestre u otro cuerpo celeste.

Partiendo de estos conceptos, la importancia de la fotografía aérea se resume en lo siguiente:

- Permiten observar un panorama espacial del conjunto de la situación real del terreno correspondiente a la fecha de la exposición o toma.
- Son útiles como archivo histórico, ya que la información puede ser guardada, revisada y actualizada en forma periódica, acorde con la escala de estudio.
- La información se puede obtener en diferentes tipos de película, época de año y a diferente escala.
- Su uso facilita planear el manejo y administración de los recursos naturales de la superficie terrestre (Caire, L., 1977).

### **2.3. El uso de las fotografías aéreas**

Las fotografías aéreas digitales, segmento de la teledetección, tienen amplia aplicación en el campo de la cartografía y la planeación del manejo integral y administración de los recursos naturales, pues permiten obtener a través de su uso información confiable en menor tiempo a diferencia de otros métodos de observación directa. Con lo cual se abaten costos y tiempo para la toma de decisiones de manera considerable.

La información de la superficie terrestre plasmada en las fotografías aéreas y su representación en mapas temáticos, planimétricos y topográficos ha sido una de las múltiples aplicaciones. Dentro su empleo también es importante mencionar que sirve para evaluar los usos y cobertura de la tierra (deAgostini, R., 1978).

### **2.4. Fotointerpretación**

Es el arte de analizar imágenes fotográficas a fin de identificar elementos o detalles de la superficie terrestre por reconocimiento y deducción, haciendo uso de los siguientes elementos o patrones de fotointerpretación: el tamaño, la forma, la sombra, el tono o color, la textura y la localización de los objetos representados en las fotografías.

- El tamaño o dimensión de los objetos. Por ejemplo, el tamaño de un edificio es diferente al tamaño de una casa. El espacio que ocupa una ciudad es diferente al espacio que ocupa un pueblo y de este es diferente al de ranchería. El área y la altura de un árbol es diferente al de un arbusto. La longitud y el ancho de un río es diferente al de un arroyo y otros.

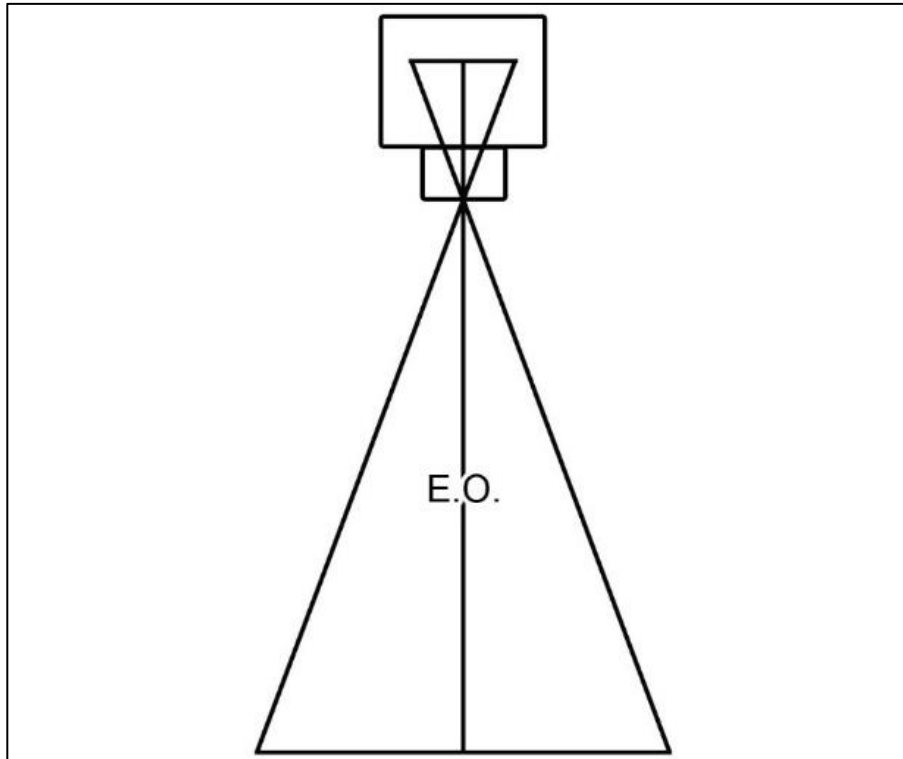
- La forma de los objetos. Por ejemplo, la forma del cauce de un río es diferente a la forma de cauce de un arroyo y diferente a la forma del cauce de un escurrimiento primario; la forma de la carretera es diferente a la de una vía férrea; la forma de la copa de un árbol del pino es diferente a la forma de la copa de un encino y diferente a la copa de un árbol de abies y otros.
- La sombra que proyectan los objetos. Por ejemplo, la sombra de un árbol es diferente a la que proyecta un poste y la que proyecta un edificio es diferente a la que proyecta una casa y otros.
- El tono o color, también llamado contraste. Por ejemplo; el tono en que se manifiesta el bosque es diferente al de un pastizal. El tono de una playa es diferente al de un terreno agrícola con vegetación y diferente al de un terreno erosionado y otros.
- La textura, definida como la frecuencia de cambio y disposición del tono o color, es originada por la agrupación de los objetos cuyos tonos son demasiados tenues para ser apreciados individualmente. El tamaño de los objetos, requerido para conseguir una determinada textura, varía con la escala de la fotografía. En escalas grandes, los árboles son vistos individualmente, sin embargo, sus hojas, aunque no se aprecien de manera separada, contribuyen a la textura de la copa. En escalas pequeñas, las copas de los árboles no se distinguen de manera individual, pero contribuyen a la textura en conjunto. Comúnmente se distinguen tres tipos de textura: fina, media y gruesa.

- La textura fina, representada en la fotografía aérea por el agua, la arena de playa, el aluvión, los depósitos lacustres y las tobas arcillosas, entre otros componentes.
- La textura media, se identifica comúnmente con los cultivos agrícolas.
- La textura gruesa, se relaciona con el bosque de coníferas, el bosque de hojosas.
- La localización, aquí se considera la relación que existe entre el objeto que aparece representado en la fotografía aérea y el medio ambiente. El drenaje superficial o red de avenamiento hidrológico, los cultivos, el tipo de vegetación y el uso de la tierra entre dos patrones, permiten relacionar, deducir o inferir una serie de elementos o características no visibles en la fotografía aérea. Un ejemplo de aplicación de este elemento de fotointerpretación, es relacionar el lugar geográfico donde se localizan los géneros vegetales *Salís*, *Taxodium* y *Abies*, ya que crecen y se desarrollan en lugares húmedos con suelos profundos, cerca de cañadas o ríos. Situación similar se presenta al asociar un cierto tipo de vegetación con un determinado tipo de clima y un tipo específico de fauna silvestre (Eugene, A., 1978).

## **2.5. Fotografía aérea**

Es aquella que ha sido tomada desde un avión, helicóptero, globo aéreo u otro vehículo espacial, de tal manera que el eje óptico de la cámara (E.O.) es sensiblemente vertical o perpendicular al terreno en el momento de la exposición o toma, ver figura 1 (deAgostini, R., 1978).

Figura 1. **Exposición  $\alpha$  toma de una fotografía aérea**



Fuente: elaboración propia.

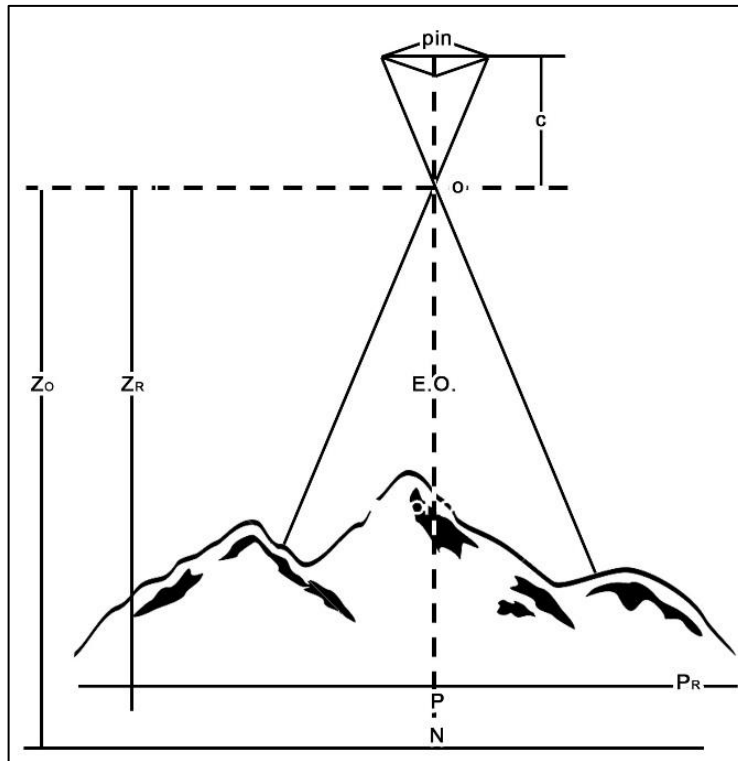
## 2.6. **Características del punto principal en una fotografía aérea vertical**

Es de suma importancia conocer las características del punto principal de la fotografía aérea vertical, ya que a partir de él se derivan varias relaciones geométricas que dan origen a fórmulas matemáticas. Entre las principales características del punto principal de una fotografía están:

- Físicamente, en la fotografía aérea vertical, el punto principal corresponde al punto donde se conjugan los puntos nadir  $n$ , isocentro  $i$  y el propio punto principal  $p$ .

- Independientemente de la topografía del terreno, el punto principal es el único punto ortogonal en la fotografía aérea, es decir, no tiene ningún desplazamiento respecto de la posición que ocupa en el terreno.
- El punto principal está definido en el plano focal por la intersección de la perpendicular al mismo, que pasa por el centro de proyección de la lente de la cámara.
- A partir del punto principal inicia la proyección central en la fotografía aérea y, por ende, el desplazamiento de las imágenes de los puntos del terreno fotografiados.
- A partir del punto principal los desplazamientos de las imágenes de los puntos del terreno fotografiados son directamente proporcionales en toda el área de cobertura de la fotografía aérea, es decir, entre más lejos del punto principal se encuentren las imágenes de los objetos, el desplazamiento es mayor ver figura 2 (Caire, L., 1977).

Figura 2. **Características del punto principal en una fotografía aérea**



Fuente: elaboración propia.

- La ubicación física del punto principal en una fotografía aérea vertical está definida por la intersección de las marcas fiduciales diametralmente opuestas.
- El punto principal es el único punto localizado en el centro de la fotografía aérea.
- Técnicamente su nomenclatura es PP, que indica punto principal (Caire, L., 1977).



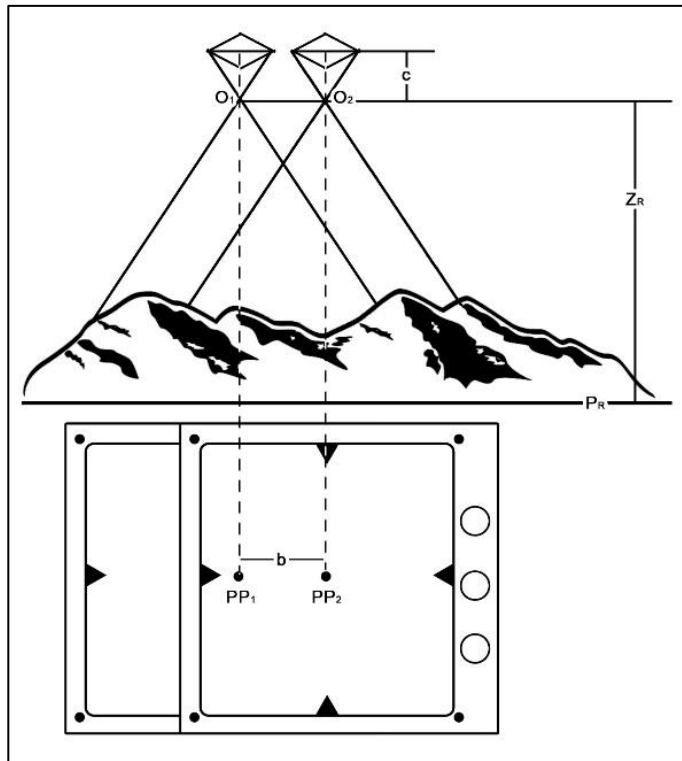
## **2.7. Proceso de toma de fotografías aéreas**

El proceso de toma de fotografías aéreas se define como la toma física de fotografías con el fin de llevar a cabo un cubrimiento aéreo fotográfico del terreno o área de estudio, a través de líneas o fajas de vuelo.

La línea de vuelo es la línea imaginaria que sigue el avión para tomar fotografías aéreas continuas, usualmente se traza sobre un mapa topográfico, la línea de vuelo une los puntos principales correspondientes a cada fotografía aérea. Físicamente al sobreponer un par de fotografías aéreas continuas de la misma línea de vuelo, la línea de vuelo que sigue el avión está definida por la línea que une los puntos PP1 de la fotografía aérea izquierda con el punto principal "PP2" de la fotografía aérea derecha.

Los elementos que intervienen y definen el proceso de toma de fotografías aéreas son: base aérea (B), base fotográfica (b), centro de proyección (O1, O2), distancia principal (c), altura del vuelo del avión sobre el plano de referencia (ZR), plano de referencia en el terreno (PR), puntos principales de las fotografías aéreas continuas (PP1 y PP2) ver figura 3 (Graham, R. y Read, R., 1986).

Figura 3. **Línea de vuelo en un par de fotografías aéreas continuas**



Fuente: elaboración propia.

El trazo y orientación de las fajas o líneas de vuelo en el terreno deben cumplir las siguientes condiciones:

- Trazar el menor número de líneas de vuelo, considerando el tamaño y la forma del área por volar, ya que esto repercute en el costo de vuelo.
- La orientación de las líneas de vuelo debe ser lo más paralela posible a los rasgos o líneas topográficas de terreno, a fin de lograr el mínimo de cambios de altura de vuelo del avión con respecto al terreno.
- Las líneas de vuelo deben ser continuas.

- En cada línea de vuelo las fotografías aéreas se obtienen en forma continua.
- A lo largo de cada línea de vuelo, entre una fotografía y otra continua, debe haber una sobreposición longitudinal aproximadamente de  $60 \% \pm 5 \%$ .
- Entre líneas de vuelo consecutivas las fotografías aéreas deben tener una sobreposición lateral, aproximadamente del  $30 \% \pm 5 \%$ .

La sobreposición, también llamada recubrimiento, se expresa en porcentaje (%), esta parte común entre fotografías aéreas se denomina modelo estereoscópico y se caracteriza porque es el único lugar donde se pueden observar las fotografías aéreas en tercera dimensión, tanto en sentido longitudinal como en sentido lateral (Graham, R. y Read, R., 1986).

## **2.8. Monitoreo forestal**

El monitoreo forestal tiene como finalidad recopilar información sobre los recursos forestales para la toma de decisiones políticas y el desarrollo de estrategias, programas y acciones para el manejo forestal sostenible (FAO, 2004).

## **2.9. El ecosistema de manglar**

Los ecosistemas de manglar al estar conformados por una gran variedad de especies, con importancia económica, social y ecológica al constituirse en elementos esenciales para el desarrollo de los ciclos reproductivos de especies marinas de relevancia económica para el sector pesquero; constituyen barreras naturales que regulan los procesos de erosión y sedimentación en las áreas marino costeras; evitan la salinización de los suelos, regulan los procesos

hidrológicos y mantienen la calidad del agua, constituyen un importante refugio de vida silvestre, amortiguan el efecto de los huracanes y ofrecen atractivos para una serie de bienes y servicios de diferente índole, que son la base para la subsistencia de asentamientos humanos ubicados en las zonas costeras. (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, 2013).

Para el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala (2013), los manglares proveen “hábitat y refugio a mamíferos e invertebrados, constituyen un área para la procreación de especies de aves, residentes y migratorias, muchas vulnerables o en peligro de extinción. A este ecosistema llega estacionalmente fauna terrestre y acuática” (p.7).

El mangle se encuentra conformado por especies vegetales, típicamente arbóreas, halófilas facultativas. Presentan adaptaciones fisiológicas estructurales que les permiten adaptarse a un sistema dinámico, estable y sujeto al efecto de las mareas. “En nuestro país los géneros más representativos son: *Rhizophora*, *Laguncularia*, *Avicennia* y *Conocarpus*” (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala, 2013).

## **2.10. Vehículos aéreos no tripulados**

Es una aeronave que vuela sin tripulación de uso civil, también usados en aplicaciones militares, donde son denominados vehículos aéreo de combate no tripulado (UCAV) por su nombre en inglés (Alcalá Baselga, E. y Blesa Gascón, A., 2014)

Con el fin de distinguirlos de los misiles, se definen como: un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción. Por tanto, los

misiles no son considerados vant porque, como la mayoría de los misiles, el propio vehículo es un arma que no se puede reutilizar, a pesar de que también es no tripulado y en algunos casos guiado remotamente (Alcalá Baselga, E. y Blesa Gascón, A., 2014).

Hay una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características en el diseño de estos. Históricamente estos vehículos eran simplemente aviones pilotados remotamente (en español: drones), pero cada vez más se está empleando el control autónomo. En este sentido se han creado dos variantes: algunos son controlados desde una ubicación remota, y otros vuelan de forma autónoma sobre la base de planes de vuelo preprogramados usando sistemas más complejos de automatización dinámica.

Cabe destacar que las aeronaves controladas remotamente en realidad no califican para ser llamadas como vant, ya que los vehículos aéreos pilotados remotamente (o por control remoto) se conocen como aeronaves radio controladas o aeronaves R/C; esto debido a que, precisamente, los vehículos son también sistemas autónomos que pueden operar sin intervención humana alguna durante su funcionamiento en la misión a la que se haya encomendado, es decir, pueden despegar, volar y aterrizar automáticamente. (Alcalá Baselga, E. y Blesa Gascón, A., 2014).

Actualmente, los vehículos militares realizan tanto misiones de reconocimiento como de ataque. Si bien se ha informado de muchos ataques con éxito, también son susceptibles de provocar daños colaterales y/o identificar objetivos erróneos, como con otros tipos de arma. Asimismo, son utilizados en un pequeño pero creciente número de aplicaciones civiles, como; en labores de lucha contra incendios, seguridad civil y la vigilancia de los oleoductos. Los vehículos aéreos no tripulados suelen ser preferidos para misiones que son

demasiado aburridas, sucias o peligrosas para los aviones tripulados (Alcalá Baselga, E. y Blesa Gascón, A., 2014).

### **2.11. Los vant Phantom 3 Advanced**

A continuación, se explicará en qué consisten:

El Phantom 3 Advanced representa la nueva generación de cuadricóptero DJI. Es capaz de capturar video con una resolución de 1080p y transmitir señal de video HD. La cámara tiene un estabilizador integrado para maximizar la estabilidad a la vez que minimiza tanto el peso como el tamaño. Incluso cuando no hay señal de GPS disponible, el sistema de posicionamiento de visión RADAR permite al vehículo planear de manera precisa en el lugar. (DJI, 2015)

### **2.12. Características destacadas**

- Cámara y estabilizador: el Phantom 3 Advanced puede grabar video en 1080p y hasta 30 fotogramas por segundo y hacer fotografías de 12 megapíxeles que son de mayor nitidez y resolución. Un sensor mejorado da mayor claridad, menos ruido y mejores fotos que ninguna otra cámara antes usada en estas plataformas (DJI, 2015).
- Enlace video HD: el enlace HD de baja latencia y rango largo está impulsado por una visión mejorada de DJI Ligthbridge (DJI, 2015).
- Batería inteligente de vuelo: DJI de 4480 mAh incluye 4 celdas actualizadas y un sistema de gestión de energía avanzado (DJI, 2015).

- Controlador de vuelo: de nueva generación ha sido actualizado para ofrecer una experiencia de vuelo más segura y fiable. Un nuevo grabador de vuelo implementando almacena los datos críticos de cada vuelo y el sistema de posicionamiento de visión mejora la precisión del plan de vuelo cuando se vuela conectado a la doble frecuencia del sistema de navegación (DJI, 2015).





### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Área de estudio

En 2012 Guatemala contaba con 20,787.73 hectáreas de cobertura forestal del ecosistema de manglar en la costa pacífica, distribuida de la siguiente manera: mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) 4,439.06 hectáreas, mangle de botoncillo (*Conocarpus erectus*) 213.25 hectáreas, mangle negro (*Avicennia germinans*) 967.07 hectáreas y mangle rojo (*Rhizophora mangle*) 15,168.35 hectáreas (Catalán, M. 2014). Las diferentes especies, estado y estructuras del mangle son variables importantes que se tomaron en cuenta para la selección de tratamientos (Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Vilijanen, N., Hakala, T., Yu, X., Tommaselli, A. M., 2017).

#### 3.2. Diseño experimental

Los tratamientos seleccionados para la investigación (ver tabla 1 y figura 4) se encuentran distribuidos a lo largo de la cobertura forestal del ecosistema de manglar pacífico de Guatemala, tomando como base el mapa publicado en 2015 a través del sensor remoto *RapidEye* (Catalán, 2014). Además, se trabajó de cerca con la regional IX: costa sur del INAB, quienes compartieron datos de parcelas permanentes establecidas dentro de los manglares; compartiendo su experiencia, apoyo y seguimiento a lo largo de la investigación.

La unidad mínima como área tomada en cuenta en el diseño experimental fue de 45 hectáreas, en cada tratamiento fueron realizadas 4 combinaciones de parámetros fotogramétricos (ver tabla II) y cada uno de los vuelos fue realizado

dos veces en cada tratamiento en distintas fechas del año con el fin de validar de manera correcta la obtención del ortomosaico y los modelos digitales del terreno (Meng, X., Shang, N., Zhang, X., Li, C., Zhao, K., Qiu, X., y Weeks, E, 2017).

Tabla I. **Tratamientos**

No	Tratamiento	Área (ha)	Descripción
1	Paredón Buena Vista	47.88	Área natural
2	Iztapa	58.46	Área protegida
3	Hawaii	57.48	Parcela de monitoreo INAB
<b>Total</b>		<b>163.83</b>	

Fuente: elaboración propia.

A pesar de definir en la investigación un área de 45 hectáreas, es importante mencionar que debido a la altura de vuelo siempre puede obtenerse un extra de información alrededor de los límites del polígono establecido, información fotogramétrica útil que puede ser utilizada e incluido dentro de los mosaicos y modelos del terreno finales.

Figura 4. **Localización de tratamientos**



Fuente: elaboración propia, obtenido de QGIS.

### **3.3. Materiales y equipo**

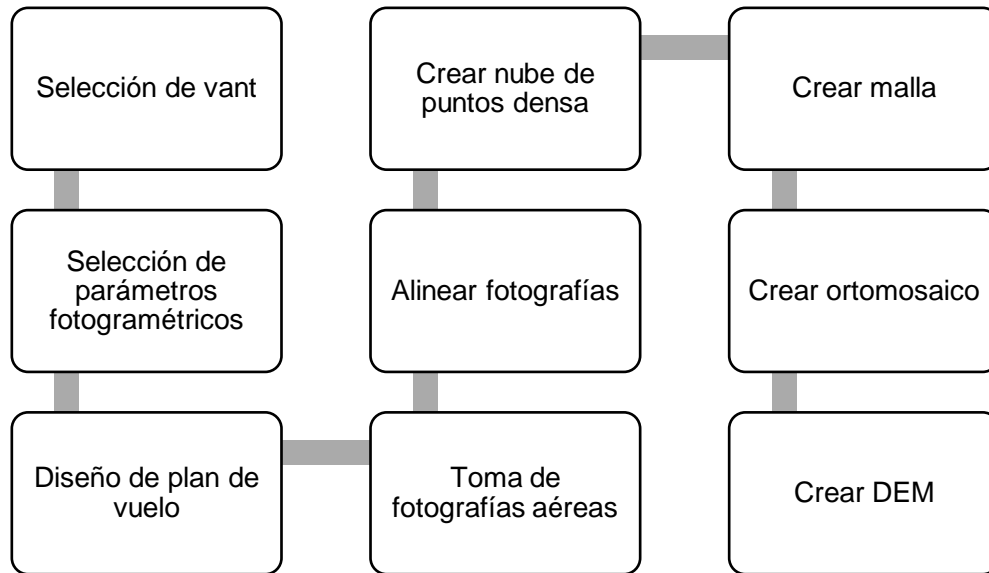
Para efectos de esta investigación se hizo uso de los siguientes materiales y equipos:

- Vant: Phantom 3 Advanced
- Tablet (compatibilidad con vant)
- Micro SD de alta gama (almacenamiento interno de vant)
- Boletas de campo (registro de datos)
- Asistente de vuelo
- Equipo de cómputo (capacidades medias)
- Conexión a internet
- Automóvil (transporte para acceder a tratamientos)
- Software para diseño de plan de vuelo
- Software de procesamiento fotogramétrico
- Software GIS (análisis y visualización de resultados)

### **3.4. Método**

Consiste en la obtención de modelos estereoscópicos a partir de la toma de fotografías con el vant Phantom 3 Advanced, evaluando los parámetros fotogramétricos: hora del día (luz), altura y traslape en tres distintos tratamientos, con el objetivo de identificar los parámetros que garanticen la obtención de un modelo útil para el monitoreo del ecosistema de manglar de la costa pacífica de Guatemala. La figura 5 muestra el proceso metodológico utilizado.

Figura 5. **Proceso metodológico**



Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Selección de VANT

Hoy en día existe una variedad de VANT de diferentes capacidades, diseños y costos en el mercado, desde pequeños juguetes para niños o especializados vehículos utilizados por ingenieros en distintos campos profesionales. Los VANT son herramientas que permiten la obtención de datos a una escala muy baja y en un periodo de tiempo establecido por el usuario (Jaud, M., Dantec, N. L., Ammann, J., Grandjean, P., Constantin, D., Akhtman, Y., Merminod, B., 2018).

La casa de DJI se ha especializado en la construcción de VANT de manera comercial y profesional teniendo un importante impacto a nivel global. El Phantom 3 Advanced (DJI, 2015) fue introducido en Guatemala como una herramienta fotográfica y de entretenimiento con un costo accesible en el mercado, este

cuenta con características muy tecnológicas como es un sensor de posicionamiento global de doble frecuencia, un estabilizador de radar ubicado en la parte inferior, una cámara RGB de 1080 megapíxeles y la función de vuelos automatizados. Todas estas características posicionan a este vehículo como una potencial herramienta que puede ser utilizada en el monitoreo forestal (Chen, S., McDermid, G. J., Castilla, G., y Linke, J., 2017).

### 3.6. Selección de parámetros fotogramétricos

Para elaborar un modelo fotogramétrico digital es necesario contar con los parámetros de vuelo adecuados, muchas veces estos parámetros se encuentran estrictamente ligados al objetivo que se desea investigar, su calidad da lugar a representar distintos objetos espaciales de la tierra en tercera dimensión (Leduc, M., y Knudby, A. J., 2018) y permiten observar detalles según la escala que sea necesaria. Para evaluar el funcionamiento en tareas de fotogrametría del Phantom 3 Advanced se han seleccionado los siguientes parámetros (ver tabla II) por evaluar en sus distintas conjugaciones.

Tabla II. **Parámetros fotogramétricos evaluados**

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
<b>Altura</b>	150-230 metros
<b>Traslape</b>	60-75 %
<b>Hora del día</b>	6:00-17:00

Fuente: elaboración propia.

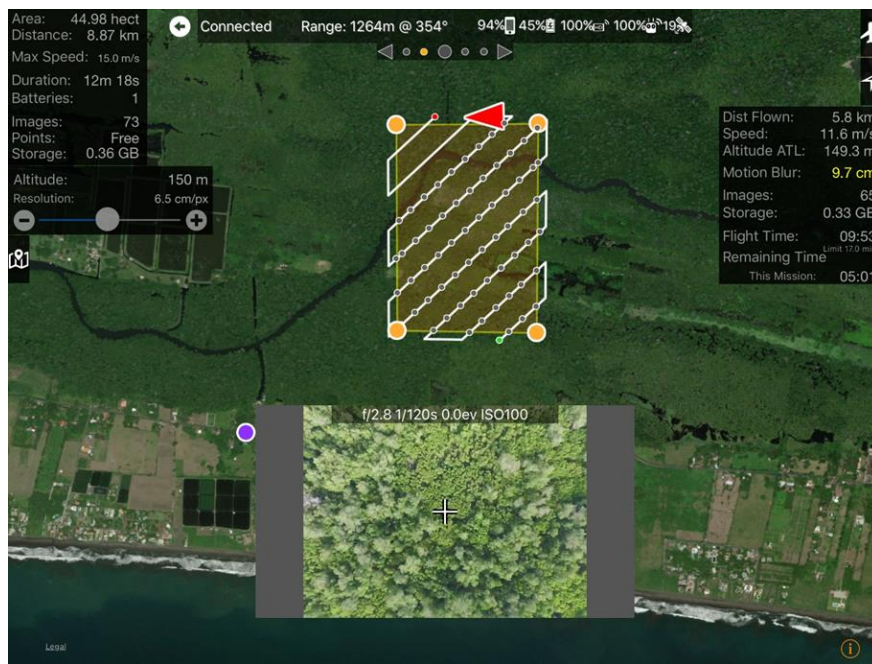
### 3.7. Diseño de plan de vuelo

Actualmente existe una gran variedad de softwares y aplicaciones móviles que permiten diseñar planes de vuelo, en algunos casos unas aplicaciones son más especializadas que otras y pueden encontrarse también aplicaciones

profesionales desde costos bajos hasta costos muy altos. El diseño de un plan de vuelo es importante para la obtención de modelos estereoscópicos, es importante mencionar que este se encuentra estrictamente ligado a los parámetros fotogramétricos, por lo que una buena combinación puede dar como resultado la obtención de los modelos fotogramétricos.

Un plan de vuelo no es más que una línea imaginaria que recorre el VANT durante la misión, en la cual se toman fotografías según los parámetros establecidos. La figura 6 muestra en color blanco la línea de vuelo que debe seguir el VANT a lo largo de la misión realizada. Además de obtener datos importantes como: el área total de interés, la distancia que recorrerá el VANT en toda la misión, el número de baterías que necesita para realizar la línea de vuelo, el tamaño del pixel, entre otros datos importantes que son de utilidad al momento de diseñar un plan de vuelo.

Figura 6. Plan de vuelo Phantom 3 Advanced



Fuente: elaboración propia, obtenido de MapPilot.

### **3.8. Toma de fotografías aéreas**

Este proceso consiste en la visita de campo, en la cual se realiza de forma automatizada el plan de vuelo previamente diseñado, una ventaja importante de esta herramienta es que puede realizarse efectivamente a una distancia de un kilómetro por lo que no es necesario acceder directamente al área de estudio.

Otra ventaja de realizar la toma de fotografías con el Phantom 3 Advanced, es que no es necesario contar con una pista de despegue y aterrizaje, esto debido a sistema de cuatro motores que hacen despegar el vehículo de forma vertical, siendo necesario únicamente una vista clara hacia el cielo (de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., y López-Granados, F., 2018). Este tipo de despegue y aterrizaje permite dominar el VANT en condiciones extremas, como usarlo dentro del canal sin problema.

### **3.9. Alinear fotografías**

Este proceso es realizado por el software de procesamiento fotogramétrico, en el cual el programa busca dentro de todas las imágenes a través de los traslapes puntos de coincidencia. Este proceso puede realizarse en diferentes intensidades como: bajo, medio, alto y máximo. La idea de evaluar las capacidades del Phantom 3 Advanced consiste en llevar este proceso de la manera más rápida garantizando la obtención de un modelo fotogramétrico de la cobertura del ecosistema de manglar pacífico que sea útil para su monitoreo (Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., y Sousa, J. J., 2017).

### **3.10. Crear nube de puntos densa**

La construcción de la nube de puntos densa identifica de manera más profunda puntos de coincidencia a través de la estereoscopia de los traslapes, generando una nube de puntos densa con valores X, Y y Z en la que puede verse en tercera dimensión la realidad espacial de un objeto o área de estudio (Nevalainen *et al.*, 2017).

### **3.11. Crear malla**

La obtención de la malla es el enlace triangular entre la nube de puntos densa (Forlani *et al.*, 2018), en la cual el programa se encarga de enlazar cada punto a los puntos cercanos, para calcular estadísticamente las diferencias de alturas que pueden existir dentro de la nube de puntos densa. Una vez obtenida la nube de puntos densa es posible a través de un análisis de triangulación clasificar los diferentes niveles de la nube de puntos logrando obtener como resultados un modelo digital del terreno y un modelo digital de superficie.

### **3.12. Crear DEM**

El modelo digital de elevaciones se obtiene de los datos fotogramétricos, este se representa en formato GEOTIF, el cual se compone por celdas o píxeles calculados a partir de la creación de la malla. El DEM da lugar a la creación de dos modelos: modelo digital del terreno el cual elimina todos los objetos que se encuentran sobre el suelo dejando únicamente como su nombre indica la tierra como tal, y el modelo digital de superficie que a diferencia del modelo digital del terreno incluye todos los objetos espaciales como copas de árboles, casas, entre otros. Por último, es importante aclarar que la precisión de los modelos puede mejorar haciendo usos de puntos de control de campo (Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Morra di Cella, U., Roncella, R., y Santise, M, 2018).



### **3.13. Crear ortomosaico**

El ortomosaico es obtenido de la combinación de todas las fotografías, generando una única imagen georreferenciada del total de fotografías tomadas en campo; este producto se visualiza en dos dimensiones únicamente, pero puede ser representado en tercera dimensión si este es combinado con un modelo digital.

Además el ortomosaico es la representación de la realidad del espacio estudiado, es decir, que según la escala del producto, es posible visualizar todos los elementos y objetos espaciales, pudiendo elaborar una cartografía actualizada, visualizar cambios en el entorno tales como pérdidas de cobertura forestal, monitorear el crecimiento de plantaciones, identificar especies, identificar zonas urbanas (Li, Sun, Li, Bai y Sui, 2017), delimitar cuencas, obtener curvas de nivel, visualizar caminos, identificar postes de luz, entre otros (Meng, X., Shang, N., Zhang, X., Li, C., Zhao, K., Qiu, X., y Weeks, E., 2017).



## 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Matriz de parámetros fotogramétricos

Para evaluar las capacidades del vant Phantom 3 Advanced se realizaron las combinaciones de parámetros fotogramétricos que se describen en la tabla III.

Tabla III. **Combinación de parámetros fotogramétricos**

Tratamiento	Área (ha)	Descripción	Parámetros altura/traslape	Repetición por tratamiento	Hora del día
<b>Paredón Buena Vista</b>	47.88	Cobertura de manglar	150/60, 230/60, 150/70, 230/70	2	6:00 - 17:00
<b>Iztapa</b>	58.46	Área protegida	150/60, 230/60, 150/70, 230/70	2	6:00 - 17:00
<b>Hawaii</b>	57.48	Parcela de monitoreo INAB	150/60, 230/60, 150/70, 230/70	2	6:00 - 17:00

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros seleccionados se basan principalmente en las capacidades tecnológicas del VANT; es decir, en sus capacidades autónomas y de vuelo, cubriendo un área del ecosistema de manglar pacífico de 45 hectáreas, que puede ser obtenida a través del consumo de una sola batería que tiene en promedio una duración de tiempo efectiva de 15 minutos (DJI, 2015).

La hora del día es un parámetro fotogramétrico importante que depende exclusivamente de las condiciones ambientales de la zona a muestrear, por lo tanto, una manera fácil de solventar las condiciones de luz del día, es activando la función de ajuste de velocidad por condiciones climáticas, el cual de manera automática indicará al VANT a qué velocidad es conveniente volar si las condiciones de luz no son las adecuadas. Es recomendable y efectivo que el VANT no reduzca la velocidad por debajo de los 10 m/s, pues un valor menor a este no permite captar con una sola batería el área total de 45 hectáreas.

Sin embargo, dentro de las capacidades del VANT está el volver al punto donde se finalizó el primer vuelo por lo que el usuario puede optar por utilizar una velocidad menor si cuenta con más baterías, que de igual manera garantizarán la obtención de un modelo fotogramétrico del ecosistema de manglar pacífico.

#### **4.2. Evaluación de parámetros fotogramétricos**

Los resultados obtenidos de los vuelos realizados con el VANT Phantom 3 Advanced, en cada una de los tratamientos y sus repeticiones se describen en la tabla IV, es importante dejar en claro que cada uno de los planes de vuelo fue procesado dentro del software fotogramétrico con las especificaciones más bajas, lo cual tomó un promedio de 15 minutos para obtener los productos ortomosaicos y modelos digitales del terreno.

Tabla IV. Resultados de procesamiento fotogramétrico

Tratamientos	Parámetros							
	150/ 60	150/ 70	230/ 60	230/ 70	Repetición: 150/60	Repetición: 150/70	Repetición: 230/60	Repetición: 230/70
Paredón Buena Vista	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Iztapa	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Hawaii	X	✓	✓	✓	X	X	X	✓
<b>Resultados</b>	1/3	3/3	3/3	3/3	1/3	2/3	2/3	3/3

Fuente: elaboración propia.

Según los resultados presentados en la tabla IV, se puede notar que los parámetros 230/70 fueron efectivos en los tres tratamientos y en las tres repeticiones, obteniendo un modelo con el 100 % de garantía en un proceso que no toma más de 15 minutos. Luego le siguen los parámetros 230/60 con un solo modelo en el tratamiento de Hawaii que no pudo procesarse correctamente.

Los planes de vuelo donde se utilizó el parámetro de altura de 150 se pudieron obtener del traslape de 70 %, cinco de seis vuelos y en el traslape de 60 %, únicamente dos de seis vuelos realizados en los distintos tratamientos. Es así como notamos que el traslape de 70 % es efectivo en ambos casos pero que una altura de 230 metros aumenta la probabilidad de obtener un modelo fotogramétrico de la cobertura de manglar.

### 4.3. Resultados finales

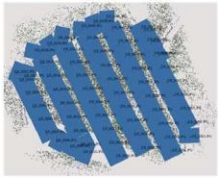

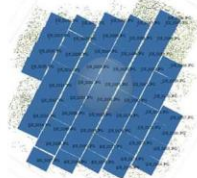








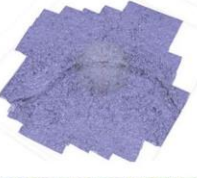
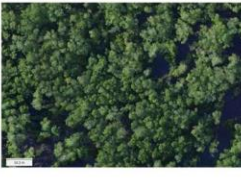


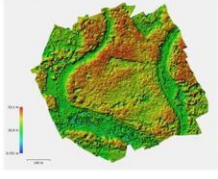
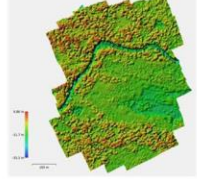
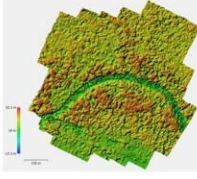
Las características del modelo fotogramétrico con el 100 % de efectividad con parámetros 230/70 se describen en la tabla V y los resultados gráficos se muestran en la figura 7, para cada uno de los tratamientos.

Tabla V. **Parámetros fotogramétricos de los tratamientos**

Parámetro	Tratamiento		
	Paredón Buena Vista	Iztapa	Hawaii
Área	46.55 ha	45.00 ha	46.42 ha
Distancia	7.02 km	7.22 km	6.78 km
Duración	11 min 35 s	11 min 49 s	11 min 19 s
Baterías	1	1	1
Imágenes	58	56	56
Almacenamiento	0.29 GB	0.28 GB	0.28
Altura	230	230	230
Traslape	70	70	70
Velocidad	15 m/s	15 m/s	15 m/s
Tamaño de pixel ortomosaico	10.0 cm	10.0 cm	10.0 cm
Tiempo de procesamiento	17 minutos	14 minutos	14 minutos

Fuente: elaboración propia a partir de datos parámetros fotogramétricos.

Figura 7. Resultados del procesamiento fotogramétrico

Proceso	Paredón Buena Vista	Iztapa	Hawaii
Línea de vuelo			
Alineado de fotografías			
Nube de puntos densa			
Malla			
Ortomosaico			
DEM			

Fuente: elaboración propia.





## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El vant Phantom 3 Advanced es una herramienta bastante útil para el monitoreo del ecosistema de manglar, en todo momento la seguridad y desempeño del vehículo fue estable, sin importar las altas temperaturas y salinidad del ambiente costero por lo que el vehículo nunca requirió de un trato especial más que los servicios de limpieza correspondientes.

La ingeniería, diseño y tecnología permiten que pueda ser utilizado en situaciones difíciles, por ejemplo en manglar puede hacerse uso del mismo entre los canales, ya que este puede despegar y aterrizar de manera muy fácil en un solo punto sin necesidad de contar con una pista de despegue y aterrizaje, también puede hacerse vuelos a distancia por ejemplo si es una zona sin acceso puede enviarse el vehículo a un kilómetro de distancia de nuestra área de interés, siendo efectiva siempre la cobertura de 45 hectáreas por una batería.

Como pudo verse en los resultados los parámetros 230 metros de altura y 70 % de traslape son 100 % efectivos, sin embargo, siempre es necesario tomar ciertas medidas al momento de realizar un vuelo con vant. Entre estas se pueden mencionar: verificar que el área que se desea muestrear está libre de tráfico aéreo, que no existe una cantidad excesiva de bruma, revisar que el vant esté funcionando al 100 % en sus capacidades, no realizar vuelos entre las 11:00 y 15:00 horas debido a la cantidad de luz, reflejo y velocidades del viento al menos que las condiciones del día lo permitan.

Además, asegurarse que al momento de despegar el vant no se encuentra cerca de antenas, cables de alta tensión y estructuras y tener control visual del

vehículo en todo momento para la toma de datos y evitar así cualquier percance. Es importante también que al momento de realizar un vuelo con vant se informe a las autoridades correspondientes con el fin de evitar malentendidos con los pobladores que ahí residen.

En materia técnica y basando el fundamento en las técnicas de fotointerpretación y los principios de la fotogrametría, es importante mencionar las razones por las cuales los otros parámetros evaluados no fueron satisfactorios. En principio la altura de vuelo resulto ser uno de los parámetros más importantes al realizar una misión fotogramétrica, esto porque al momento de realizar la toma de fotografías deben existir distintos puntos de enlace entre fotografías como formas, texturas y objetos.

La obtención de este tipo de datos en la foto permite al software generar los modelos, por lo que aquellas áreas de estructura forestal homogénea y densa pudieron obtenerse a una altura mayor, que coberturas heterogéneas, si bien en las estructuras forestales raleadas o deforestadas los parámetros de altura de 150 obtuvieron resultados positivos; para aquellas áreas homogéneas estos no fueron de utilidad. Por último, en términos de altura está definida la escala del modelo ortomosaico y los modelos del terreno, obteniendo una diferencia de 5 centímetros como unidad mínima de visualización entre los 150 y 300 metros de altura.

La diferencia en los traslapes también resultó ser importante, sobre todo, en términos de obtención del modelo del terreno, un traslape de 70 % o mayor garantiza un modelo más detallado de la forma de terreno y altura de los objetos sobre el mismo, además que al utilizar un traslape mayor se aumenta aun la garantía de obtener el ortomosaico.

Es importante considerar que, a mayor traslape y menor altura, la cantidad de fotografías será mayor, por lo que esto va a demandar tener una mayor capacidad de almacenaje en la memoria, tener a disposición más baterías para que sea efectiva la visita de campo y disponer de un ordenador de mayor capacidad para manejar y procesar la información de la manera adecuada.



## CONCLUSIONES

1. El vehículo aéreo no tripulado Phantom 3 Advanced, demostró durante la investigación ser una potente herramienta para el monitoreo del manglar pacífico, su autonomía de vuelo al momento de establecer los parámetros fotogramétricos de altura es de 230 metros y un traslape longitudinal y transversal de 70 %. Obtienen como resultado un modelo ortomosaico de 10 centímetros de resolución espacial, el cual es útil para realizar un monitoreo forestal óptico.
2. La altura ideal para realizar un monitoreo en el ecosistema de manglar pacífico es de 230 metros, utilizar esta altura permite tener una amplia visión de los objetos espaciales, con un tamaño de unidad mínima de 10 centímetros. Sin embargo, si el usuario necesita obtener un tamaño más pequeño como unidad mínima, puede proceder y tomar fotografías más puntuales, para agregar al proceso de construcción del modelo fotogramétrico.
3. La hora adecuada para tomar las fotografías se encuentra comprendida entre las 7:00-11:00 y 15:00-18:00 horas, según la estación del año estas pueden variar un poco en términos climáticos, por ejemplo, las temporadas del año en las que amanece o anochece más tarde el piloto puede considerar qué momento es el más apto para realizar un plan de vuelo, es importante dejar claro que el Phantom 3 Advanced no puede volar bajo lluvia, por lo que un día lluvioso no permitiría realizar el vuelo.
4. El traslape adecuado para realizar un modelo fotogramétrico del ecosistema de manglar debe ser mayor al 70 % tanto longitudinal como transversal, un

traslape menor a este puede estar sujeto a errores en la construcción de un modelo, mientras que un traslape mayor puede beneficiar el modelo pero al mismo tiempo hace cambiar la efectividad de vuelo por batería del Phantom 3 Advanced, siendo incapaz de cubrir 45 hectáreas con una única batería, aunque este sea realizado con las mejores condiciones ambientales.

## RECOMENDACIONES

1. Al conocer las capacidades tecnológicas que ofrece el vehículo aéreo no tripulado Phantom 3 Advanced, se recomienda que pueda realizarse la réplica de este estudio en otro tipo de ecosistemas del país, por ejemplo, los bosques de pino-encino que suelen tener altas pendientes o los ecosistemas de tular del lago de Amatitlán, que son una fuente importante de economía en la región de Sololá y que no son visibles de buena manera en los sensores remotos Landsat o Sentinel.
2. Al momento de realizar un vuelo con vant puede mantenerse la vista al vehículo, tomando en cuenta no obstruir una vía aérea. Aunque 230 metros del suelo no es una altura tan alta, debe tenerse cuidado por las aeronaves pequeñas como avionetas que suelen movilizarse en la región con fines deportivos y transporte.
3. Debido a las características ambientales de la región costera y a las características del ecosistema de manglar pacífico se recomienda no realizar misiones de vuelo de 11:00 – 15:00 horas, esto por las altas temperaturas y el reflejo del sol sobre las zonas inundables del manglar que afectan la toma de fotografías, sin embargo, si el clima del día es irregular el piloto puede considerar apto realizar el vuelo.
4. Para realizar un correcto modelo fotogramétrico es recomendable hacer uso de un traslape longitudinal y transversal de 70 % o mayor, dependiendo el tipo de cobertura y estructura forestal, a la que está orientado el vuelo fotogramétrico. Es importante considerar que el traslape es un parámetro que interviene en el rendimiento del vant.





## REFERENCIAS

1. Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., y Sousa, J. J. (30 de octubre de 2017). *Hyperspectral imaging: a review on UAV-based sensors, data processing an application for agriculture and forestry. Remote sensing*, 9(1110). doi:10.3390/rs9111110
2. Alcalá Baselga, E. y Blesa Gascón, A. (2014). *Desarrollo e implementación de un cuadricóptero*. Universidad de Zaragoza, Escuela Universitaria Politécnica de Teruel.
3. American Society of Photogrammetry. (1966). *Manual of photogrammetry*. (Vol. 2). Wisconsin, USA: Morris M. Thompson.
4. Caire, L. (1977). *Fotogrametría terrestre*. México D.F.: Rodríguez.
5. Catalán, M. (2014). *Protocolo metodológico: mapa nacional de uso/cobertura/carbono 2012. Fase I y II*. 75. Guatemala.
6. Chabot, D., y Bird, D. (2015). *Wildlife research and management methods in the 21st century. Journal of Unmanned Vehicle Systems*.
7. Chen, S., McDermid, G. J., Castilla, G., y Linke, J. (3 de diciembre de 2017). *Measuring vegetation height in linear disturbances in the boreal forest with UAV photogrammetry. Remote sensing*, 9 (1257). doi:10.3390/rs9121257

8. de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., Borra-Serrano, I., y López-Granados, F. (10 de abril de 2018). *3-D characterization of vineyards using novel UAV imagery-based OBIA procedure for precision viticulture applications*. 10 (584). doi:10.3390/rs10040584
9. deAgostini, R. (1978). *Introducción a la fotogrametría*. C.I.A.F., Bogotá, Colombia.
10. DJI. (2015). *Manual de usuario Phantom 3 Advanced*. 1, 58.
11. d'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Klaus, D. P., y Johannes, B. R. (2012). *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco*. Remote Sensing y GIS Research Group, Department of Physical Geography, Goethe University and Department of Physical Geography. University of Trier, D-54286 Trier, Germany.
12. Eschmann, C., Kuo, C. M., Kuo, C. H., y Boller, C. (2012). *Unmanned Aircraft Systems for Remote*. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring.
13. Eugene, A. (1978). *Forester's guide to aerial photointerpretation*. Agriculture handbook no. 308. United States: Department of agriculture forest services.
14. F.A.O. (2004). *Evaluación de los recursos forestales*. Guatemala. Recuperado de: <http://www.fao.org/forestry/23225-0cec6b6e394a1fd736c21ac0a9204a796.pdf>.

15. Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Morra di Cella, U., Roncella, R., y Santise, M. (17 de febrero de 2018). *Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. Remote sensing, 10* (311). doi:10.3390/rs10020311
16. Graham, R., y Read, R. (1986). *Manual de fotogrametría aérea*. Traducción Montalbetti L. Barcelona, España: Omega, S.A.
17. Hewson, J., Steininger, M. K., y Pesmajoglou, S. (2014). *Manual de medición, reporte y verificación (MRV) de REDD+ versión 2.0. Programa de carbono forestal, mercados y comunidades financiado por USAID*. Washinton, DC, Estados Unidos.
18. INAB. (2015). Decreto número 2-2015: Ley de fomento al establecimiento, recuperación, restauración, manejo, producción y protección de bosques en Guatemala. Guatemala. 2 de febrero de 2015.
19. Jaud, M., Dantec, N. L., Ammann, J., Grandjean, P., Constantin, D., Akhtman, Y., Merminod, B. (30 de enero de 2018). *Direct georeferencing of a pushbroom, lightweight hyperspectral system for mini-uav applications. Remote sensing, 10* (204). doi:10.3390/rs10020204
20. Kanistras, K., Goncalo, M., Matthew, J., y Kimon, V. (2012). *A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring. Department of Electrical and Computer Engineering*.

21. Leduc, M., y Knudby, A. J. (6 de enero de 2018). *Mapping wild leek through the forest canopy using a UAV. Remote sensing, 10 (70)*. doi:10.3390/rs10010070
22. Li, W., Sun, K., Li, D., Bai, T., y Sui, H. (17 de junio de 2017). *A new approach to performing bundle adjustment for time series UAV images building change detection. Remote sensing, 9 (625)*. doi:10.3390/rs9060625
23. Meng, X., Shang, N., Zhang, X., Li, C., Zhao, K., Qiu, X., y Weeks, E. (19 de noviembre de 2017). *Photogrammetric UAV mapping of terrain under dense coastal vegetation: an object-oriented classification ensemble algorithm for classification and terrain correction. Remote sensing, 9 (1187)*. doi:10.3390/rs9111187
24. Merino, L., de Olavide, P., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J., Maza, I., y Oller, A. (2010). *Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement using. VI International Conference on Forest Fire Research*.
25. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de Guatemala. (2013). *Informe técnico: estudio de la cobertura de mangle en la república de Guatemala*. Guatemala.
26. Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., Tommaselli, A. M. (23 de febrero de 2017). *Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. Remote sensing, 9 (185)*. doi:10.3390/rs9030185.

27. Paneque Gálvez, J., McCall, M., Napoletano, B., Wich, S., y Kho, L. (2014). *Small Drones for Community-Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potencial in Tropical Areas*. p.p. 1481-1507.
28. Rangoa, A., Laliberteb, A., Herricka, J., Wintersb, C., Havstada, K., Steeleb, C., y Browninga, D. (2009). *Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. Journal of Applied. Remote sensing, Vol. 3*.
29. Sandbrook, C. (2015). *The social implications of using drones for biodiversity consevation*. *Ambio* No. 44, vol. 636.
30. Tang, L., y Shao, G. (2015). *Drone remote sensing for forestry research and practices. Journal of Forestry Research* 2015 No. 26, Vol. 796.