



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO
VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**

Saúl Rodenas Chivichón

Asesorado por el Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO
VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SAÚL RODENAS CHIVICHÓN

ASESORADO POR EL ING. ALFREDO ENRIQUE BEBER ACEITUNO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

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. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO
VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 4 de abril de 2016. Prorrogado y revalidado el 3 de mayo de 2022.



Saúl Rodeñas Chivichón

Guatemala, 24 de febrero de 2022


Ingeniero
Alejandro Castañón
Coordinador del área de Topografía y Transportes
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente.

Ingeniero Castañón:

Por este medio hago de su conocimiento que como Asesor al estudiante universitario de la carrera de Ingeniería Civil **Saúl Rodenas Chivichón**, con número de carné **2007-15373**, en su trabajo de graduación titulado "**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**", he realizado la revisión respectiva al trabajo desarrollado y considero que se han cumplido los objetivos del mismo, razón por la cual lo apruebo y solicito su colaboración para que se continúen los trámites que corresponda.

Sin otro particular agradezco la gentileza de su atención y me suscribo de Usted,

Atentamente.


Alfredo Enrique Beber Aceituno
Ingeniero Civil
Colegiado 3,079

Alfredo Enrique Beber Aceituno
Ingeniero Civil
Colegiado No. 3,079



ESCUELA DE

INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Guatemala, 28 de junio de 2022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Fuentes:

Por este medio se informa que el Área de Topografía y Transportes, ha aprobado el trabajo de graduación: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES"**, el cual fue presentado por el estudiante de Ingeniería Civil Saúl Rodenas Chivichón, con CUI **2210159220301** y registro académico No. **200715373**, quien contó con la asesoría del Ingeniero Civil Alfredo Enrique Beber Aceituno. Y después de haber realizado las correcciones pertinentes por el estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil.

Por lo que considero que este trabajo llena los requisitos planteados y que representa un aporte para la Facultad de Ingeniería, por lo que se aprueba al mismo, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

Atentamente,,


FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA
DE TOPOGRAFÍA
Y TRANSPORTES
COORDINACIÓN
Ing. Alejandro Bastián
Coordinador
Área de Topografía y Transporte





LNG.DIRECTOR.036.EIC.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**, presentado por: **Saúl Rodenas Chivichón**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala, febrero de 2023



LNG.DECANATO.OI.198.2023

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 Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES**, presentado por: **Saúl Rodenas Chivichón**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Fuente eterna de vida y amor.
La Santa Madre de Dios	Refugio y auxilio.
Mis padres	Enma Natalia Chivichón Martínez y Roberto Aníbal Rodenas Morales.
Mi esposa	Thelma del Carmen Farfán Castillo de Rodenas.
Mis hijos	Mateo y Saúl Rodenas Farfán.
Mis hermanos	Karen, Erika, Roberto, Daniela, Jacob, Débora, Adriana, Judit y Milka Rodenas Chivichón.
Mis sobrinos	Astrid, Virginia, Iván, Camila (q.e.p.d.) y Fátima Pérez Rodenas. Milka, Estuardo y Nicolás Muñoz Rodenas. Hugo y Esaú Rodenas Argueta. Daniela Dávila Rodenas, Amaya y Mía Aldana Rodenas, Marcela Farfán Rodenas y Sebastián Coroy Rodenas.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por regalarme la vida, fortaleza e inteligencia para así poder cumplir este sueño académico.
Mi alma máter	Universidad de San Carlos de Guatemala por haberme albergado e instruido en sus tricentenarias aulas.
Mi esposa	Por ser mi compañera, amiga y cómplice en esta vida.
Mis hijos	Por haberle dado sentido a todas mis luchas.
Mis padres	Por su abnegación, entrega y apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida. Esta meta no hubiera sido posible sin su ayuda.
Mis hermanos	Por estar a mi lado e incentivarme a seguir adelante.
Mis sobrinos	Por alegrar mis días con su sola presencia.
Ing. Alfredo Beber	Por la dedicación y tiempo en sus cátedras, así como también en el asesoramiento de esta investigación.

Sección de topografía y catastro del CII

A los ingenieros Alejandro Arévalo y Gustavo Pérez por compartir sus conocimientos y ser parte importante en el desarrollo de este texto.

Ing. Alejandro Castañón

Por su invaluable apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. FOTOGRAMETRÍA	1
1.1. Fotogrametría terrestre.....	2
1.2. Fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos tripulados	3
1.2.1. Fotogrametría aérea vertical.....	5
1.2.2. Fotogrametría aérea oblicua.....	6
1.2.3. Principios geométricos de la fotografía aérea.....	7
1.2.4. Escala de una fotografía aérea.....	9
1.2.5. Proyección central y proyección ortogonal	12
1.2.6. Formatos usados en la fotografía aérea	14
1.2.7. Fotografía aérea de colores y en blanco y negro....	15
1.2.8. Fotografías infrarrojas.....	16
1.3. Plan de vuelo.....	16
1.3.1. Traslape.....	16
1.3.2. Cálculo de plan de vuelo	17
1.4. Estereoscopia.....	22
1.4.1. Clases de estereoscopios.....	22
1.4.2. Percepción de la profundidad	23
1.5. Fotocontrol.....	24

1.6.	Restitución fotogramétrica.....	25
1.6.1.	Aparatos y métodos para restitución fotogramétrica	26
1.7.	Productos fotogramétricos utilizando vehículos aéreos tripulados.....	28
1.7.1.	Mosaicos	28
1.7.1.1.	Mosaico índice	28
1.7.1.2.	Mosaico de contacto o semicontrolado	29
1.7.1.3.	Mosaico rectificado.....	30
1.7.2.	Mapas.....	30
1.7.3.	Ortofotomapas.....	31
1.8.	Aéreo triangulación	31
1.8.1.	Aéreo triangulación analógica	31
1.8.2.	Aéreo triangulación analítica	32
2.	VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS O DRONES	33
2.1.	Evolución de los UAV a través de la historia.....	34
2.2.	Tipos y características de UAV	37
2.3.	Uso de los UAV en la topografía	39
3.	FOTOGRAMETRÍA AÉREA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS	41
3.1.	Equipo utilizado en la fotogrametría aérea con UAV.....	41
3.1.1.	Cámara digital calibrada.....	41
3.1.2.	Cámara multiespectral.....	42
3.1.3.	Cámara termal.....	44
3.1.4.	GPS.....	45
3.1.5.	Telemetría	47

3.2.	Descripción del método	48
3.2.1.	Plan de vuelo	48
3.2.2.	Apoyo topográfico	50
3.2.3.	Tomas de fotografía.....	53
3.2.4.	Trabajo de gabinete.....	54
3.3.	Productos fotogramétricos utilizando UAV	56
3.3.1.	Modelos digitales de terreno.....	56
3.3.1.1.	Curvas de nivel.....	57
3.3.1.2.	Secciones y perfiles del terreno.....	59
3.3.2.	Ortomosaico	60
3.3.3.	Mosaicos termográficos	61
4.	OTRAS APLICACIONES DEL USO DE UAV.....	63
4.1.	Aplicaciones en la Ingeniería Civil	63
4.2.	Aplicaciones en otras ciencias.....	64
4.3.	Vehículos no tripulados usados en la batimetría	66
5.	ANÁLISIS COMPARATIVO Y RESULTADOS	69
5.1.	Comparación de los métodos fotogramétricos utilizando vehículos aéreos tripulados y no tripulados.....	70
5.1.1.	Ventajas y desventajas de ambos métodos.....	70
5.1.2.	Tiempos totales para implementar los métodos	74
5.1.3.	Personal utilizado	75
5.1.4.	Alcances y limitaciones.....	76
5.1.5.	Precisión en las mediciones	77
5.1.6.	Estimación de costos.....	78
5.1.7.	Resultados.....	84

CONCLUSIONES.....85
RECOMENDACIONES89
BIBLIOGRAFÍA.....91
APÉNDICES.....95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Clasificación de las fotografías aéreas.....	7
2.	Geometría de una fotografía aérea	8
3.	Escala de la fotografía aérea con terreno muy irregular.....	10
4.	Esquema de la proyección central	12
5.	Croquis de una fotografía, proyección central.....	13
6.	Ejemplo de proyección ortogonal	14
7.	Restituidor fotogramétrico digital.....	28
8.	Esquema de un mosaico índice	29
9.	Imagen NDVI de la zona central de Guatemala	43
10.	Diferencia entre una fotografía convencional y una fotografía térmica infrarroja	45
11.	Plan de vuelo en la aplicación utilizada.....	50
12.	Receptor GPS utilizado para el apoyo topográfico.....	52
13.	Fotografía aérea del edificio de Rectoría de la USAC.....	54
14.	Modelo digital del edificio de Rectoría de la USAC	57
15.	Nube de puntos clasificados	59
16.	Drone DJI Agras MG-1	65

TABLAS

I.	Tabla comparativa de datos de un plan de vuelo.....	19
II.	Tipos y características de drones.....	39
III.	Parámetros utilizados en el plan de vuelo para el drone.....	49

IV.	Coordenadas geográficas de los puntos de apoyo topográfico	51
V.	Coordenadas UTM de los puntos de apoyo topográfico	51
VI.	Cuadro comparativo de los procedimientos utilizados en el post proceso de imágenes utilizadas en un estudio fotogramétrico	73
VII.	Aspectos generales del proyecto	79
VIII.	Integración de costos y precio por hectárea	81
IX.	Cronograma físico y financiero	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\approx	Aproximadamente igual a
cm	Centímetro
X, Y, Z	Coordenadas cartesianas
<i>f</i>	Distancia focal
Ec. #	Ecuación Número
°	Grado sexagesimal
h	Horas
km	Kilómetro
m	Metro
mm	Milímetros
nm	Nanómetros
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
in	Pulgada

GLOSARIO

Aerodinámico	Forma adecuada de un objeto para reducir la resistencia del aire.
Aerostático	Un cuerpo que responde a las leyes que rigen el equilibrio del aire y los demás gases en estado de reposo.
Altimetría	Rama de la topografía que se encarga de la medición de alturas.
Altímetro	Instrumento para medir la altura de un punto con respecto a otro punto de referencia, generalmente el nivel del mar.
App	Del inglés <i>Application</i> , es un programa informático que lleva a cabo una función directamente para el usuario.
Batimetría	Conjunto de técnicas para la medición de profundidades del mar, lagos y ríos.
Cabeceo	Movimiento oscilatorio respecto al eje transversal de una aeronave.
CAD	Diseño Asistido por Computadora, por sus siglas en inglés.

Cartografía	Ciencia que estudia los mapas y cartas geográficas, como trazarlos e interpretarlos.
CII	Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
CORS	Estación de referencia de operación continua, por sus siglas en inglés. GPS estático.
Datum	En un sistema de referencia geodésico, el Datum es un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre.
Deriva	También llamado guiñada, es el movimiento oscilatorio respecto al eje vertical de una aeronave.
DGAC	Dirección General de Aeronáutica Civil.
Dirigible	Es una nave aerostática autopropulsada y con capacidad de ser maniobrada para ser manejada como una aeronave.
Distancia focal	Es la distancia que existe entre el sensor de imagen de una cámara fotográfica y el centro óptico de la lente.
Embalse	Depósito de agua que se forma de manera artificial.

Emulsión	Sustancia química que recubre el papel fotográfico. Esta sustancia es la que se modifica por la luz cuando se fotografía y da paso a una imagen.
Espectro electromagnético	Clasificación y orden de las ondas electromagnéticas de acuerdo a su longitud y frecuencia. En esta clasificación se encuentra, por ejemplo, el espectro de luz visible al ojo humano, los rayos X, los rayos UV, entre otros.
Estar a plomo	Expresión coloquial utilizada para indicar que un objeto u objetivo está paralelo a la vertical del lugar.
Estereocomparador	Aparato de gran precisión usado en la elaboración de planos a partir de fotografías. Este aparato solo puede procesar dos fotografías a la vez.
Estereoscopía	Visión en relieve conseguida mirando simultáneamente con ambos ojos dos imágenes de un mismo objeto, mediante el estereoscopio u otros procedimientos análogos.
Estereotrazador	Dispositivo complejo utilizado para crear mapas topográficos.
Estrés hídrico	Es cuando la demanda de agua es más alta que la cantidad disponible durante un período determinado.

Etimología	Disciplina de la lingüística que se encarga de estudiar el origen, evolución y significado de las palabras.
Fitosanitario	Prevención y curación de las enfermedades de las plantas o relacionado con ello.
Formato BMP	Formato de imagen de mapa de bits propio del sistema operativo Microsoft Windows.
Formato ráster	Formato que divide el espacio en un conjunto regular de celdillas que contienen un número que puede ser el identificador de un objeto.
Formato TIFF	Formato de Archivo de Imagen Etiquetada por sus siglas en inglés. Formato de archivo informático para almacenar imágenes de mapa de bits.
Formato vectorial	Formato que representa los objetos en el espacio como puntos, líneas o polígonos.
Fotograma	Sinónimo de fotografía.
Formato JPEG	Grupo Mixto de Expertos Fotográficos por sus siglas en inglés. Es el formato de fotografía digital más común, utilizado por las cámaras digitales y otros dispositivos de captura de imagen.

Geodesia	Ciencia que estudia la forma y dimensiones de la tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico.
Geometría	Estudio de las propiedades y de las magnitudes de las figuras en el plano o en el espacio.
Georreferenciación	Técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas y datum específicos.
GIS	Sistema de Información Geográfica, por sus siglas en inglés.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés.
Grilla	Distribución de elementos geométricos que divide un espacio bidimensional en partes regulares. También llamada rejilla, entramado o en algunos casos cuadrícula.
GSD	Distancia de Muestreo del Suelo, por sus siglas en inglés. Es la distancia medida entre los centros de dos píxeles consecutivos. Medida que se utiliza para determinar la precisión de una ortofotografía.

Haz	Conjunto de partículas o rayos luminosos de un mismo origen, que se prolongan sin dispersión.
Hertzidianas o Hertzianas	De las ondas electromagnéticas o relativo a ellas.
Hiperespectral	Sensores que captan bandas, en todo el rango del espectro electromagnético, que son imperceptibles para el ojo humano.
IGN	Instituto Geográfico Nacional.
Ladeo	También llamado alabeo, es el movimiento oscilatorio respecto al eje longitud de una aeronave.
MDT	Modelo Digital de Terreno.
Monocomparador	Es un sistema con un plano, capaz de girar y desplazarse respecto de un sistema cartesiano de referencia, en el que se monta el fotograma con los puntos a medir.
Multiespectral	Sensores que captan bandas del espectro electromagnético, en un rango específico, que son imperceptibles para el ojo humano.
Oblicuo/a	Se refiere a una posición media entre la vertical y la horizontal del lugar.

Ortogonal	Que forma un ángulo recto.
Pancromático/a	Tipo de película fotográfica en blanco y negro sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible.
Paralaje	Es la desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido.
Perspectiva	Manera de representar uno o varios objetos en una superficie plana, que da la idea de la posición, volumen y situación que ocupan en el espacio con respecto al ojo del observador.
Planimetría	Rama de la topografía que trata la medición y representación de una porción de la superficie terrestre sobre una superficie plana.
Plotear	Del inglés <i>plot</i> , que significa trazar.
Post-proceso	Trabajo posterior aplicado a la información obtenida en campo para obtener resultados con menor margen de error.
Pseudo	Que es supuesto o falso.
Restitución fotográfica	Proceso aplicado a las fotografías para determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de ellas.

Rover	Receptor móvil de datos GPS.
SAR	Radar de Apertura Sintética, por sus siglas en inglés.
Satélite	Cuerpo que orbita un planeta.
SMART	Tecnología de Supervisión Automática, Análisis y Generación de Informes, por sus siglas en inglés.
Termografía	Técnica que permite registrar gráficamente las temperaturas de distintas zonas de un área u objeto.
Trabajo de gabinete	Ordenamiento de la información de campo y que es procesada para obtener información específica de un bien inmueble: área, colindancia y orientación, para generar una representación gráfica a escala.
Transversal	Que atraviesa algún objeto de manera perpendicular a su dimensión longitudinal.
UAV	Vehículo Aéreo no Tripulado, por sus siglas en inglés.
Uso de suelo	Acciones, actividades e intervenciones que realizan las personas sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla.
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator, por sus siglas en inglés.

VANT

Vehículo Aéreo No Tripulado, por sus siglas.

Waypoints

Coordenadas para ubicar puntos de referencia tridimensionales utilizados en la navegación basada en GPS. Se emplean para trazar rutas mediante agregación secuencial de puntos.

RESUMEN

En la actualidad vemos un enorme crecimiento en el desarrollo de técnicas y equipos tecnológicos, microelectrónicos, computarizados y algunos que llegan a utilizar inteligencia artificial y son utilizados casi en todas las ciencias, la topografía y específicamente la rama de fotogrametría no ha estado exenta a experimentar estos avances.

El presente trabajo aborda esta premisa y describe las técnicas utilizadas en el desarrollo de trabajos fotogramétricos incluyendo los procedimientos implementados cuando no se disponía de tecnología avanzada describiendo los conceptos, cálculos, herramientas y equipos, materiales y procedimientos que se utilizaban u otros que se siguen utilizando para obtener productos fotogramétricos tales como mapas, ortofotografías y mosaicos empleando, para su creación, vehículos aéreos tripulados y equipos analógicos.

De igual forma se describe todo lo anterior mencionado, pero con procedimientos de última generación y se hace énfasis específicamente en el vehículo utilizado para la realización del estudio fotogramétrico pues se desarrolla la técnica fotogramétrica utilizando vehículos aéreos no tripulados, capaces de realizar vuelos autónomos predefinidos en la planificación del estudio necesario que el proyecto requiera.

Por lo descrito con anterioridad, se realiza un análisis comparativo de ambos métodos y se establecen las ventajas y desventajas, alcances y limitaciones y la viabilidad de implementar un estudio fotogramétrico con un vehículo aéreo tripulado y uno no tripulado o *drone*.

Incluimos también, en este texto, los productos obtenidos al realizar un estudio fotogramétrico con un *drone* tales como ortofotografía, curvas de nivel, y un perfil topográfico de las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, también, un modelo digital de terreno, específicamente del edificio de Rectoría, creado a partir de una nube de puntos densa, producto de las fotografías aéreas logradas por el *drone*.

OBJETIVOS

General

Comparar los métodos fotogramétricos que utilizan vehículos aéreos tripulados y los que utilizan vehículos no tripulados de uso civil o drones.

Específicos

1. Actualizar la información acerca de los métodos para realizar un estudio fotogramétrico con una aeronave tripulada.
2. Describir el equipo, la metodología y los procedimientos para realizar un estudio fotogramétrico con un *drone*.
3. Definir los alcances y limitaciones que puede tener un levantamiento fotogramétrico utilizando un *drone*.
4. Presentar los productos obtenidos de realizar un estudio fotogramétrico con un *drone*.

INTRODUCCIÓN

La fotogrametría es la ciencia de obtener información, ya sea interpretativa y/o espacial del área de terreno sobre el cual se realiza un vuelo con un avión, una avioneta o un *drone* con el que se toman fotografías que sufren un postproceso para ser rectificadas, georreferenciadas y escaladas para así obtener productos fotogramétricos como mapas, ortofotografías y una gran cantidad de información que puede ser de carácter esencial en la ejecución de una obra civil o en el desarrollo de un estudio foto interpretativo.

Actualmente podemos encontrar softwares gratuitos y de fácil alcance que ofrecen una gran cantidad de fotografías aéreas, en su mayoría fotografías satelitales, pero tienen el inconveniente de no ofrecer la resolución, la calidad y la precisión que un proyecto pudiera requerir.

El Instituto Geográfico Nacional de Guatemala ofrece productos fotogramétricos de gran calidad, pero en muchos casos están desactualizados pues se tienen registros de información obtenida en año 2006 y es posible observar que en ciertas regiones no aparecen, en los productos fotogramétricos, edificaciones, carreteras, viviendas y todo tipo de estructuras que en la actualidad existen.

También, vemos que la tecnología crece a pasos agigantados y la implementación de nuevos equipos, dispositivos y programas en la fotogrametría dan la posibilidad de obtener información casi de manera inmediata. Utilizar un *drone*, VANT o UAV en la realización de estudios fotogramétricos es prácticamente una técnica nueva, innovadora y relativamente fácil y práctica.

Por lo anterior, en el capítulo I de esta investigación se dan a conocer conceptos básicos de fotogrametría, métodos de cálculo y equipos utilizados en la fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos tripulados y los productos que se obtienen al implementar esta técnica.

En el capítulo II se expone y describe cómo han evolucionado los drones, VANT o UAV a través de la historia, los tipos y características que en la actualidad presentan y los usos que les podemos dar en topografía. Seguidamente, en el capítulo III se describe el equipo y la metodología utilizada para realizar un estudio fotogramétrico utilizando drones, así mismo, los productos fotogramétricos obtenidos con la aplicación de este método.

En el capítulo IV se dan a conocer otras ciencias en las que se utilizan drones como herramientas primordiales para su desarrollo, tal es el caso de batimetría, que también es llamada topografía marítima.

Por último, en el capítulo V se hace un análisis comparativo entre ambos métodos (fotogrametría con vehículo aéreo tripulado y no tripulado) en donde se establecen las ventajas y desventajas de cada uno, así como también, el tiempo de implementación, la precisión de ambos métodos y una estimación de costos de utilizar un *drone* para hacer un estudio fotogramétrico.

1. FOTOGRAMETRÍA

“La fotogrametría se define como la ciencia, el arte y la tecnología para obtener información confiable a partir de fotografías.”¹ Históricamente la fotogrametría tiene sus orígenes desde el invento de la fotografía, tal como la conocemos hoy en día pues, sus inventores, los científicos franceses Joseph Niépce y Louis Daguerre pensaron en hacer mediciones por medio de imágenes, en la década de 1820 a 1830.

Esta ciencia se divide en dos áreas, las cuales son: métrica e interpretativa.

Fotogrametría métrica es el área cuyo objetivo es obtener información cuantitativa puntual, bidimensional y tridimensional a partir de fotografías escaladas, georreferenciadas y post procesadas.

El área métrica es de especial interés en el desarrollo de este texto porque, por medio de esta técnica podemos obtener información espacial, a partir de ortomosaicos, incluyendo distancias, elevaciones, áreas, volúmenes, secciones transversales y datos para compilar mapas topográficos.

Se define como interpretativa al área de la fotogrametría cuyo fin es la recolección de información cualitativa, como el reconocimiento de objetos a partir de mosaicos que pueden no estar rectificadas, georreferenciadas y escaladas, y la apreciación de su significado. Sus factores críticos a considerar en la

¹ R. Wolf, Paul – D. Ghulani, Charles. *Topografía*. p. 793.

identificación de objetos son la forma, tamaño, configuración, sombra, tono y textura de su imagen.

Por la técnica aplicada en la toma de las fotografías, la fotogrametría se divide en dos categorías, las cuales son: terrestre y aérea. Es importante mencionar que para el cumplimiento de nuestros objetivos la técnica de captura de imágenes terrestres será expuesta de forma breve, mientras que la técnica utilizada para obtener imágenes aéreas será desarrollada con más detenimiento y detalle.

1.1. Fotogrametría terrestre

Se le da el nombre de terrestre a la técnica de realizar levantamientos fotogramétricos basados en fotografías tomadas desde estaciones situadas sobre el terreno.

Su origen se remonta al año de 1850, con el empleo de cámaras fotográficas para obtener imágenes por medio de las cuales se pudiera hacer mediciones, este trabajo se le atribuye al científico y militar francés Aimé Laussedat considerado como el padre de la fotogrametría.

La fotogrametría terrestre es una técnica que ofrece facilidad de ser aplicada, no es de costo elevado y permite hacer levantamientos topográficos precisos para extensiones pequeñas de terrenos. Básicamente este método consiste en la toma de fotografías en dirección horizontal empleando el llamado fototeodolito. Este es un teodolito con cámara fotográfica acoplada, ambos van montados sobre un trípode.

Actualmente se realizan levantamientos fotogramétricos terrestres con cámaras digitales calibradas, montadas sobre un trípode y en conjunto con el uso de software que utiliza los principios de la restitución fotográfica y la estereoscopia, podemos obtener un levantamiento topográfico de dos dimensiones y podemos generar con esta misma información un MDT en tres dimensiones o el modelo digital de una edificación a la que se le tomen las fotografías. Así mismo, por medio de la vinculación de toda la información antes descrita a un programa CAD, se pueden trazar las curvas de nivel que presente la topografía del terreno.

La técnica terrestre tiene un campo limitado en lo que se refiere a la elaboración de planos, únicamente se emplea cuando la fotogrametría aérea resulta muy costosa, poco práctica o casi imposible de realizar.

1.2. Fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos tripulados

Los primeros intentos por tomar fotografías aéreas utilizando vehículos tripulados datan del año 1861 por la armada de Estados Unidos, en estos primeros intentos la armada utilizó globos aerostáticos, con poco éxito. En Europa el empleo de dirigibles tuvo mejor éxito. En los archivos de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos ISPRS, por sus siglas en inglés, se conservan las primeras fotografías tomadas desde un avión por el capitán italiano Cesare Tardivo, con fines de elaboración de mapas, en la segunda década del siglo XX.

En la actualidad la fotogrametría aérea se realiza utilizando distintos tipos de instrumentos que son, esencialmente, el vehículo y la cámara fotográfica. El vehículo en el que es montada la cámara es de particular interés no solamente porque este puede ser un factor determinante en la cantidad de terreno cubierto

en el estudio que se realice, sino porque en lo que nos ocupa, pretendemos realizar un análisis comparativo entre los dos tipos de vehículos utilizados, tripulados y no tripulados, omitiendo la fotogrametría aérea que se realiza por medio de satélites.

La fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos tripulados o aviones tiene la finalidad de recolectar información de un área de terreno, con edificaciones o sin ellas, por medio de fotografías, que pueden ser de dos tipos: verticales y oblicuas, que son tomadas de acuerdo a previa planificación.

La planificación consiste en realizar un plan de vuelo para el avión, el cálculo de la altura de vuelo de acuerdo a la escala de la fotografía que se quiere lograr, la definición de los traslapes tanto longitudinales como transversales y el número de fotografías que serán tomadas.

La información que se puede extraer de las fotografías aéreas, no es posible obtenerla sin antes realizar un postproceso a las imágenes tomadas. Este procedimiento consiste en corregir las fotografías aplicando dos pasos: el fotocontrol y la restitución fotogramétrica, para así obtener mosaicos, mapas y ortofotomapas, estos dos últimos productos tienen como características que las fotografías que los conforman tienen la misma escala, están libres de errores, deformaciones y no tienen efecto de perspectiva.

Más adelante desarrollaremos a detalle cada uno de los procesos que requiere la realización de un estudio fotogramétrico utilizando un avión, desde el tipo de fotografías, verticales y oblicuas, la planificación del vuelo, la toma de fotografías, el fotocontrol y la restitución fotogramétrica hasta los productos fotogramétricos finales.

Las aplicaciones que podemos dar a la fotogrametría aérea son amplias porque, en lo que a obras civiles se refiere y obtención de información métrica, podemos trazar, planificar y diseñar carreteras, oleoductos, acueductos, fibra óptica, líneas de conducción de energía eléctrica, líneas férreas, ubicar ríos y lagos, entre otras.

1.2.1. Fotogrametría aérea vertical

La fotogrametría aérea vertical se logra tomando fotografías en donde el eje de la cámara está exactamente a plomo, esto quiere decir que el eje de la lente está paralelo a la vertical del lugar.

Uno de los factores que influyen en los errores en la toma de fotografías es el clima, este siempre afecta el ángulo entre la lente y la superficie del terreno, por lo que, decir que el eje de la cámara esta exactamente a plomo es muy ideal, siempre encontramos variaciones en el ángulo de las tomas que por lo general son menores a 1° y rara vez mayores a 3° , este se incrementa en los bordes del área que se fotografía. Las imágenes que tienen estos pequeños ángulos de inclinación son llamadas fotografías casi verticales o con ladeo. Aunque aparentemente son fotos verticales no son proyecciones verdaderamente ortogonales de la superficie de la tierra. En realidad, son vistas en perspectiva y deben aplicarse los principios de la geometría de la perspectiva para preparar mapas a partir de ellas.

Una de las ventajas de la fotogrametría aérea vertical es que por medio de ella podemos obtener datos planimétricos y datos altimétricos del lugar de estudio.

1.2.2. Fotogrametría aérea oblicua

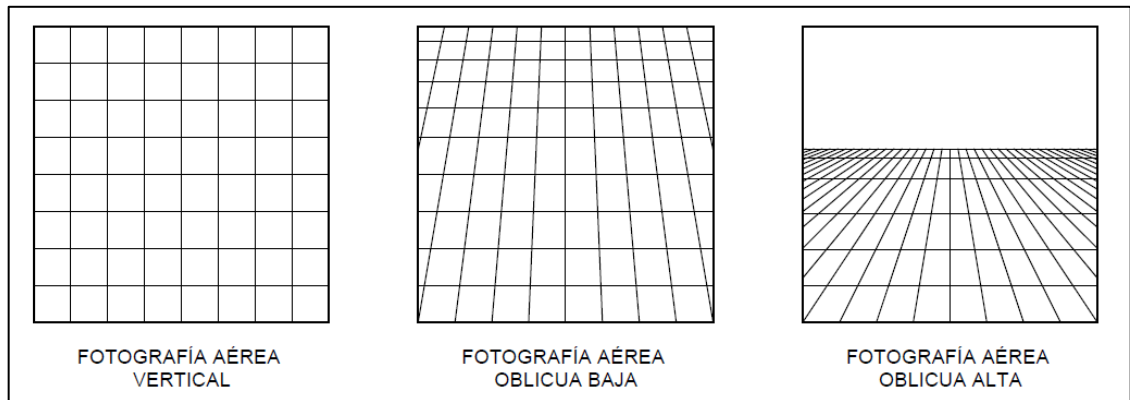
Los criterios más empleados en la clasificación de las fotografías y los estudios fotogramétricos aéreos son: el campo angular de la cámara y el ángulo de inclinación de la misma, como vimos anteriormente de acuerdo al segundo criterio estudiamos las fotografías verticales, existen, además de estas, las fotografías oblicuas.

Las fotografías oblicuas son las tomadas con el eje de la cámara haciendo un ángulo con la vertical del lugar, la película siempre es perpendicular al eje de la cámara, siempre y cuando este ángulo sea mayor a $4,5^\circ$. Se denominan oblicuas altas cuando en la fotografía aparece el horizonte y oblicuas bajas cuando este no aparece.

En las fotografías aéreas oblicuas bajas el ángulo formado entre el eje de la cámara y la vertical del lugar varía entre 10° a 30° .

Existe una técnica utilizada para la captura de fotografías aéreas llamada trimetrogón, esta consiste en utilizar tres cámaras a la vez, que toman imágenes sincronizadamente. Un sensor es para la captura de imágenes aéreas verticales, ubicado al centro, mientras que los otros dos son ubicados a derecha e izquierda respectivamente, de manera que cada uno capture imágenes aéreas oblicuas altas. El sistema trimetrogón es de bastante utilidad para capturar vastas superficies de terreno.

Figura 1. **Clasificación de las fotografías aéreas**

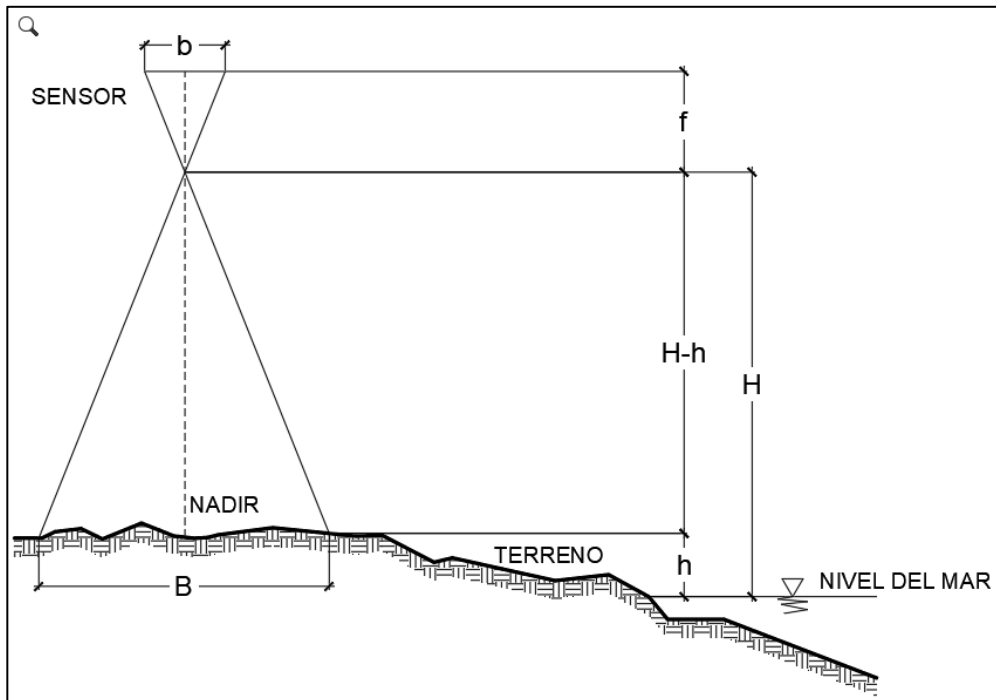


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

1.2.3. Principios geométricos de la fotografía aérea

La geometría de una fotografía aérea está definida por la relación de dos triángulos semejantes que tienen un vértice en común, las medidas de los triángulos se definen de acuerdo al esquema presentado en la figura 2.

Figura 2. Geometría de una fotografía aérea



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

En donde:

B = longitud fotografiada del terreno.

b = imagen sobre la fotografía de la longitud B.

f = distancia focal del lente de la cámara.

H = altura vuelo dada por el altímetro del avión.

h = altura del terreno sobre el nivel del mar.

De la figura 2 se deduce la siguiente relación:

$$\frac{b}{B} = \frac{f}{H-h} \quad (\text{Ec. 1})$$

1.2.4. Escala de una fotografía aérea

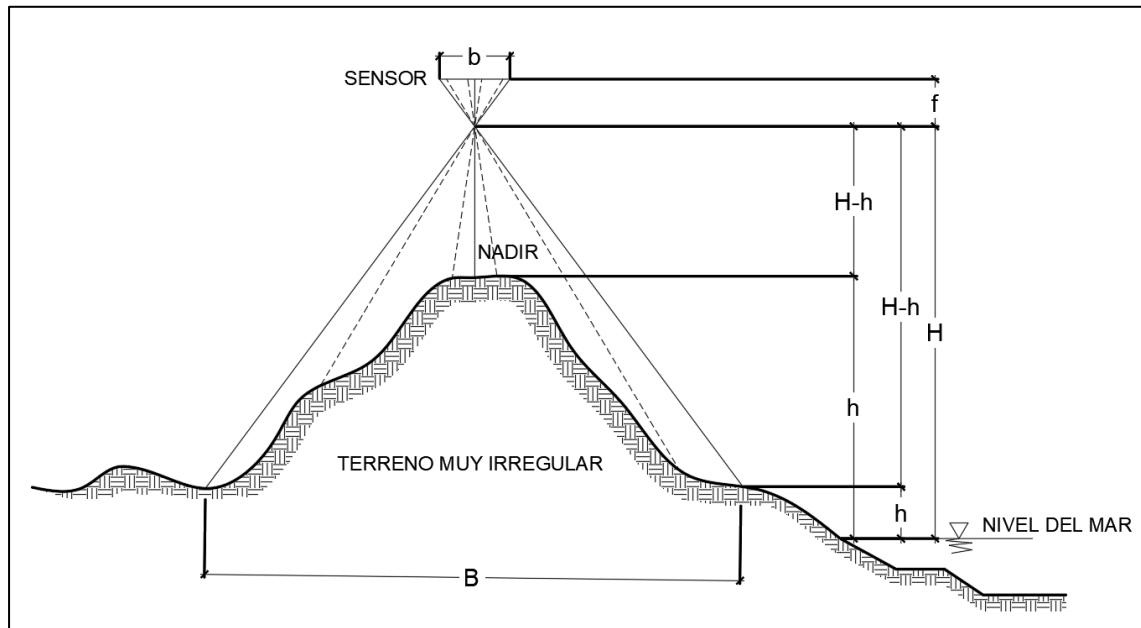
La escala de una fotografía es muy importante saberla porque, conociéndola es cómo podemos hacer las mediciones que el proyecto, del cual surge la necesidad del estudio fotogramétrico, requiera.

De la Ec. 1 se deduce el factor de escala, este estará expresado por la relación b/B . La escala se representa como una fracción cuyo numerador es la unidad y el denominador es el módulo de escala, por lo tanto, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{1}{E} = \frac{b}{B} \quad (\text{Ec. 2})$$

Estrictamente no podemos hablar de la escala de una fotografía porque no podemos decir que el terreno fotografiado tenga altimetría plana, es decir que el terreno presente las mismas cotas en toda su superficie, lo cual hace que la escala no sea única, sino que, varíe de acuerdo a las diferentes alturas del terreno, como se representa en la figura 3.

Figura 3. Escala de la fotografía aérea con terreno muy irregular



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

Como vimos en la Ec. 1 la altura H es la dada por altímetro del avión, esta altura no varía porque el vuelo se mantiene constante, por lo tanto, las variaciones existentes en las cotas son las alturas sobre el nivel del mar que presenta el terreno, entonces, podemos decir que la escala media de una fotografía es:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{f}{H-h_m} \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde:

E_m = escala media de la fotografía.

f = distancia focal del lente de la cámara.

H = altura de vuelo dada por el altímetro del avión.

h_m = altura media del terreno sobre el nivel del mar.

Es importante que todos los cálculos que se realicen utilizando las ecuaciones 1, 2 y 3 sean hechos utilizando las mismas dimensionales en cada una de las variables, esto debido a que el altímetro del avión viene en metros o en pies y la distancia focal de las cámaras puede darse en milímetros o en pulgadas. Por lo tanto, es aconsejable hacer las conversiones necesarias y trabajar todo en el mismo sistema métrico.

Ejemplo:

Calcular la escala promedio de una fotografía que fue tomada con una cámara cuya distancia focal es de 6,00 in a una altura de vuelo de 3 048,00 m y la altura promedio del terreno sobre el nivel del mar es de 1 219,20 m.

Solución:

Convertir la distancia focal de pulgadas a metros: 6,00 in \approx 0,15 m, por lo tanto, utilizando la Ec. 3 obtenemos:

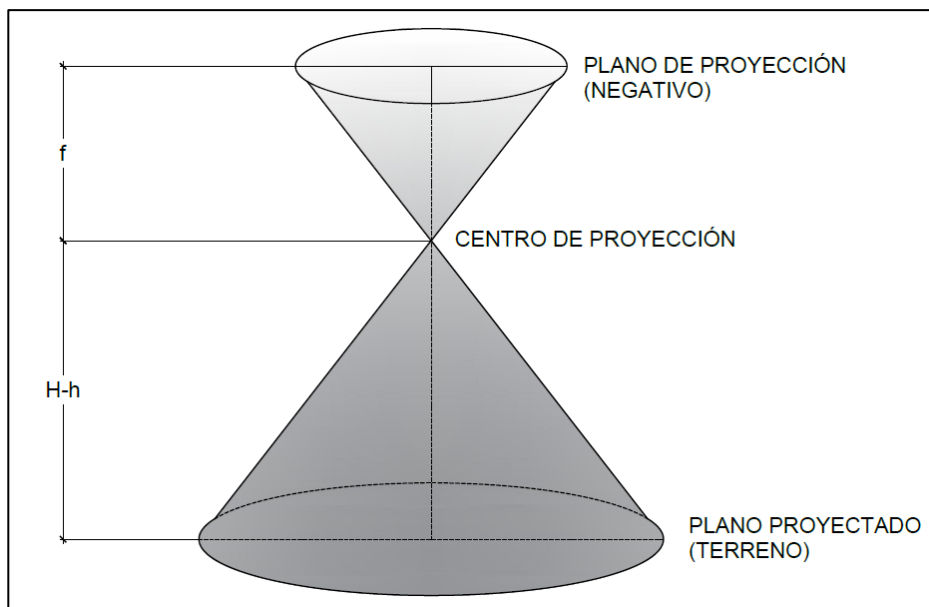
$$\frac{1}{E_m} = \frac{0,15 \text{ m}}{3\,048,00 \text{ m} - 1\,219,20 \text{ m}} \approx \frac{1}{12\,000}$$

Por lo tanto, la escala media de la fotografía es 1:12 000

1.2.5. Proyección central y proyección ortogonal

Los elementos principales de un estudio fotogramétrico son, sin duda, las fotografías de las cuales podemos decir que son imágenes reales y sinceras de un terreno en el momento de ser captado por la cámara, esto quiere decir que las fotografías están afectadas por: las deformaciones del relieve del terreno, las limitaciones debidas a la perspectiva y la inexactitud en la verticalidad de la toma. La proyección de una fotografía es central o cónica, ver figura 4, esto quiere decir que los haces de luces que emite la cámara son reflejados por el plano del terreno y pasan por el centro de proyección quedando plasmada una imagen, como se mencionó anteriormente, real y sincera del plano proyectado.

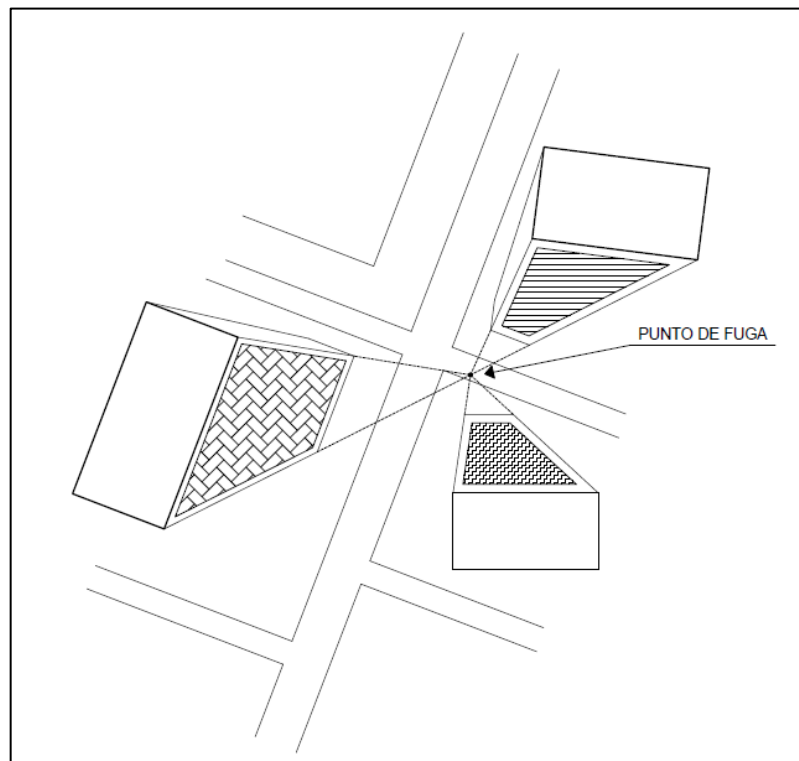
Figura 4. Esquema de la proyección central



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

Como podemos ver en la figura 5, en una proyección central no podemos realizar ningún tipo de mediciones porque la imagen esta distorsionada, por lo tanto, es necesario convertir la proyección central en una proyección ortogonal.

Figura 5. **Croquis de una fotografía, proyección central**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

Por su parte, la proyección ortogonal es aquella cuyo plano proyectado carece de punto de fuga, esto quiere decir que el efecto de perspectiva se ha eliminado de la fotografía. En la figura 6, podemos observar una sección de una ortofoto, más adelante explicaremos este tipo de producto fotogramétrico, en la que se puede observar una proyección ortogonal.

Figura 6. **Ejemplo de proyección ortogonal**



Fuente: sección de la Ortofotografía 29591_14_ORT_RGB del Instituto Geográfico Nacional (IGN), correspondiente al área y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.2.6. Formatos usados en la fotografía aérea

El formato de una fotografía aérea es el tamaño de la exposición. Comúnmente se utilizan formatos de 23 cm x 23 cm y de 18 cm x 18 cm como espacio útil, pero cada imagen registra además un marco que contiene una serie de información propia de la cámara y otra referente a la propia fotografía. En consecuencia, las dimensiones del papel son superiores en algunos centímetros a las del campo de la foto.

Debido a que los avances en la tecnología también influyen en la fotogrametría, la invención de cámaras digitales ha introducido, desde hace varios años, el formato o tipo de archivo de las fotografías digitales, por los fines que ocupa este texto solo daremos a conocer cuáles son los más comunes.

Los formatos digitales más utilizados en la fotogrametría son los .TIFF y .JPEG, aunque a veces nos podemos encontrar con los formatos .BMP. De manera sencilla podemos decir que las imágenes con formato .TIFF son las más precisas, aunque el espacio de almacenamiento es grande, seguidas de las imágenes con formato .JPEG que tiene una calidad aceptable si el factor de compresión no excede a 10 y por último las imágenes con formato .BMP que son imágenes de baja calidad.

1.2.7. Fotografía aérea de colores y en blanco y negro

De acuerdo al tipo de sensor fotográfico digital o producto químico que recubre la película o emulsión, se obtienen fotografías a color y en blanco y negro. Las fotografías en B/N ofrecen toda la gama de grises, oscilando desde el blanco al negro, son también llamadas fotografías pancromáticas.

La fotografía a color incluye toda la gama y matices de colores utilizándose en los vuelos y materiales empleados contemporáneamente. La película en su superficie contiene varias capas de emulsión, con una sensibilidad específica cada una, para los colores rojo, verde y azul. Estas fotografías proporcionan más información interpretativa puesto que los colores permiten indicar la naturaleza del terreno.

1.2.8. Fotografías infrarrojas

Específicamente para fotointerpretación se utilizan fotografías infrarrojas, estas tienen características especiales porque en ellas se captan espectros lumínicos comprendidos entre los 700 y 1 200 nanómetros, imperceptibles para el ojo humano. En este rango de longitud de onda se encuentra el dominio de la imagen térmica, que capta diferencias de temperatura en los objetos capturados en la fotografía, por la capacidad de estos de absorción y reflexión de luz infrarroja.

Un ejemplo en la aplicación de fotografías infrarrojas para interpretación consiste en el uso militar que se le da para detectar camuflaje; puesto que algunos objetos, especialmente de tipo orgánico, suelen reflejar con más potencia la luz infrarroja que lo que lo haría un uniforme militar con camuflaje.

1.3. Plan de vuelo

El uso o fin de las fotografías aéreas sirve para determinar el tipo de vuelo fotogramétrico; si se destinan para formar mosaicos fotográficos, para simples reconocimientos o estudios del terreno, o bien para formar un mapa topográfico. Como se define en la sección 1.3.2.

1.3.1. Traslape

El conjunto de fotos sucesivas tomadas durante cada travesía o cada línea de vuelo de la zona constituye una pasada. Como la observación de las vistas debe realizarse con métodos estereoscópicos, cada dos fotogramas consecutivos deben constituir un par estereoscópico, tendiendo a un recubrimiento longitudinal, cuyo valor oscila entre 50 % y 60 %, esto quiere decir

que la fotografía tomada tendrá de un 50 % a 60 % de la fotografía del área cubierta por la fotografía anterior y el mismo porcentaje para la fotografía posterior.

Cuando la zona a cubrir es muy extensa y no es posible cubrirla con una sola pasada, es necesario repetir varias pasadas paralelas y cubrir o montar transversalmente los fotogramas, evitando así lagunas o sectores sin fotografiar. Este recubrimiento entre líneas de vuelo oscila entre el 20 % y el 30 % y es conocido con el nombre de traslape o sobreposición lateral.

El propósito de la fotografía es lo más importante a considerar en la planeación de los vuelos. Por ejemplo, al tomar fotos aéreas para cartografía topográfica usando un estereotrazador, el traslape longitudinal óptimo debe ser 60 % y el lateral 30 %.

1.3.2. Cálculo de plan de vuelo

Cualquier proyecto de vuelo fotogramétrico, debe contener los siguientes parámetros:

- Distancia focal del lente de la cámara
- Dimensiones del terreno
- Porcentaje de los recubrimientos o traslapes
- Escala del fotograma
- Altura de vuelo
- Número de pasadas o número de líneas de vuelo
- El número de fotografías por pasada y el total de las mismas
- El intervalo de tiempo entre dos fotogramas

Ejemplo:

Se necesita un plan de vuelo para una zona rectangular de 27,00 km de largo por 18,00 km de ancho. La altitud media del terreno es de 0,50 km sobre el nivel del mar. La cámara es de 150 mm, y formato de 23 cm x 23 cm. El traslape longitudinal debe ser $60 \pm 5 \%$ y el lateral de $25 \pm 5 \%$. La escala requerida de la fotografía es 1:20 000 o bien la relación 1 cm / 200 m.

Solución:

Es importante recordar que todos los datos que se trabajen en el plan de vuelo deben tener las mismas dimensionales, este ejemplo será resuelto utilizando el Sistema Métrico Internacional.

Paso 1. Aplicando la Ec. 3 podemos calcular la altura de vuelo.

$$\frac{1}{20\ 000} = \frac{0,15\ \text{m}}{H - 500\ \text{m}}$$

Despejando la variable H obtenemos que altura de vuelo del avión debe ser $H = 3\ 500,00\ \text{m}$.

Paso 2. Si sabemos que el traslape longitudinal es de 60 % entonces, el avance en este sentido será $100\% - 60\% = 40\%$. De igual manera, en el sentido lateral, si sabemos que el traslape es de 25 % entonces, el avance lateral será $100\% - 25\% = 75\%$.

Para lograr cubrir toda el área del terreno y no dejar nada sin fotografiar se realiza un aumento del 30 % a cada lado del ancho del formato de la película que se está utilizando, a este aumento se lo conoce como margen. Aplicando lo dicho

anteriormente el ancho total se calcula así: $23,00 \text{ cm} \times 30 \% = 6,90 \text{ cm}$. Si utilizamos la escala para saber a cuantos metros equivalen los 6,90 cm de la película en el terreno lo hacemos por medio de una regla de tres simple, de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} 1,00 \text{ cm} \longrightarrow 200,00 \text{ m} \\ 6,90 \text{ cm} \longrightarrow X \text{ m} \end{array}$$

Se obtiene, de la regla de tres que el valor de $X = 1\,380,00 \text{ m}$ por lo tanto el ancho total del terreno es: $18\,000,00 \text{ m} + 1\,380,00 \text{ m} + 1\,380,00 \text{ m} = 20\,760,00 \text{ m}$.

De los datos anteriores se puede realizar la siguiente tabla:

Tabla I. **Tabla comparativa de datos de un plan de vuelo**

	Traslape Longitudinal	Avance Longitudinal	Traslape Lateral	Avance Lateral	Margen
%	60 ± 5	40	25 ± 5	75	30
Foto (cm)	13,80	9,20	5,75	17,25	6,90
Terreno (m)	2 760,00	1 840,00	1 150,00	3 450,00	1 380,00

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

De los datos de la tabla se puede calcular el número de líneas de vuelo con la fórmula siguiente:

$$No. \text{ de líneas de vuelo} = \frac{\text{Ancho total}}{\text{Avance lateral}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{No. de líneas de vuelo} = \frac{20\,760,00\text{ m}}{3\,450,00\text{ m}}$$

$$\text{No. de líneas de vuelo} = 6,02$$

El número de líneas de vuelo es 6,02, este valor lo podemos redondear a 6 o a 7 líneas o pasadas. Para saber cuál es el número que vamos a utilizar, despejamos de la Ec. 4 el Avance lateral y sustituimos el valor de las líneas de vuelo como veremos a continuación:

$$\text{Avance lateral} = \frac{\text{Ancho total}}{\text{No. de líneas de vuelo}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$\text{Avance lateral} = \frac{20\,760,00\text{ m}}{7} = 2\,965,71\text{m}$$

Para ambos casos calculamos, respectivamente cuanto representan en porcentaje en el terreno con una regla de tres simple y luego calculamos el traslape, esto lo hacemos con la intención de chequear cuál de los dos datos, 6 líneas o 7, es el que cumple con la condición que el traslape lateral sea 25 % ± 5 %. Por lo tanto, el cálculo lo realizamos así:

$$\begin{array}{l} 3\,450,00\text{ m} \longrightarrow 75\% \\ 3\,460,00\text{ m} \longrightarrow X\% \end{array}$$

Para la regla de tres anterior el valor del avance lateral es $X = 75,22\%$, por lo tanto, es traslape lateral es $100\% - 75,22\% = 24,78\%$. Podemos decir que este valor cumple con las condiciones necesarias, porque el rango que piden en este problema es $25\% \pm 5\%$.

Chequeando el segundo valor:

$$3\,450,00\text{ m} \longrightarrow 75\%$$

$$2\,965,71\text{ m} \longrightarrow X\%$$

Para la regla de tres anterior el valor del avance lateral es $X = 64,47\%$, por lo tanto, el traslape lateral es $100\% - 64,47\% = 35,53\%$. Podemos decir que este valor no está bien porque el rango que nos piden en este problema es $25\% \pm 5\%$. Así, pues, el número de líneas de vuelo o pasadas en este problema es 6.

Paso 3. Para calcular el número de fotografías en este plan de vuelo lo hacemos con la fórmula siguiente:

$$\text{No. de fotos (por línea de vuelo)} = \frac{\text{Longitud del terreno}}{\text{Avance logitudinal}} + 4 \quad (\text{Ec. 5})$$

Se estima que para garantizar el cubrimiento completo de cada línea es necesario aumentar dos fotografías al comienzo y dos al final por cada línea. Por lo tanto, el número de fotos para nuestro problema será:

$$\text{No. de fotos (por línea de vuelo)} = \frac{27\,000,00\text{ m}}{1\,840,00\text{ m}} + 4 \approx 19 \text{ fotografías}$$

El número total de fotografías es: $19 \text{ fotos} \times 6 \text{ líneas} = 114 \text{ fotografías}$.

1.4. Estereoscopia

La Real Academia Española RAE, define la estereoscopia como: sensación visual de relieve. Esta definición sencilla pero concisa la ampliaremos y aplicaremos a la fotogrametría de la manera siguiente:

La estereoscopia es la técnica utilizada en la fotogrametría para lograr la percepción visual de un objeto en tres dimensiones o visión estereoscópica, este fenómeno se logra cuando una persona mira simultáneamente a dos imágenes de la misma escena desde puntos diferentes, la distancia entre los puntos de observación del mismo objeto se le denomina paralaje, viendo cada imagen con un ojo, como resultado de esta técnica obtenemos la percepción de la profundidad. Naturalmente una persona posee visión estereoscópica por la posición de los ojos, esta capacidad queda anulada casi en su totalidad si una persona cubre un ojo y enfoca la mirada en un objeto con el ojo descubierto, decimos casi totalmente pues, el cerebro capta la imagen y no percibe la profundidad sino solamente se da una idea que esta existe por la luz y la sombra que los objetos reflejan. El ángulo formado entre la posición de los dos ojos y el objeto que se visualiza se llama ángulo paraláctico.

Las técnicas estereoscópicas que se utilizan actualmente son de muchas clases y aplicaciones, podemos decir que los principios de la estereoscopia son utilizados en la proyección de películas en formato de tres dimensiones, 3D.

1.4.1. Clases de estereoscopios

El estereoscopio es un instrumento que permite percibir la profundidad de un par de fotografías que tengan paralaje. El efecto estereoscópico sería muy difícil de apreciar sin estos aparatos.

La invención del estereoscopio se le atribuye al científico británico Sir Charles Wheatstone, en el año 1840. La diferencia entre los estereoscopios radica en el método óptico usado para evitar que las líneas de visión converjan en el plano o punto focal.

Básicamente podemos encontrar las siguientes clases de estereoscopios:

- Estereoscopios de refracción, de lentes o de bolsillo
- De reflexión o de espejos
- Combinación de los anteriores

Los estereoscopios tienen la gran desventaja de que, solo se puede ver un par estereoscópico de fotografías a la vez. En la sección 3.3.1 de este texto veremos cómo se pueden hacer modelos digitales del área fotografiada por medio del uso de software que utilizan los principios básicos de la estereoscopia.

1.4.2. Percepción de la profundidad

Para lograr la percepción de la profundidad en la fotogrametría es necesario tener por lo menos los siguientes requisitos:

- Tener dos fotografías del objeto que se está estudiando.
- Las fotografías deben tener la misma escala o una muy próxima.
- Cada ojo debe mirar el mismo objeto en las dos fotografías.
- El traslape longitudinal de las fotografías debe estar entre el 50 % y 60 % del terreno fotografiado.
- Que las fotografías tengan paralaje.

La percepción de la profundidad permite identificar objetos que, vistos en una sola imagen, son difíciles de reconocer. Así también por medio de la percepción de la profundidad es posible trazar curvas de nivel en los mapas que se pueden obtener aplicando métodos fotogramétricos.

1.5. Fotocontrol

Es el proceso mediante el cual se controla la escala de la fotografía, especialmente la de los modelos fotogramétricos, formados por pares de fotografías con recubrimiento longitudinal y transversal. Para esto, se determina la localización en un sistema de coordenadas en el espacio de por lo menos cuatro puntos por modelo, ya que tres de ellos, que no estén en línea recta, determinan la posición de un plano y el cuarto es para comprobación. Estos puntos aumentan la precisión de los modelos cartográficos o topográficos que se generen del estudio fotogramétrico.

Según el tipo de información los puntos pueden ser:

- De control planimétrico: aquellos a los que se le conocen las coordenadas X y Y.
- Puntos de control altimétrico: aquellos a los que se le conoce la elevación Z.

Según la presentación los puntos pueden ser:

- Naturales: son aquellos que corresponden a detalles específicos del terreno, perfectamente definido, generalmente situados sobre la superficie terrestre.

- Señalizados: aquellos que no corresponden a detalles específicos y para identificarlos se construye una señal sobre la superficie del terreno con anterioridad al vuelo.

Según la determinación de sus coordenadas, los puntos pueden ser:

- De control terrestre: son aquellos cuyas coordenadas se han determinado directamente en el terreno por métodos geodésicos y topográficos de precisión.
- De control fotogramétrico: son aquellos cuyas coordenadas se han determinado directamente en el laboratorio por métodos fotogramétricos.
- Artificiales: son aquellos que no corresponden a detalles específicos del terreno ni tampoco se les ha construido una señal para identificarlos. Son puntos marcados con instrumentos especiales y se utilizan en el proceso de triangulación aérea, ver sección 1.8. Aéreo triangulación.

1.6. Restitución fotogramétrica

La restitución fotogramétrica es sin duda el procedimiento más importante en la fotogrametría pues todo lo que hasta ahora hemos expuesto como: los tipos de fotografías, el plan de vuelo, la estereoscopia y el fotocontrol son los procedimientos necesarios para llegar a la reconstrucción del terreno fotografiado, es decir, restituirlo.

Los resultados de la restitución incluyen la transformación de la proyección central o cónica, fotografía, en una proyección ortogonal que permite la determinación de magnitudes cuantitativas geométricas como pueden ser:

longitudes, superficies y volúmenes. Otro de los resultados de la restitución fotogramétrica es permitir elaborar planos, hacer levantamientos topográficos y generar MDT, es decir, que sin la restitución fotogramétrica no tendríamos más que pares estereoscópicos que no aportan más que información visual.

Básicamente el método de restitución fotogramétrica consiste en eliminar la paralaje de las fotografías, la corrección de los ángulos que puede tener una fotografía a causa del ladeo, cabeceo y la deriva, que son movimientos del avión. Estas correcciones se pueden hacer por tres métodos que a continuación veremos.

1.6.1. Aparatos y métodos para restitución fotogramétrica

Los métodos para convertir un modelo estereoscópico a un modelo restituido, que aporte información precisa como son los mapas y las ortofotografías u obtener datos para crear un MDT, son tres. Dichos métodos de restitución son los siguientes:

- Método analógico: surge en la década de 1930, basado en aparatos de restitución y es el responsable de la realización de la mayoría de la cartografía mundial. En él, un par de fotografías son colocadas en un aparato restituidor de tipo óptico o mecánico. El operador realiza de forma manual la orientación interior y exterior para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado. El levantamiento de la información planimétrica y altimétrica del modelo se realiza también de forma manual, mediante el seguimiento con la marca flotante del restituidor, posada sobre los detalles de la superficie del modelo. Esta información es ploteada en una cartulina colocada sobre una mesa trazadora, relacionada con el modelo por medios mecánicos o eléctricos.
- Método analítico: aparece en 1957 como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos y el surgimiento de la computación. En él, la toma de información es analógica y el modelo geométrico es matemático. Mediante el uso de monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas X, Y de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas de la computadora. Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior de forma analítica y

procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos de tipo CAD.

- Método digital: surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadoras. Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortofotografías y estereofotografías, generación y visualización de modelos tridimensionales, etc. Para llevar a cabo la restitución digital, las imágenes digitales son ingresadas en la computadora, y mediante visualización en pantalla de las mismas, el operador ingresa los puntos necesarios para realizar el proceso de orientación en forma matemática. La restitución puede ser un proceso iterativo con el operador o ser realizada de forma automática por correlación de imágenes. La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato ráster o formato vectorial.²

Así, pues, los instrumentos de proyección óptica, usados en el método analítico, se consideran actualmente obsoletos, pero se prefieren para iniciar a los estudiantes en el estudio de la fotogrametría por su diseño y operación relativamente simple. Los instrumentos con proyección mecánica sustituyeron en la práctica a los instrumentos de proyección óptica, pero de igual manera, los instrumentos mecánicos están siendo sustituidos gradualmente por instrumentos analíticos y digitales.

² JAUREGUI, Luis. *Introducción a la Fotogrametría*. p. 3.

Figura 7. Restituidor fotogramétrico digital



Fuente: departamento de fotogrametría del Instituto Geográfico Nacional IGN.

Tomada de la galería propia del autor.

1.7. Productos fotogramétricos utilizando vehículos aéreos tripulados

1.7.1. Mosaicos

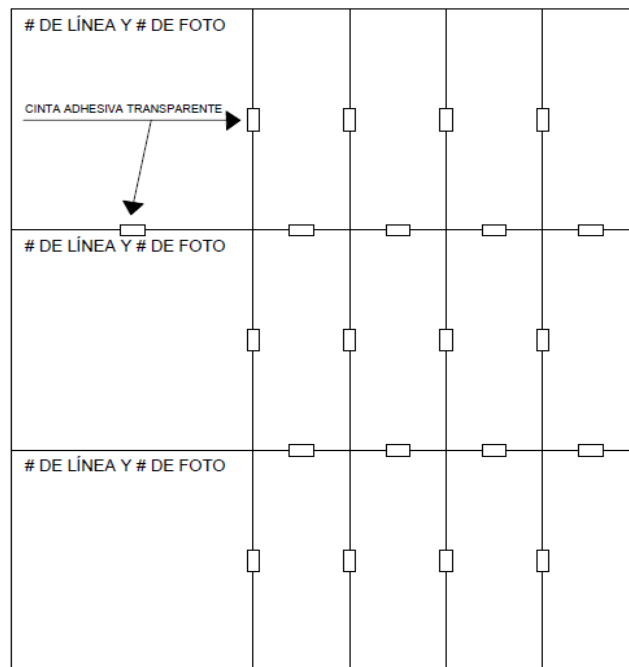
Se define como el conjunto de fotografías aéreas ordenadas de acuerdo al número de línea y número de fotografía, según el plan de vuelo del avión.

1.7.1.1. Mosaico índice

Se llama mosaico índice al conjunto de fotografías dispuestas sobre un tablero o mesa de trabajo, de tal manera que se trata de traslapar el 60 % de cada foto procurando igualar detalles comunes en cada una de ellas, dando continuidad al mosaico. Las fotografías se pegan con cinta adhesiva y se les coloca una etiqueta con el número de línea y número de foto, esta debe ser de

un tamaño tal que al tomarle al mosaico la fotografía de conjunto y al reducirse se puedan seguir observando dichos números. La precisión de este tipo de mosaico es mala pues las fotografías aéreas no son rectificadas por ningún método, es fácil y barato de construir, es utilizado para asuntos forestales, donde la precisión, en algunas ocasiones, no importa. Este tipo de mosaico también es llamado foto-índice.

Figura 8. **Esquema de un mosaico índice**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2017.

1.7.1.2. **Mosaico de contacto o semicontrolado**

El mosaico de contacto es un conjunto de áreas centrales de fotos pegadas y luego fotografiadas sin o con apoyo muy limitado de mapa topográfico o control

de campo; es decir un foto-mapa en el cual el desplazamiento del relieve no es eliminado y cuya escala no es uniforme.

1.7.1.3. Mosaico rectificado

El mosaico rectificado o controlado es un conjunto de áreas centrales de fotos pegadas sobre un tablero o base resistente y luego fotografiado que incluye un control topográfico o de campo, con coordenadas geográficas conocidas. Se usan fotografías rectificadas. Por medio de la rectificación, los puntos previamente localizados en la foto original son proyectados a una red de puntos cuyas coordenadas ya fueron establecidas. Por lo tanto, las fotos rectificadas tendrán una escala uniforme. Para construir fotomosaicos controlados o rectificados de terrenos de grandes extensiones, cuya topografía no fue revelada con la precisión requerida, la rectificación debe fundarse sobre un mapa preparado con algún método de rectificación. Una vez rectificadas las fotos, pegadas cuidadosamente sobre un tablero y fotografiadas, se puede proceder a volcar directamente la interpretación de los fotogramas.

1.7.2. Mapas

Los mapas son los productos por excelencia de la fotogrametría. Actualmente existen dos modalidades de medios de presentación de los mapas: los tradicionales, los cuales son ploteados sobre una mesa de dibujo por el aparato restituidor, y los numéricos los cuales son realizados mediante una interfase que conecta los movimientos del aparato restituidor para que puedan ser realizados mediante un programa CAD. En estos programas, los elementos que conforman la información que se extrae del modelo, se registran mediante puntos, líneas y polígonos, en diferentes capas según su contenido temático. Esta información puede completarse una vez hecha la restitución, por lo que se

obtiene un plano digital del terreno, que, por su naturaleza, se presta especialmente para su utilización en los SIG.

1.7.3. Ortofotomapas

Es una ortofoto hecha a una escala determinada, sobre la cual se añade la información convencional que posee un mapa.

1.8. Aéreo triangulación

Es el procedimiento en el cual las coordenadas de los puntos de fotocontrol se establecen mediante métodos de medición, en un instrumento fotogramétrico.

1.8.1. Aéreo triangulación analógica

Se emplea con restituidores analógicos, preferiblemente dotados de registrador de coordenadas y con apoyo de un ordenador. El primer par de fotografías se orienta con ayuda de puntos reales, medidos sobre el terreno. A continuación, se miden las coordenadas de los nuevos puntos de apoyo que se hayan elegido para ese par.

Para orientar el segundo par de fotografías se deja el segundo fotograma del par anterior y se invierte la base. Como este segundo fotograma ya estaba orientado, basta realizar la orientación relativa y el ajuste de escala para que lo esté el segundo par de fotografías. A continuación, se miden las coordenadas de los nuevos puntos de apoyo.

Se continúa de este modo hasta llegar al final de la línea o pasada del avión, momento en que se puede realizar la compensación conjunta de los errores

detectados con ayuda de los puntos de apoyo reales correspondientes a la zona final de la pasada. Finalmente se realiza la restitución, con los puntos de apoyo medidos.

1.8.2. Aéreo triangulación analítica

En este caso las coordenadas a emplear son referidas al punto principal de cada fotograma. Todos los cálculos, el enlace de modelos, la determinación y compensación de coordenadas se realizan mediante el ordenador.

2. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS O DRONES

El Ministerio de Defensa de los Estados Unidos define los UAV como:

Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable, y que puede transportar una carga de pago letal o no. No se considera UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería.

La carga de pago o también llamada sencillamente carga es el bien o mercancía que transporta un vehículo, barco, avión, drone, tren o camión, con el objetivo de obtener un beneficio. Los drones pueden llevar cargas de pago pasivas como por ejemplo cualquier sensor del que este equipado, cargas activas como por ejemplo los perturbadores de señal y cargas letales, estas últimas pueden ser misiles y/o bombas.

La DGAC de Guatemala, en la Regulación de Aeronaves no Tripuladas, Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales – RAC 101, define los UAV como:

Aeronaves no tripuladas, que no sea un globo o una cometa.

2.1. Evolución de los UAV a través de la historia

El ser humano, desde hace siglos, tuvo la idea de inventar algo que le permitiera conquistar el espacio aéreo, uno de los primeros registros que se tienen de estos primeros inventos data alrededor del año 400 A.C. por el estudioso griego Arquitas de Tarento que inventó un artefacto volador que bautizó con el nombre de Paloma.

Muchos han sido los intentos de inventar artefactos voladores desde Arquitas, mencionar cada uno sobrepasaría los fines de esta investigación, por lo que trataremos de hacer una síntesis que nos permita saber cómo han evolucionado los vehículos aéreos no tripulados.

En el año 1804 el inventor inglés George Cayley hizo el diseño de un planeador no pilotado, moderno para aquella época, a Cayley se le atribuye la deducción de muchas de las leyes básicas de la aerodinámica.

La idea de utilizar naves no tripuladas con fines militares es relativamente nueva, desde la primera mitad siglo XVIII se tiene documentado el primer intento en utilizar una nave aérea sin llevar ningún pasajero a bordo, este intento fue realizado por el ejército austriaco en el año 1849, los militares europeos implementaron globos aerostáticos manejados por cuerdas para bombardear Venecia, este intento no tuvo éxito.

Un evento histórico relevante es el invento del científico serbio Nikola Tesla conocido en español como teleautómata, este invento creado en 1898 a pesar de no ser un vehículo aéreo, no era tripulado. El teleautómata era un artefacto marítimo capaz de codificar y decodificar ondas hertzianas para moverse, este artefacto es considerado el precursor del submarino y de los vehículos

controlados remotamente. Tesla es considerado como el padre de la aviación no tripulada.

El primer vuelo con éxito de una aeronave no tripulada tuvo lugar en el año 1918 cuando el inventor estadounidense Elmer Ambrose Sperry diseñó el sistema de orientación y control remoto del torpedo llamado *Kettering Bug*. Como podemos ver este invento se realizó durante la Primera Guerra Mundial, las guerras han sido las causas principales que han motivado la creación de vehículos aéreos no tripulados. Para la Segunda Guerra Mundial los británicos construyeron el avión no tripulado llamado *Queen Bee* y los estadounidenses crearon paralelamente el modelo RP4, estos dos modelos eran utilizados como sistema de entrenamiento para las fuerzas de artillería de ambos ejércitos. A través de estos aviones, se fue desarrollando de manera temprana la tecnología y el uso de control remoto por radio.

Como dato interesante podemos ver en la historia de los vehículos aéreos no tripulados que los británicos construyeron el *Queen Bee*, abeja reina en español, entre los años 1934 y 1943, mientras que los estadounidenses construyeron el *Target Drone Deny 1*. Lo interesante de esto es que la palabra drone, utilizada para referirse a un VANT, es una adaptación al español de la palabra en idioma inglés *drone* que significa zángano, el zángano es la abeja macho encargada de aparearse con la abeja reina. Muchas son las formas que podemos utilizar para referirnos a los vehículos aéreos no tripulados, nosotros utilizaremos UAV, VANT, RPAS Sistema Aéreo Pilotado Remotamente, por sus siglas en inglés o drone indistintamente.

Todos los VANT creados hasta finales de la Segunda Guerra mundial eran utilizados como blancos aéreos de entrenamiento para las fuerzas militares de los países que los construían. Fue hasta el inicio de la Guerra Fría, hacia el año

1947, que los vehículos aéreos comenzaron a tener un nuevo uso, el reconocimiento sobre territorio enemigo. El modelo más relevante de UAV, durante esta época, fue el *Firebee*, esta aeronave volaba a gran altitud y estaba equipada con cámaras fotográficas, como antes mencionamos, para reconocimiento de territorio enemigo. Las fotografías eran reveladas en la base cuando el UAV retornaba.

Durante la década de 1970 daba inicio la Revolución de la Microelectrónica, esto constituía un gran avance en el sistema de los drones pues estos se empezaron a equipar con cámaras de video y sensores infrarrojos y, treinta años más tarde, en el año 2000 los UAV ya eran equipos de alto rendimiento pues los modelos más avanzados cuentan con GPS y SAR, esta herramienta es utilizada en teledetección y cartografía, también cuentan con sistemas sofisticados de video para tener imágenes en tiempo real de un terreno, tal es el caso de *Northrop Global Hawk*, este es un VANT de gran tamaño con una envergadura de 35,41 m capaz de volar a una velocidad de 800,00 km/h, alcanza alturas de casi 20 000,00 m y tiene una autonomía de vuelo alrededor de 36,00 h. Su gran altura de vuelo, su velocidad, la autonomía y los sofisticados equipos con los que está preparado hacen que el *Northrop Global Hawk* sea capaz de escanear un país entero en un solo día.

Este modelo supone un gran avance en la era de los drones pues su uso ya tiene diversas aplicaciones, por ejemplo, la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA, propuso utilizarlos para llevar a cabo campañas de muestreo y análisis de las capas altas de la atmósfera en todo el planeta, junto con la obtención de información para su uso en la predicción del tiempo.

El desarrollo acelerado de la tecnología ha producido que las empresas y personas particulares hayan creado UAV de tamaños diminutos, más silenciosos,

de vuelo ágil y complejo y que puedan estar equipados, a pesar de su pequeño tamaño, con equipos como GPS, cámara digital de alta resolución, cámara multiespectral y telemetría. Muchos drones están utilizando la tecnología SMART y son pilotados remotamente por medio de teléfonos, el uso de la tecnología SMART fue aplicada de primera mano en un Vehículo no Tripulado de Combate Aéreo UCAV, tal es el caso del modelo MQ-9 *Reaper*. Con este tipo de tecnología se pretende que los drones tengan una operación completamente autónoma como ver y evitar obstáculos en su camino, y replantear la misión que se les sea asignada cuando esta tenga algún inconveniente en realizarse.

2.2. Tipos y características de UAV

Como pudimos ver en la sección anterior la evolución de los vehículos no tripulados desde la creación del Teleautómata de Tesla hasta la década de 1970 ha sido, casi en su totalidad, para uso militar. La Revolución de la Microelectrónica dio paso al desarrollo de vehículos no tripulados de tamaño, incluso, diminuto. Por lo tanto, la manera más sencilla que podemos utilizar para definir los tipos de drones es de acuerdo a su diseño, así pues, tenemos los dos tipos siguientes:

- VANT de ala fija: su diseño es similar al de un avión, pueden tener envergaduras tan grandes como la del *Northrop Global Hawk* 35,41 metros, y pequeñas como la de un *drone* utilizado para realizar trabajos topográficos, por ejemplo, el Trimble UX5 1,00 metro.
- VANT multirotor: utilizan de dos hasta ocho rotores para volar, tienen la capacidad de mantenerse suspendidos sin variar su posición gracias a sus giroscopios y estabilizadores. Los más comunes son los *quadcopters* o drones de cuatro rotores.

Es casi imposible mencionar todos los tipos de VANT que existen, en especial los de uso civil puesto que esta tecnología en la actualidad ha cobrado un auge inmenso, muchas son las personas y empresas que se están dedicando a desarrollar y estudiar esta tecnología y la manera de perfeccionar las aplicaciones que se les dan a los VANT como: comerciales, industriales, publicitarias, informativas y recreativas o estudiar nuevos usos, de aquí que, podemos clasificar los drones de la manera siguiente:

- VANT militares
- VANT de uso civil
 - Comercial
 - Para aficionados
- VANT de uso gubernamental

Pero sin duda podemos tipificar los VANT por categorías más específicas, en la tabla II la clasificación de los drones está basada de acuerdo al alcance que estos tienen, los acrónimos utilizados en esta tabla son los derivados del nombre de la categoría, pero, en idioma inglés. Un acrónimo puede ser una o más letras o una o más siglas que se pronuncian como una sola palabra, así, por ejemplo, el acrónimo CR es derivado de las palabras en inglés *Close Range*, Corto Alcance.

Tabla II. Tipos y características de drones

CATEGORÍA	ACRÓNIMO	ALCANCE (km)	ALTITUD DE VUELO (m)	AUTONOMÍA (h)	CARGA MÁXIMA (kg)
Micro < 250 gr.	Micro	<10	250	1	<5
Mini < 25 kg.	Mini	<10	150 y 300	<2	<30
Alcance cercano	CR	10 a 30	3 000	2 a 4	150
Alcance corto	SR	30 a 70	3 000	3 a 6	200
Alcance medio	MR	70 a 200	5 000	6 a 10	1 250
Altitud baja	LADP	>250	50 a 9 000	0,5 a 1	350
Autonomía media	MRE	>500	8 000	10 a 18	1 250
Autonomía alta / Altitud baja	LALE	>500	3 000	>24	>30
Autonomía alta / Altitud media	MALE	>500	1 4000	24 a 48	1 500
Autonomía alta / Altitud alta	HALE	>2 000	20 000	24 a 48	12 000
Combate	UCAV	1 500	10 000	2	10 000

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

2.3. Uso de los UAV en la topografía

Para utilizar un dron en Guatemala es necesario cumplir con la Regulación de Aeronaves No Tripuladas, Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales – RAC 101 emitida por la DGAC.

En Guatemala el uso de los vehículos aéreos no tripulados está empezando a florecer, sin embargo, en otros países la explotación de esta tecnología para fines topográficos es muy amplia. Los drones pueden ser utilizados como herramientas en topografía aérea para obtener ortofotografías y modelos de elevación de terrenos, esta información puede ser usada en planificación de proyectos de construcción, también, se pueden incluir las ortofotos y los modelos de elevación en un SIG y se pueden utilizar para realizar trabajos de catastro.

No se puede definir qué tipo de VANT es el más utilizado en trabajos topográficos pues cada empresa utiliza el modelo que ha desarrollado o el que mejor se ajuste a sus necesidades, automatice el proceso de trabajo y lo optimice. Algunas empresas prefieren utilizar drones de ala fija y otras prefieren los drones multirrotor.

Como se verá en las siguientes secciones los *drones* necesitan de apoyo de otras herramientas tecnológicas para poder realizar trabajos topográficos y cartográficos, como software o App, para realizar el plan de vuelo, telemetría para realizar un vuelo autónomo, cámaras digitales para toma de fotografías, GPS, que funge como apoyo topográfico, software para realizar la restitución fotogramétrica y la vinculación informática al CAD, para obtener MDT.

3. FOTOGRAMETRÍA AÉREA CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

3.1. Equipo utilizado en la fotogrametría aérea con UAV

A continuación, se presenta la descripción del equipo utilizado en la fotogrametría aérea con UAV.

3.1.1. Cámara digital calibrada

A causa de los grandes avances tecnológicos y la desaparición, casi en su totalidad, de las cámaras analógicas nos es imposible, como ya hemos dicho respecto a los UAV, describir y nombrar los tipos y características de las cámaras digitales. Uno de los grandes cometidos de la fotogrametría es la precisión en los productos obtenidos por medio de este estudio, por esta razón, el hecho de trabajar con equipo fotográfico que no tiene definidos sus parámetros ópticos, llamado cámaras no métricas, de las cuales están equipadas algunos UAV como el Phantom 4 Pro, utilizado en esta investigación, obliga a realizar un proceso de calibración de lentes. Dicho proceso básicamente consiste en sacar una serie de fotografías con una metodología estudiada para el posterior cálculo de los parámetros del sensor y de distorsiones de la lente.

En otras palabras, las cámaras métricas son cámaras especiales de funcionamiento similar a las convencionales, pero con una calibración precisa de sus parámetros ópticos, de los cuales el más importante es la distancia focal f , parámetro esencial para calcular la escala de una fotografía como vimos en la Ec. 3 en la sección 1.2.4.

La distancia focal se define como la distancia desde el centro del objetivo hasta el plano focal donde se ubica la película.

3.1.2. Cámara multiespectral

El ojo humano es capaz de percibir solamente tres bandas de colores en el amplio espectro electromagnético, estos colores son rojo, verde y azul, las cámaras fotográficas y de video, por lo general, captan las imágenes en este rango de espectro electromagnético que va desde los 390 a 750 nanómetros de longitud de onda, aunque este rango puede tener algunas variaciones.

Debido a esta limitación, existen sensores capaces de detectar ondas electromagnéticas invisibles al ojo humano llamados cámaras multiespectrales y algunos más avanzados, las cámaras hiperespectrales.

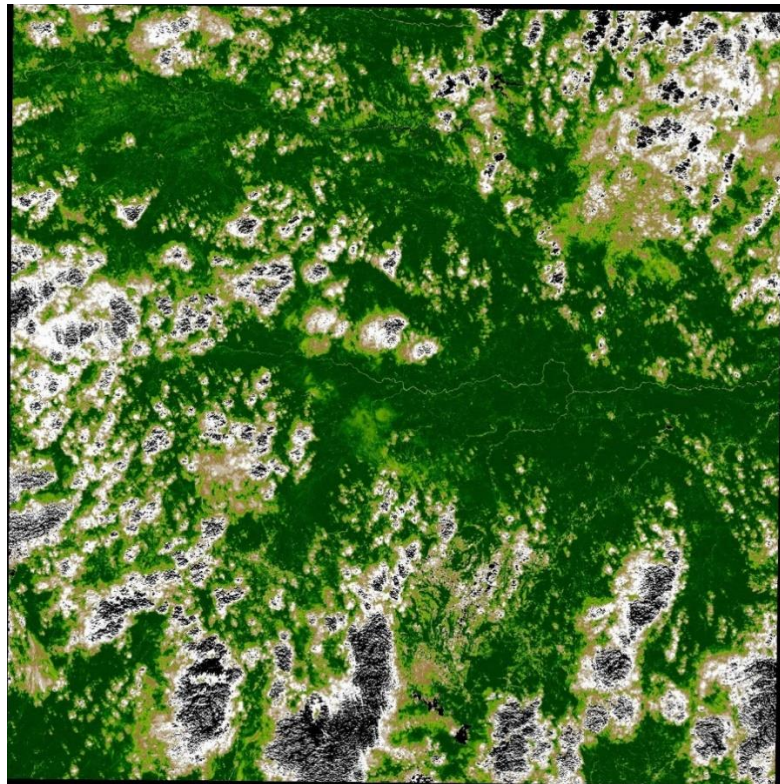
Las imágenes multiespectrales o hiperespectrales son utilizadas en la ciencia de la teledetección, esta consiste en la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno como por ejemplo los efectos del cambio climático en nuestro planeta. La adquisición de imágenes multiespectrales permite el análisis de áreas u objetos que emiten o reflejan radiación a un nivel superior al de los objetos circundantes.

Aunque el equipo UAV utilizado en esta investigación, Phantom 4 Pro, no cuenta con una cámara multiespectral hemos de decir que las imágenes pueden ser modificadas por un distribuidor autorizado y ser convertidas en imágenes multiespectrales.

También, existe la posibilidad de adaptar un sensor al *drone* y así obtener imágenes multiespectrales inmediatamente.

Para ejemplificar los resultados que se pueden obtener con las cámaras multiespectrales se presenta la figura 9, que contiene información de la zona central de Guatemala tomada por el satélite Sentinel-2 y descargada de Land Viewer. Esta imagen tiene como filtro, bandas de colores de acuerdo al uso que se le dará a la fotografía y predefinido por Land Viewer, Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, por sus siglas en inglés. Otros de los usos que podemos dar a las imágenes multiespectrales es la cartografía de estrés hídrico cuando existe explotación de algún cultivo y seguimiento fitosanitario de masas forestales, por mencionar algunas aplicaciones.

Figura 9. **Imagen NDVI de la zona central de Guatemala**



Fuente: imagen NDVI de la zona central de Guatemala, Satélite Sentinel-2.

3.1.3. Cámara termal

Como muchos de los inventos tecnológicos, incluidos los UAV, las cámaras termal o térmicas nacen en el ámbito militar y para aplicaciones específicas en esa área.

Las cámaras térmicas permiten visualizar la energía o calor emitido por un objeto que el ser humano no puede detectar a través de sus ojos, ya que esta energía es absorbida por los fluidos y la lente del mismo. Estos equipos permiten ver la radiación térmica emitida por los objetos independientemente de las condiciones de iluminación.

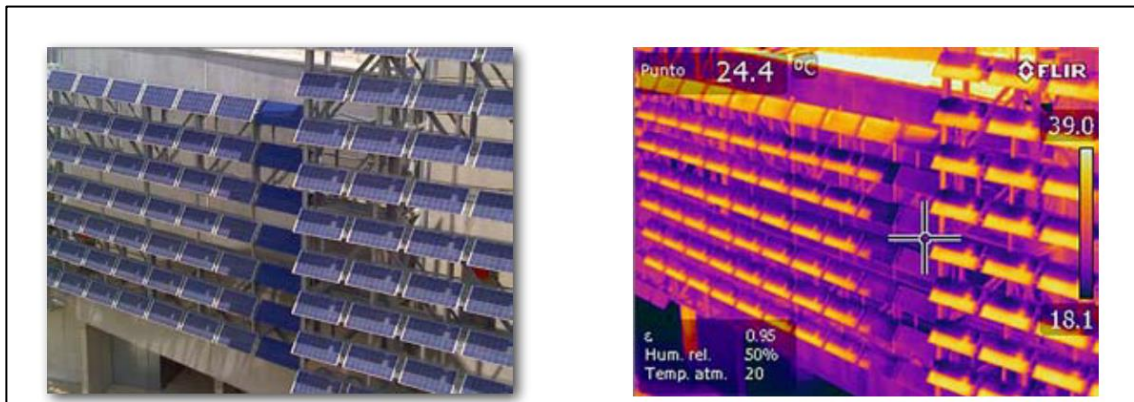
Tal y como desarrollamos en la sección 1.2.8., respecto de las fotografías infrarrojas, las imágenes producidas por las cámaras térmicas son, también, monocromáticas, un solo color, porque las mismas han sido diseñadas con un solo tipo de sensor que responde a un rango de espectro infrarrojo. Algunas veces estas señales son procesadas de acuerdo a su intensidad para generar pseudo colores. Las partes más calientes del objeto visualizado son representadas por el blanco, las temperaturas intermedias por el amarillo y rojo y las más frías por el color azul.

La metodología para tomar fotografías térmicas se parece mucho a la utilizada en la toma de fotografías aéreas.

Para reunir la información, el dron vuela sobre un área determinada con una cámara montada en el fuselaje del UAV y orientada directamente hacia la superficie a fotografiar. En lo que la termografía infrarroja difiere de la fotografía aérea convencional es en, los factores ambientales, la hora del día en la cual ocurre la inspección y en la longitud de onda de las imágenes que obtiene el

sensor, ya que la termografía revela fuentes de calor y las diferencias relativas de calor de un objeto a otro.

Figura 10. **Diferencia entre una fotografía convencional y una fotografía térmica infrarroja**



Fuente: producción cartográfica con UAVs, Amfiteatro de Tarragona.

3.1.4. GPS

GPS es un sistema que tiene como objetivo la determinación de las coordenadas espaciales de puntos respecto a un sistema de referencia mundial. Los puntos pueden estar ubicados en cualquier lugar del planeta, pueden permanecer estáticos o en movimiento y las observaciones pueden realizarse en cualquier momento del día.

Para la obtención de coordenadas el sistema se basa en la determinación simultánea de las distancias a cuatro satélites, como mínimo, de coordenadas conocidas. Estas distancias se obtienen a partir de las señales emitidas por los satélites, las que son recibidas por receptores especialmente diseñados. Las señales de los satélites son provistas al receptor por el sistema.

Desde el punto de vista geodésico-topográfico el sistema GPS responde a dos requerimientos básicos:

- Planteo directo o levantamiento: se tiene en el terreno un punto materializado, un pilar con placa y marca, un monjón o para nuestro caso particular un punto que permita ser identificado sin ningún problema en las fotografías aéreas que lo contengan. Se piden sus coordenadas en un sistema de referencia prefijado.
- Planteo inverso o replanteo: se dan las coordenadas de un punto en sistema de referencia determinado y se pide la localización de dicho punto, que, de no estarlo ya, será materializado en el terreno.

Debido a que este sistema fue primordialmente para uso militar y posteriormente fue habilitado para uso civil su operatividad no implica un compromiso legal del gobierno de Estados Unidos. Por lo tanto, la Agencia Cartográfica del Departamento de Defensa NIMA, por sus siglas en inglés, puede modificar sin previo aviso su funcionamiento alterando o limitando el acceso a uno o más componentes de la señal, alterando el estado de los relojes de los satélites o degradando la precisión de las órbitas.

Las técnicas para realizar levantamientos con receptores GPS son variadas, así como son variados los equipos que se pueden utilizar, hablando desde el punto de vista comercial. En nuestro caso realizamos un levantamiento en modo estático utilizando dos receptores diferenciales de la marca Ashtech modelo ProMark 2, uno como base y el otro como rover, y apoyando la toma de datos a una antena CORS ubicada en el IGN. La técnica y los datos recolectados post-procesados serán expuestos más adelante en la sección 3.2.2. Apoyo topográfico.

Las precisiones que podemos alcanzar utilizando el GPS diferencial en modo estático de la marca antes mencionada proporcionada por el fabricante son las siguientes:

- Horizontal: 5 mm + 1 ppm
- Vertical: 10 mm + 2 ppm
- Tiempo de observación de 20 a 60 minutos dependiendo de la distancia entre los receptores.

3.1.5. Telemetría

Etimológicamente la palabra telemetría proviene de los vocablos griegos tele que significa distancia y metrón que significa medida, por lo tanto, se entiende por telemetría al dispositivo electrónico del cual están equipados los UAV que detecta, mide y controla de forma automática los datos del dispositivo remoto, en este caso el dron. Su principal ventaja es la transmisión de datos desde algún dispositivo a un punto de control central incluyendo, el envío de configuración y control a los dispositivos.

Algunos UAV presentan una pequeña pantalla incrustada en el mando o control remoto que contiene información tal como el estado de la batería, tanto del dron como del mando, el tiempo transcurrido desde el momento de despegue, número de satélites disponibles, velocidad del dron y la altura de vuelo.

En el caso del trabajo fotogramétrico que hemos realizado, el mando no contiene esta pantalla integrada al mismo, sino que, estos datos pueden visualizarse en un dispositivo móvil, tableta o teléfono inteligente, por medio de la aplicación con la que se ha hecho el plan de vuelo.

Por otra parte, también, son considerados como datos de telemetría los contenidos en la fotografía, como las coordenadas que son datos fundamentales en el trabajo de gabinete para orientar las fotografías en el software de restitución fotogramétrica.

3.2. Descripción del método

El procedimiento para realizar fotogrametría aérea utilizando UAV se compone de cuatro pasos básicos, los cuales vamos a desarrollar a continuación.

3.2.1. Plan de vuelo

Como parte del trabajo de gabinete inicial, al igual que el procedimiento convencional expuesto en la sección 1.3. Se realiza el diseño de vuelo en función de la resolución que se pretende obtener de la extensión de terreno que se quiere representar.

Primero debemos seleccionar el modo de vuelo que queremos que realice nuestro dron, algunas aplicaciones como la utilizada en nuestro caso, de nombre Pix4Dcapture, presenta cinco modos de vuelo:

- Vuelo para un polígono irregular
- Vuelo de una grilla
- Vuelo de dos grillas
- Vuelo circular
- Vuelo libre

Seguido de seleccionar el modo de vuelo se programa un plan de vuelo mediante *Waypoints* en la aplicación donde programamos una ruta que se

ejecutará de forma autónoma, esta ruta la podemos seleccionar fácilmente pues las aplicaciones presentan una serie de fotografías satelitales que nos permiten posicionarnos en el lugar que queremos realizar nuestro proyecto, así mismo se programan la velocidad de desplazamiento del dron, los traslapes longitudinales y transversales y la inclinación de la cámara. Para los objetivos que pretendemos alcanzar utilizamos los siguientes parámetros:

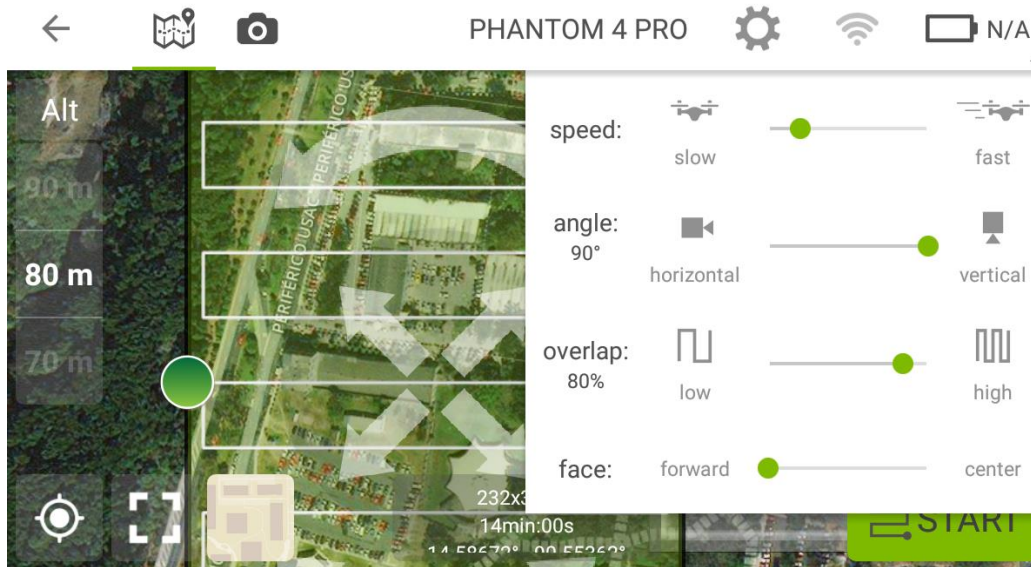
Tabla III. **Parámetros utilizados en el plan de vuelo para el dron**

Parámetro	Descripción
Modo de vuelo	Una grilla
Lugar	Universidad de San Carlos
Altura de vuelo	80,00 m
Velocidad	6,00 a 7,00 m/s
Traslape longitudinal	80 %
Ángulo de la cámara	90° sobre la horizontal del lugar
GSD	2,00 cm/ pixel

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

En la figura 11 se muestra la interfaz de la aplicación utilizada para realizar el plan de vuelo con los parámetros descritos en la tabla III.

Figura 11. **Plan de vuelo en la aplicación utilizada**



Fuente: tomada de la galería propia del autor, utilizando la aplicación Pix4DCapture.

3.2.2. **Apoyo topográfico**

Para la correcta georreferenciación del producto es necesario la obtención de posiciones precisas de determinados puntos sobre el terreno. Estos puntos servirán para transformar el modelo fotogramétrico en modelo del terreno.

Además de obtener los puntos sobre el terreno, estos deben identificarse claramente en las fotografías para poder establecer una correcta correlación.

Esta técnica se ha transportado de la fotogrametría convencional. Aunque en proyectos de fotogrametría aérea convencional no es muy utilizada, en los proyectos fotogramétricos con UAVs se adapta perfectamente al flujo de trabajo.

Como se ha descrito en la sección 3.1.4. Realizamos un levantamiento de 6 puntos como apoyo topográfico, algunos profesionales de la topografía que utilizan esta técnica también les llaman puntos de control terrestre o simplemente puntos de control, de planteo directo en modo estático con dos receptores GPS diferenciales, unos como base y el otro como rover. La base fue ubicada frente al edificio del CII de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la antena CORS ubicada en el IGN y las coordenadas de los puntos de apoyo tanto en el sistema UTM como el sistema geográfico se muestran en las tablas siguientes:

Tabla IV. **Coordenadas geográficas de los puntos de apoyo topográfico**

Identificación de la Estación	Descripción	Latitud	Error al 95 %	Longitud	Error al 95 %	Altura Elipsoidal	Error al 95 %
GUAT		14° 35' 25,45483" N	0,0000	90° 31' 12,65849" W	0,0000	1 519,873	0,0000
CII-	Base	14° 35' 9,42684" N	0,0000	90° 33' 16,16088" W	0,0000	1 484,012	0,0000
P1--	P. Mártires	14° 35' 15,71863" N	0,0020	90° 33' 6,15873" W	0,0020	1 488,248	0,0060
P2--	Biblioteca	14° 35' 13,22234" N	0,0120	90° 33' 5,11657" W	0,0140	1 488,307	0,0160
P3--	CII2	14° 35' 14,18039" N	0,0040	90° 33' 12,54241" W	0,0040	1 486,250	0,0060
P4--	Cancha Ing.	14° 35' 14,75248" N	0,0040	90° 33' 9,07375" W	0,0020	1 486,571	0,0060
P5--	CII nuevo	14° 35' 9,50459" N	0,0040	90° 33' 14,82049" W	0,0020	1 484,202	0,0060
P6--	Iglú	14° 35' 11,41333" N	0,0120	90° 33' 12,77024" W	0,0100	1 484,013	0,0180

Fuente: elaboración propia, con programa Ashtec Solution y *Microsoft Excel* 2016.

Tabla V. **Coordenadas UTM de los puntos de apoyo topográfico**

Identificación de la Estación	Descripción	Este	Error al 95 %	Norte	Error al 95 %	Altura Elipsoidal	Error al 95 %
GUAT		767 172,884	0,0000	1 614 480,807	0,0000	1 519,873	0
CII-	Base	763 480,081	0,0000	1 613 947,929	0,0000	1 484,012	0
P1--	P. Mártires	763 777,501	0,0020	1 614 144,606	0,0020	1 488,248	0,006
P2--	Biblioteca	763 809,534	0,0140	1 614 068,188	0,0120	1 488,307	0,016
P3--	CII2	763 586,859	0,0040	1 614 095,252	0,0040	1 486,250	0,006
P4--	Cancha Ing.	763 690,535	0,0020	1 614 113,960	0,0040	1 486,571	0,006
P5--	CII nuevo	763 520,192	0,0020	1 613 950,751	0,0040	1 484,202	0,006
P6--	Iglú	763 580,953	0,0100	1 614 010,100	0,0120	1 484,013	0,018

Fuente: elaboración propia, con programa Ashtec Solution y *Microsoft Excel* 2016.

En la figura 12 se muestra se muestra un receptor diferencial GPS utilizado para realizar el apoyo topográfico en la Universidad de San Carlos de Guatemala ubicado estratégicamente en la Plaza de los Mártires.

Figura 12. **Receptor GPS utilizado para el apoyo topográfico**



Fuente: receptor GPS utilizado como rover, tomada de la galería propia del autor.

3.2.3. Tomas de fotografía

La toma de fotografías no es más que poner el plan de vuelo a trabajar, hablamos del plan de vuelo realizado en la sección 3.2.1. Para algunos profesionales es imprescindible realizar la toma de fotografías simultáneamente con el apoyo topográfico, pero, para realizar este proceso de esta manera los puntos de apoyo deben estar en un lugar perfectamente visible e identificable en las fotografías aéreas, esto debido a que en el trabajo de gabinete los puntos de control se asignan a cada fotografía que los contenga como fotocontrol.

Para esta investigación en particular se decidió realizar el vuelo y tomar las fotografías en el campus central de la Universidad de San Carlos, tomando en cuenta que la afluencia vehicular y peatonal es menos pesada en domingo y realizar la toma de fotografías a medio día en donde el sol está en su punto más alto, en el lapso de las 11:30 horas a las 15:00 horas, y de esta manera evitar, lo más posible, la aparición de sombras en las imágenes.

El levantamiento de puntos de control para el apoyo topográfico fue realizado posterior a la toma de fotografías para así identificar de mejor manera los puntos en las fotografías.

Cabe mencionar que la aplicación utilizada para realizar el plan de vuelo y toma de fotografías permite visualizar en tiempo real las fotografías que el drone va tomando. Tras finalizar el plan de vuelo se realiza la descarga de las fotografías al ordenador para el posterior procesamiento de dicha información.

En la figura 12 podemos observar una fotografía tomada en nuestro plan de vuelo que contiene el edificio de rectoría y una parte de la Plaza de los Mártires

de la Universidad de San Carlos, esta fotografía aún tiene una proyección cónica es decir que no ha tenido ningún tipo de postproceso.

Figura 13. **Fotografía aérea del edificio de Rectoría de la USAC**



Fuente: tomada de la galería propia del autor, tomada con un dron Phantom 4 Pro.

3.2.4. Trabajo de gabinete

Una vez tomadas las fotografías, con los parámetros programados en el plan de vuelo, y obtenidas las coordenadas de los puntos de apoyo, se realiza el cálculo de los parámetros de orientación de cada una de las fotografías. El proceso de cálculo se denomina Aerotriangulación o Aéreo Triangulación, ver sección 1.8, es un modelo matemático que incorpora gran cantidad de redundancias al proceso para poder dar robustez al sistema y poder obtener resultados con alta fiabilidad. El resultado de este proceso es la obtención de los parámetros de orientación externa de cada una de las fotografías.

Para el emparejamiento de las fotografías el software utiliza la ecuación de colinealidad o colinealidad, con esta ecuación se calcula la cota de cada punto que esta emparejado en varias imágenes al mismo tiempo, por consiguiente, se obtiene un punto de los miles que conforman la nube de puntos dado que ya tiene coordenadas y cotas.

Como se ha dicho anteriormente la restitución fotogramétrica es el paso más importante porque de esta técnica dependen todos los resultados del estudio fotogramétrico. En el mercado existe una gran variedad de software en los cuales se puede realizar el postproceso, los cuales cuentan con su respectiva interfaz, pero vemos ciertas similitudes en los pasos y procesos para restituir las imágenes y obtener los productos fotogramétricos finales, a continuación se describe el flujo de trabajo de manera general:

- Añadir las fotografías al programa.
- Orientar las fotografías, es posible orientarlas porque cada una de ellas cuenta con una etiqueta, ubicada en el EXIF, en la que van contenidas las coordenadas geográficas de la imagen y datos de la cámara. Finalizado este proceso se obtiene una nube de puntos dispersa.
- Se asignan los puntos de apoyo topográfico contenidos en cada fotografía, también se pueden crear puntos de paso, estos puntos permiten visualizar la precisión del modelo por medio de las proyecciones que el programa hace del punto de paso en cada fotografía que lo contiene.
- Se crea la nube de puntos densa.
- Se crea la malla, en este proceso se obtiene un MDT.

Cuando hemos creado la nube de puntos densa podemos proceder a exportarlos, dentro del mismo programa, para generar un ortomosaico o podemos exportarlos a un CAD o un SIG para poder generar los otros productos fotogramétricos que veremos a continuación.

3.3. Productos fotogramétricos utilizando UAV

3.3.1. Modelos digitales de terreno

El primer producto que se obtiene después de realizar el trabajo de campo y el trabajo de gabinete utilizando UAV para hacer fotogrametría es el MDT que contiene toda la información geométrica de la zona de estudio. Es un verdadero modelo 3D del terreno y de los edificios que en él pueda haber.

En la figura 14 se muestra una vista aérea del modelo digital del edificio de rectoría de la Universidad de San Carlos de Guatemala, al fondo se puede observar parte del edificio de Recursos Educativos, creado a partir de fotografías aéreas tomadas con dron.

Figura 14. **Modelo digital del edificio de Rectoría de la USAC**



Fuente: elaboración propia, con programa Pix4Dmapper.

3.3.1.1. Curvas de nivel

Una curva de nivel es aquella línea que une todos los puntos que tienen igualdad de condiciones, normalmente altitud sobre el nivel del mar o profundidad.

El software utilizado en la restitución fotogramétrica crea el MDT a partir de una nube de puntos densa, estos puntos, como hemos explicado en el desarrollo de esta investigación, son generados a partir de los puntos en común de los pares estereoscópicos de los fotogramas utilizados en el proyecto. La nube de puntos contiene miles de estos, cada uno de estos puntos contiene información geoespacial por lo que es posible exportar la nube a un programa capaz de poder procesar este tipo de información, pudiendo ser un SIG o un CAD. Para generar las curvas de nivel se ha utilizado, en esta investigación, el programa AutoCAD

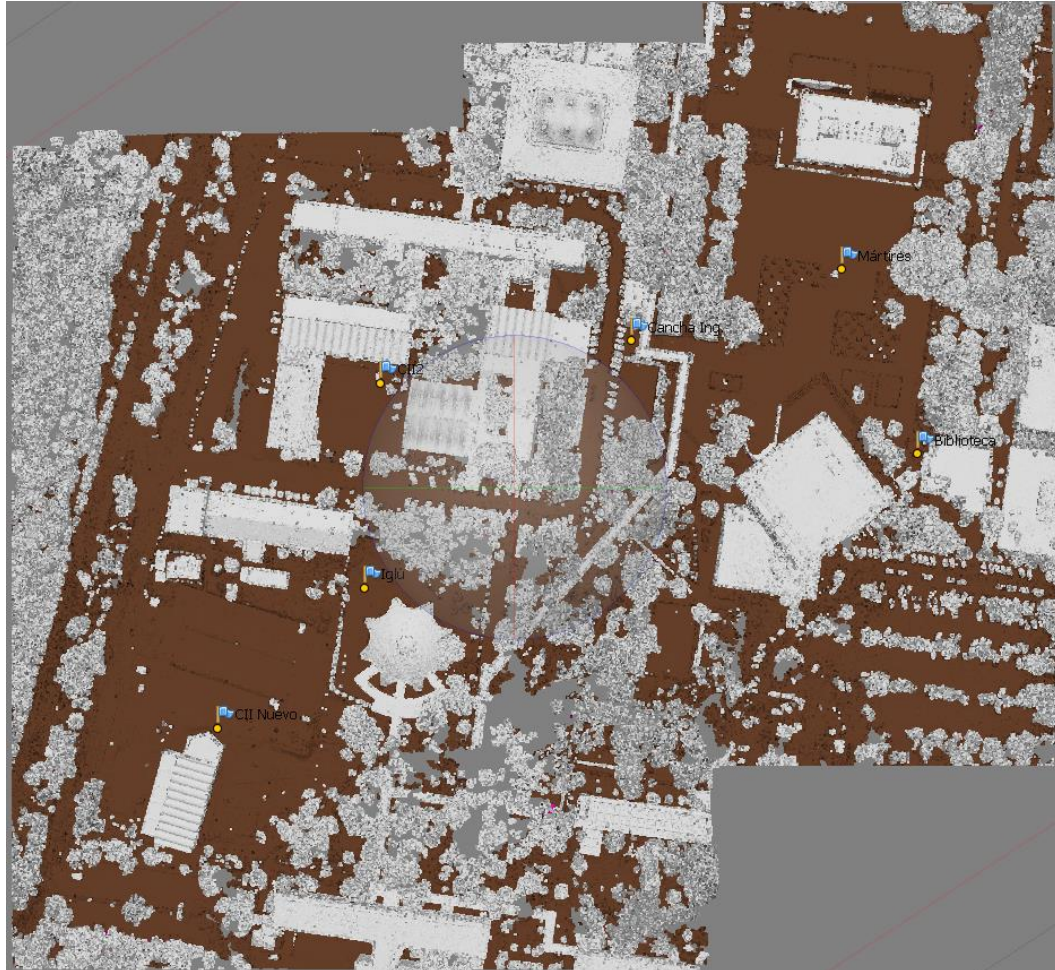
Civil 3D que permite trabajar con información con extensión de archivo .LAS, este archivo es el que contiene la nube de puntos densa exportada desde el programa de restitución fotogramétrica.

Es necesario que la nube de puntos sea depurada pues en ella están contenidos puntos que representan vegetación alta y baja, vehículos, personas y edificios. Por ello los programas ofrecen la facilidad de clasificar la nube de puntos automáticamente, de acuerdo al tipo de información que el programa contiene o se puede hacer esta clasificación de manera manual. Esto se hace con la finalidad de obtener una nube de puntos exclusivamente de la superficie del terreno en el que se está trabajando.

En la figura 15 se muestra la clasificación de puntos generada automáticamente por el programa utilizado para la restitución fotogramétrica de nuestro proyecto. El área que se muestra en color café o áreas oscuras, representa la superficie del terreno fotografiado en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala y las áreas blancas o áreas claras, representan los puntos que contienen información de la vegetación, edificaciones y vehículos.

Las curvas de nivel generadas a partir de la nube de puntos se presentan en el apéndice 1 de esta investigación, para una mejor visualización e interpretación de las mismas.

Figura 15. **Nube de puntos clasificados**



Fuente: elaboración propia, con programa Agisoft PhotoScan.

3.3.1.2. **Secciones y perfiles del terreno**

El perfil de un terreno es una representación de tipo lineal que permite establecer las diferencias de altitud que se presentan a lo largo de un recorrido, mientras que las secciones, en este caso se hace referencia a las secciones transversales, son líneas de niveles o perfiles cortos que se realizan de forma

perpendicular al eje del proyecto, que en nuestro caso particular es el perfil longitudinal.

Las secciones y perfiles del terreno son consecuencia de generar una superficie con curvas de nivel a partir de la nube de puntos que se exporta al CAD. Describir el procedimiento para generar secciones y perfiles en el programa sobrepasaría la finalidad de esta investigación. Por lo que también presentamos, en el apéndice 2, un perfil hecho en nuestro proyecto fotogramétrico a partir de un alineamiento creado sobre una sección de las curvas de nivel del apéndice 1.

3.3.2. Ortomosaico

Un ortomosaico es un producto de imagen georreferenciado organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes en las que la distorsión geométrica se ha corregido y ortorrectificado.

Como dijimos en la sección 1.7.2 acerca de los mapas, hemos de decir que los ortomosaicos son los productos por excelencia de la fotogrametría aérea utilizando drones. Los ortomosaicos son uno de los últimos productos fotogramétricos que se obtienen en el postproceso de las imágenes, estos son exportados desde el programa de restitución y al igual que las imágenes tomadas por el drone, los ortomosaicos también contienen etiquetas que guardan información en el EXIF del archivo, la información más importante que contienen los ortomosaicos es sin lugar a dudas el datum y el sistema de coordenadas en el cual son exportados. En nuestro caso particular el datum es WGS 84 con sistema de coordenadas UTM de la zona 15.

Tal cual se desarrolló en la sección 1.2.6. sobre los formatos utilizados en las fotografías utilizadas en fotogrametría convencional, los ortomosaicos

digitales también tienen formato con extensión de archivo particular, se exportan en formato .TIFF, este tipo de archivo es el que mejor conserva toda la información y características del ortomosaico pues estos tienen la particularidad que, por el tipo y la cantidad de información que contienen ocupan gran espacio de almacenamiento.

En el apéndice 3 se presenta el ortomosaico obtenido en nuestro trabajo.

3.3.3. Mosaicos termográficos

El mosaico termográfico es un conjunto de fotografías dispuestas ordenadamente que representan un área de terreno y la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético que la superficie fotografiada irradia.

Estos mosaicos pueden ser o no georreferenciados, esto de acuerdo al uso que este producto pueda tener, pues, estos mosaicos también pueden ser incluidos en un GIS, aunque, su uso es más interpretativo.

4. OTRAS APLICACIONES DEL USO DE UAV

4.1. Aplicaciones en la Ingeniería Civil

Uno de los usos principales en los que podemos emplear vehículos aéreos no tripulados es en la cartografía, debido a que la fotogrametría es una herramienta básica para elaborar cartografía. La fotogrametría permite medir sobre fotografías con las que se puede determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Si se trabaja con una sola foto se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos fotos, en la zona común a estas, zona de solape o traslape, se podrá tener visión estereoscópica, o dicho de otro modo información tridimensional, tal y como vimos en la sección 1.4.2.

Otro de los usos que se le pueden dar a los drones es el estudio de uso de suelos. En Europa existe el *Corine Land Cover* o *CLC* por sus siglas en inglés, que desarrolla una base de datos que representan la cobertura y uso de territorio en la Unión Europea. Las fotografías, tomadas por la serie de satélites LandSat y Spot, de la base de datos del *CLC* en donde es representado el uso de suelos, tienen una resolución espacial muy baja por lo que no se pueden obtener detalles que podrían servir para hacer un estudio, utiliza una escala de 1:100 000. Este proyecto es de fotointerpretación por lo que el uso de un drone proporcionaría imágenes que pueden ser analizadas y tratadas a una resolución espacial y temporal mínima. Por otra parte, el proceso de teledetección es más complejo, ya que requiere que la fotografía aérea realizada pueda obtener imágenes multiespectrales, ver la sección 3.1.2. Para que, mediante el procesamiento de

las imágenes en un SIG, se identifique de forma automática los diferentes elementos que existen en el territorio y poder representarlos de forma fiable.

Los UAV también son una herramienta útil en el control de obras y evaluación de impactos. La ejecución de obras es un proceso progresivo y como tal requiere de un seguimiento continuo que permita la supervisión de los avances en el proyecto desde lo visual hasta el impacto medioambiental y sobre todo el control económico de la misma.

Los UAV son también una herramienta muy versátil en la evaluación de estructuras, estas naves permiten el acceso a lugares remotos o de difícil acceso y permiten una vista en primer plano de los avances constructivos de una obra o bien los daños causados por cualquier fenómeno natural como puede ser un terremoto.

4.2. Aplicaciones en otras ciencias

En general podemos utilizar los drones casi en cualquier actividad imaginada, aunque, no todas son lucrativas, siempre y cuando no se ponga en riesgo la integridad física de ningún individuo y respetar lo estipulado en la ley emitida por la Dirección General de Aeronáutica Civil RAC 101, aquí enumeramos algunas:

- Aplicaciones ambientales como el control de la calidad del aire
- Aplicaciones a la prospección y explotación de recursos minerales
- Aplicaciones en agricultura
- Aplicación en la reducción y extinción de incendios forestales
- Aplicaciones periodísticas y cinematográficas
- Aplicaciones de búsqueda y rescate de personas

- Aplicaciones de vigilancia especialmente fronteriza
- Aplicación en investigaciones arqueológicas
- Aplicación en monitoreo de tránsito
- Recreación

En la figura 16 podemos observar un drone utilizado en agricultura, este es capaz de rociar pesticidas, plaguicidas o fertilizantes a una velocidad entre 7 y 10 acres/hora, 1 acre \approx 4047 m², y con una capacidad de transportar una carga de peso de hasta 10 kg.

Figura 16. **Drone DJI Agras MG-1**



Fuente: tomada de la página web oficial de la empresa DJI.

Como se puede observar la lista de los usos que se les pueden dar a los UAV es casi interminable.

4.3. Vehículos no tripulados usados en la batimetría

Se entiende por batimetría el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, tanto los levantamientos del fondo del mar, como del fondo de cursos de agua y embalses. Estos trabajos son denominados también topografía hidrográfica y cartografía náutica. La labor del topógrafo consiste en realizar el levantamiento de los fondos, como si de un terreno seco se tratase.

El principal cometido en la realización de cartografía marina y la obtención de cartas de navegación, es describir las características de la superficie subacuática para hacer posible la navegación por terrenos invisibles.

Al igual que en levantamientos convencionales, en las batimetrías la finalidad será la obtención de las coordenadas (X, Y, Z) que presenta la superficie estudiada. La parte más compleja y que caracteriza a los diversos métodos de levantamiento batimétrico es la determinación de la profundidad. Esta tarea se denomina operación de sondeo o simplemente sondar. La profundidad de un punto se obtendrá midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie del fondo.

Para obtener la verdadera cota del punto levantado se deben tener en cuenta una serie de correcciones entre las que se incluye la corrección por marea. Debemos recordar que las mareas son las variaciones periódicas en la altura del nivel del mar, debida a las atracciones de los cuerpos celestes.

Para realizar estudios batimétricos podemos mencionar los siguientes métodos:

- Métodos de posicionamiento planimétrico
- Métodos de posicionamiento altimétrico
- Métodos de posicionamiento tridimensional
- Batimetría mediante fotogrametría
- Batimetría mediante sonar láser
- Batimetría mediante satélites

Describir y desarrollar cada uno de estos métodos sobrepasaría la finalidad de esta investigación. En lo que a nosotros concierne es dar a conocer los vehículos en los que se realiza la topografía hidrográfica.

Tal y como hemos descrito anteriormente, en los capítulos 1 y 3 de esta investigación, pudimos ver que los estudios fotogramétricos se pueden realizar con vehículos tripulados y no tripulados. De la misma manera sucede en la batimetría, con los adelantos tecnológicos, específicamente en microelectrónica y desarrollo de software especializado vemos que en ciertos casos las embarcaciones, grandes o pequeñas, han sido desplazadas por drones.

Los drones utilizados para batimetría, al igual que los utilizados en fotogrametría, tienen una amplia gama de modelos, tamaños y dependiendo de los distintos equipos con los que cuente cada drone así será también la precisión en las mediciones del trabajo que se realice con ellos.

Los drones para hacer topografía hidrográfica son conocidos por sus siglas en inglés como *Unmanned Surface Vehicle USV* o Vehículos de Superficie No Tripulados VSNT, por sus siglas en español.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO Y RESULTADOS

Como ya hemos descrito en la sección 2.2. de este documento, los tipos de drones y, además, hemos definido que realizar una tipificación de estas herramientas resulta casi imposible, es importante hacer la aclaración que para el desarrollo de las secciones siguientes delimitaremos el tema, refiriéndonos a la parte conceptual, trabajo de gabinete y trabajo de campo a un solo tipo de drone, el utilizado por nosotros. Para ello presentamos a continuación las características de nuestro UAV:

- Especificaciones del drone Phantom 4 Pro:
 - Tipo de drone: quadcopter, drone de cuatro hélices
 - Peso bruto: 1 388 g
 - Capacidad de la batería: 6 000 mAh
 - Sensor de cámara: 20 mega pixeles
 - Distancia focal: 8,8 mm
 - Autonomía de vuelo: hasta 30 minutos

Así mismo, es necesario hacer otra acotación, esta consiste en definir que existen dos posibles métodos para realizar el vuelo con un vehículo no tripulado, el primero consiste en realizar un vuelo manual en donde, de acuerdo al cálculo de plan de vuelo se definen parámetros tales como: altura, velocidad, número de líneas de vuelo, traslapos y número de fotografías. En este caso se requiere de una gran experiencia en el pilotaje del drone pues, como dijimos es un vuelo manual, por tanto, el piloto está en el completo control de todos los parámetros anteriormente descritos y necesita de una persona más para que le vaya indicando, primordialmente, el tiempo entre la toma de cada fotografía y

supervisando que la altura de vuelo y la velocidad del drone sea la calculada en el plan de vuelo.

El segundo método es el que a nosotros nos ocupa, porque es el utilizado en el análisis que estamos desarrollando, este método consiste en utilizar un vuelo totalmente autónomo en donde, como se muestra en la sección 3.2.1. Se definen los parámetros de altura de vuelo, velocidad, traslapes, ángulo de la cámara y la precisión de la fotografía o GSD, estos parámetros se ingresan a la aplicación que desarrolla el plan de vuelo y lo ejecuta de manera autónoma, incluso el despegue y el aterrizaje del drone.

5.1. Comparación de los métodos fotogramétricos utilizando vehículos aéreos tripulados y no tripulados

A continuación, se hace una comparación de los métodos fotogramétricos utilizando vehículos aéreos tripulados y no tripulados.

5.1.1. Ventajas y desventajas de ambos métodos

Una de las ventajas que podemos atribuirle al drone es sin duda, la versatilidad pues, si disponemos del equipo necesario para realizar el vuelo, el apoyo terrestre o puntos de control y los software necesarios para desarrollar el plan de vuelo y el post proceso de las fotografías, nos trasladamos al lugar en donde se requiera el estudio fotogramétrico, hacemos una inspección visual y podemos poner en marcha el estudio, para ello, debemos tener cuidado en dos aspectos importantes: el primero es que las condiciones climáticas sean adecuadas para poner en marcha el plan de vuelo y así obtener imágenes de buena calidad, para ello debemos evitar días muy nublados, lluviosos o con fuertes vientos.

Y el segundo aspecto a considerar es informarnos sobre las restricciones de altura y áreas de vuelo que proporciona la DGAC. Para ello podemos consultar la regulación RAC – 101 de esta misma Dirección que establece, en su artículo 23 que: una persona no debe operar una aeronave no tripulada por encima de 400 pies o 120 metros, sobre el nivel del suelo en el espacio aéreo controlado.

Otra ventaja que podemos mencionar, respecto de los vehículos no tripulados, es la actualización inmediata de información catastral, por ejemplo: en nuestro caso vimos como en la ortofotografía 20591_14_ORT_RGB adquirida en el IGN en el año 2017, hecha con un vehículo tripulado, no están documentados los edificios y el parqueo del CII debido a la antigüedad de la ortofoto, tomada en el año 2006, mientras que, si realizamos un vuelo con un drone, este tipo de información la podemos documentar casi instantáneamente, dependiendo del tiempo de post proceso.

Como se ha dicho con anterioridad la información visual que aporta una ortofotografía realizada con drone es muchísima y el nivel de detalles que se puede observar es muy superior a la ortofotografía que utilizamos del IGN, ver apéndice 4.

Mencionamos la versatilidad del drone y con ello podemos incluir hacer mejoras, apenas modificando el fuselaje del UAV, por ejemplo: instalando cámaras que nos permiten captar imágenes multiespectrales o cámaras térmicas, también, instalando filtros de luz a la lente de la cámara, que nos ayuden a evitar el reflejo de los rayos del sol que pueden distorsionar las fotografías. Hemos de hacer la aclaración que esto también se puede hacer con los vehículos tripulados utilizando los sensores adecuados para obtener productos similares a los que antes mencionamos.

Una desventaja muy marcada con el uso de drone, como ya hemos aclarado que, tratamos con el modelo específico Phantom 4 Pro, es la autonomía de vuelo, pues, este cuenta con una autonomía de solo 30 minutos y, por ende, esta es una ventaja del uso de un vehículo tripulado que no solamente puede tener varias horas de vuelo, sino que, también la cantidad de terreno que abarca puede ser de cientos o miles de km² en un solo vuelo.

Una de las mayores diferencias y ventajas que encontramos en el uso de la fotogrametría convencional o realizada con vehículos aéreos tripulados es el software, aunque si lo analizamos de manera general el software utilizado en entidades como el IGN, que hace uso de ERDAS Imagine para post procesar imágenes, y el utilizado comercialmente como es nuestro caso, Pix4Dmapper y/o Agisoft PhotoScan, los pasos a seguir para obtener ortofotografías son básicamente los mismos, pero los filtros y el control de calidad para someter una serie de imágenes a post proceso en el software ERDAS Imagine es minucioso y riguroso, para ello realizamos un cuadro comparativo entre los dos programas, ver tabla VI.

Tabla VI. **Cuadro comparativo de los procedimientos utilizados en el post proceso de imágenes utilizadas en un estudio fotogramétrico**

Procedimiento	Vehículo tripulado	Vehículo no tripulado	Observaciones
Elegir modelo de la cámara.	Procedimiento obligatorio para realizar el post proceso.	Procedimiento obligatorio para realizar el post proceso.	Cámara del drone modelo FC6310 con $f = 8.8$ mm.
Elegir el tipo de proyección y DATUM.	Procedimiento obligatorio para realizar el post proceso.	Procedimiento obligatorio para realizar el post proceso.	Usamos la proyección UTM con Datum WGS 84 con el drone.
Definir sistema de rotación y dirección de la fotografía.	Se define la relación del terreno con la fotografía mediante tres ángulos de rotación (ω , ϕ y κ).	Este procedimiento no es visible en el post proceso con el software utilizado por el drone.	Los ángulos de rotación son los producidos por el ladeo, cabeceo y la deriva de la aeronave.
Altura de vuelo.	Este dato se debe ingresar al programa para continuar con todos los procesos.	Este dato se utiliza únicamente en el desarrollo del plan de vuelo, no en el post proceso.	Para el drone, la altura de vuelo no debe sobrepasar los 120 metros sobre el terreno.
Importar archivos.	Este proceso permite importar imágenes en varios formatos, pero debe ser definido manualmente en el programa. Además, es posible crear capas o <i>layers</i> de acuerdo con el peso del archivo exportado, por ejemplo una imagen muy pesada creará más capas.	Importar archivos al programa se hace de manera manual y el formato de la imagen es detectado automáticamente por el programa y no es posible crear capas o <i>layers</i> .	El formato que utilizan las fotografías tomadas por el drone es JPG.
Ingreso de los datos del sensor por calibración de la cámara.	Este procedimiento se realiza en un laboratorio para definir parámetros geométricos y físicos de los sensores fotográficos y no es posible trabajar sin ellos porque con estos parámetros y midiendo las marcas fiduciales se realiza la orientación interior de las fotografías.	El programa que se utiliza en el post proceso para imágenes tomadas con un drone permite trabajar con o sin los parámetros de calibración geométricos y físicos del sensor de la cámara.	Las marcas fiduciales son marcas en el margen de las fotografías impresas tomadas por una aeronave tripulada. Las fotografías captadas por el drone carecen de estas marcas.
Orientación exterior	Este procedimiento se realiza para introducir la posición y orientación del sensor. Aquí se definen las coordenadas del centro de perspectiva en la imagen y los ángulos de rotación de la imagen.	Este procedimiento no se realiza manualmente en el programa de post proceso utilizado por el drone.	El software utilizado por nosotros, para post procesar las fotografías tomadas por el drone, hace la orientación exterior de manera automática.

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

Se observa que hay una premisa inquebrantable en el estudio fotogramétrico que es:

La fotogrametría es esencialmente el proceso de establecer una relación entre la cámara/sensor – la imagen y el terreno.

Esto quiere decir que el área que estamos estudiando o terreno, debe estar representado con la mayor precisión en la fotografía o imagen, y para lograrlo, la cámara o sensor, debe estar calibrada en todos sus parámetros geométricos y físicos mediante previo estudio, para evitar distorsiones.

Por lo tanto, cuando el programa utilizado en el estudio fotogramétrico con dron permite avanzar en el post proceso sin la calibración del sensor hay que dar por hecho que la ortofotografía tiene un error significativo y muy apreciable, quizá no al ojo humano, pero si en la precisión de la misma.

5.1.2. Tiempos totales para implementar los métodos

Con el UAV se precisan de por lo menos siete días, dependiendo del equipo, para tener resultados en el ordenador, podemos hacer una distribución de la siguiente manera, 1 día para la planificación, 1 día para en marcha el plan de vuelo, 1 día para la toma de puntos de control, 4 días para el post proceso y mejora de los productos finales, si se considera que aparte de la ortofotografía se presenten MDT, curvas de nivel, perfiles y cortes transversales.

Se debe hacer la observación que el tiempo de post proceso de las fotografías puede ser muy extenso debido a que este procedimiento utiliza muchos recursos informáticos, como memoria RAM, en la computadora que se usa para llevarlo a cabo. Se precisa, para que el tiempo de post proceso no sea

demasiado prolongado, una computadora provista de una tarjeta gráfica y un procesador adecuado para manejar el volumen de información en un tiempo aceptable. El equipo que utilizamos en el desarrollo de este trabajo tiene un procesador Core i7 de 7^a. Generación con una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce GTX 1060.

El tiempo necesario para realizar un estudio fotogramétrico con un vehículo tripulado tiene muchas variables que pueden alterar el tiempo para llevarlo a cabo, sin duda alguna, el tamaño del proyecto es una ellas, pues, pasando directamente al post proceso, un área pequeña, considerando que el avión o avioneta puede abarcar miles de km², el proyecto puede pesar varios cientos de giga bites y el post proceso puede tardar varias semanas.

5.1.3. Personal utilizado

Realizar un estudio fotogramétrico con drone, utilizando una aplicación de ejecución de plan de vuelo autónomo nos permite utilizar el menor número de personal. Todo el proceso del estudio fotogramétrico, la captura de fotografías, la toma de puntos de control con GPS y todo el post proceso puede ser realizado por, al menos, dos personas, pero en nuestro caso este trabajo fue ejecutado con el acompañamiento de asesores especialistas en el manejo del equipo GPS particularmente. Está por demás, pero es importante hacer la observación y sugerir que, las personas encargadas de hacer el estudio tienen que tener experiencia no solamente en el uso del equipo, especialmente el drone y el GPS, sino también, conocimiento en el manejo de la aplicación de plan de vuelo, el software para el postproceso de los puntos de control y el software para la restitución fotogramétrica, esto conlleva un criterio para la interpretación y análisis de los resultados y productos finales.

En el caso de los vuelos tripulados es necesario, al menos, cuatro personas que componen el equipo para realizar el estudio fotogramétrico, el piloto, copiloto y dos encargados de la toma de fotografías, además, los técnicos encargados de realizar todo el post proceso de las imágenes hasta obtener los productos finales, en este caso son al menos tres técnicos especialistas en los análisis que dicho procedimiento requiere.

5.1.4. Alcances y limitaciones

El uso de vehículos no tripulados nos permite realizar una serie y variedad de acciones como, por ejemplo: la inspección y supervisión de obras civiles en construcción en donde el acceso es casi imposible para una persona, así mismo, la cantidad de información visual que nos puede aportar un drone es muy amplia y variada pues no solamente podemos tomar fotografías sino también podemos realizar grabaciones de video en alta resolución, HD y 4K, pero estos son alcances propios de un drone.

En lo que a fotogrametría se refiere, el tiempo para actualizar información catastral y topográfica de un terreno lo podemos hacer en un lapso relativamente corto, un ejemplo muy claro es que, para actualizar el cambio en el relieve del terreno, provocado por la catástrofe del Volcán de Fuego, ubicado entre los departamentos de Sacatepéquez, Chimaltenango y Escuintla, en el año 2018 fue estudiado mediante ortofotografías tomadas por drone.

Las ortofotografías con drone son útiles para el análisis visual, se pueden utilizar ortofotografías multiespectrales o hiperespectrales para teledetección, pero, debemos tener cuidado en cuanto a trabajos topográficos se refiere, pues, para obtener imágenes de precisión con un drone el control de calidad en la planificación, el vuelo, la toma de puntos de control terrestre y el post proceso

debe ser tan riguroso como en la fotogrametría convencional realizada con vehículos aéreos tripulados.

5.1.5. Precisión en las mediciones

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles define la precisión como: aproximación relativa aparente a la verdad. De esta definición decimos entonces que, una ortofoto precisa es aquella que se ajusta fielmente al terreno que representa. El parámetro más importante de fotogrametría aérea es la escala de la imagen y esta define la precisión del modelo restituído.

Como vimos en la sección 1.3.2. Cálculo de Plan de Vuelo para aeronaves tripuladas, la escala de una fotografía es definida en el inicio del proyecto, por lo tanto, es posible calcular la incertidumbre o precisión del modelo mediante cálculos matemáticos y estadísticos aplicando la Teoría de Errores, en donde intervienen también, las equivocaciones o errores materiales, los errores accidentales, los errores sistemáticos y las discrepancias. Cálculos que sobrepasan la finalidad del análisis que desarrollamos y por lo tanto no serán estudiados.

Mientras que, por su parte, la ortofotografía generada con imágenes tomadas con un drone, pueden tener muchas imprecisiones, como establecimos anteriormente, el software utilizado para post procesar este tipo de imágenes puede aceptar el no tener información indispensable para crear una fotografía, por ejemplo, la escala del fotograma, la calibración de la cámara y también, muy importante, puede generar una ortofoto sin puntos de control de terrestre, lo que nos daría como resultado un mosaico con proyección ortogonal pero impreciso.

La GSD es la distancia entre los centros de dos píxeles consecutivos, este dato es el que se utiliza para calcular la precisión de un ortomosaico generado a partir de fotografías tomadas con dron. En el estudio que realizamos, para una altura de vuelo de 80 metros sobre el nivel del terreno, la velocidad del dron, entre 6 y 7 m/s, y el traslape, 80 % longitudinal, el programa calculó una GSD = 2,00 centímetros/píxel. Esto quiere decir que cada píxel del ortomosaico representa 2,00 centímetros del terreno. La GSD depende de la altura de vuelo, primordialmente, podemos decir que a mayor altura de vuelo la precisión disminuye.

5.1.6. Estimación de costos

Los costos de un estudio fotogramétrico utilizando un VANT pueden realizarse obedeciendo a las necesidades que el proyecto requiera, por lo tanto, podemos realizar costos en dos rubros que son los siguientes:

- Por superficie levantada medida en hectáreas
- Por kilómetros lineales

Hay una expresión que utilizan algunas empresas en el cobro de sus servicios y es la siguiente una hectárea de terreno no vale la pena.

Se ha de mencionar que no existe un ente que regule los honorarios para un experto en vuelo de drones, en algunas ocasiones puede realizarse un cobro por batería de dron utilizada en el proyecto o por el número de fotografías tomadas, aunque estos casos son aplicables a otro tipo de actividad como artística o audiovisual.

Existen también muchas otras variables que se deben considerar para hacer un cobro del trabajo de manera adecuada y justa como, por ejemplo:

- Cuestiones climáticas
- Topografía del terreno considerando terrenos muy accidentados o con presencia de vegetación
- Tiempo de vuelo del dron, esto con la finalidad de tener baterías extras
- Viáticos como gasolina, comida y alojamiento si es necesario
- Número de puntos de apoyo terrestre

Se va a ejemplificar el costo y posterior precio del servicio brindado para hacer el estudio fotogramétrico y entrega de la ortofotografía, curvas de nivel y perfil topográfico del área y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el año 2022, que incluye los siguientes datos:

Tabla VII. **Aspectos generales del proyecto**

Descripción	Unidad	Cantidad
Área levantada	Hectárea	≈ 11,5
Fotografías	Unidad	308
Puntos de control terrestre	Unidad	6
Baterías o vuelos necesarios	Unidad	2
Post proceso	Días	3
Personal	Unidad	2
Dron	Unidad	1

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

Para llevar a cabo este estudio se integran tres renglones de trabajo con las siguientes especificaciones técnicas:

- Renglón 1. Puntos de control terrestre: se requiere el levantamiento de 6 puntos de control terrestre con GPS diferencial con un receptor fijo de base y uno móvil como rover, con un tiempo de observación mínimo de 0,50 horas. El punto base se tomará con las coordenadas del punto geodésico que esta frente al edificio del CII con coordenadas UTM 763 480,081 Este, 161 3947,929 Norte y altura elipsoidal 1 484,012 de la zona 15, con Datum WGS 84.
- Renglón 2. Vuelo fotogramétrico: se requiere un vuelo fotogramétrico para cubrir un área de 11,50 hectáreas en el campus central de Universidad de San Carlos de Guatemala, en las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería, con una altura de 80 metros sobre el nivel del terreno, con traslape longitudinal en las fotografías de 80 % y una velocidad baja entre 6 y 7 m/s.
- Renglón 3. Post proceso: se requiere la restitución de 308 fotografías para crear un modelo fotogramétrico soportado con 6 puntos de control terrestre, que cumpla con un GSD de 2 cm/pixel y como productos finales se piden: una ortofotografía, curvas de nivel con intervalo a cada 1,00 metro y el plano planta-perfil del terreno con un alineamiento que contenga caminamiento a cada 20 metros.

Tabla VIII. Integración de costos y precio por hectárea

1. PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE				
MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Total de Materiales				Q0.00
MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Levantamiento de punto con GPS	Unidad	6	Q150.00	Q900.00
Total de Mano de Obra				Q900.00
HERRAMIENTA Y EQUIPO				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
GPS diferencial	Unidad	1.00	Q300.00	Q300.00
Software de procesamiento	Unidad	1.00	Q100.00	Q100.00
Total de herramienta y equipo				Q400.00
Total de costo directo (Material + M.O. + Herramienta y Equipo)				Q1,300.00
Factor de costos indirectos (40%)				Q520.00
TOTAL				Q1,820.00
PRECIO UNITARIO				Q303.33

2. VUELO FOTOGRAMÉTRICO				
MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Total de Materiales				Q0.00
MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Vuelo Fotogramétrico	Hectárea	11.5	Q100.00	Q1,150.00
Total de Mano de Obra				Q1,150.00
HERRAMIENTA Y EQUIPO				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Drone Phantom 4 Pro	Unidad	1.00	Q150.00	Q150.00
Baterías	Unidad	2.00	Q70.00	Q140.00
Total de herramienta y equipo				Q290.00
Total de costo directo (Material + M.O. + Herramienta y Equipo)				Q1,440.00
Factor de costos indirectos (40%)				Q576.00
TOTAL				Q2,016.00
PRECIO UNITARIO				Q175.30

Continuación tabla VIII.

3. POST PROCESO				
MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Papel e impresión de planos	Unidad	3.00	Q50.00	Q150.00
Total de Materiales				Q150.00
MANO DE OBRA				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Post proceso de imágenes	Hectárea	11.5	Q100.00	Q1,150.00
Total de Mano de Obra				Q1,150.00
HERRAMIENTA Y EQUIPO				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Software de restitución	Unidad	1.00	Q200.00	Q200.00
Total de herramienta y equipo				Q200.00
Total de costo directo (Material + M.O. + Herramienta y Equipo)				Q1,500.00
Factor de costos indirectos				Q600.00
TOTAL				Q2,100.00
PRECIO UNITARIO				Q182.61

RESUMEN				
Renglón	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
Puntos de control terrestre	Unidad	6	Q303.33	Q1,820.00
Vuelo fotogramétrico	Hectárea	11.5	Q175.30	Q2,016.00
Post proceso	Hectarea	11.5	Q182.61	Q2,100.00
Total del proyecto				Q5,936.00
Precio / Ha				Q516.17

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

Tabla IX. **Cronograma físico y financiero**

CRONOGRAMA FÍSICO									
No.	Nombre	Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
0	Planificación	■							
1	Puntos de Control Terrestre		■						
2	Vuelo Fotogramétrico			■					
3	Post-Proceso				■	■	■	■	
4	Entrega de productos finales								■

CRONOGRAMA FINANCIERO			
No.	Nombre	Anticipo de 50%	Pago del 50% restante
0	Planificación	■	
1	Puntos de Control Terrestre	■	
2	Vuelo Fotogramétrico	■	
3	Post-Proceso	■	
4	Entrega de productos finales		■

Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Excel 2016.

En el resumen de la tabla VIII podemos observar que para el proyecto fotogramétrico que realizamos en las áreas de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala estimamos un precio de Q 5 936,00 para levantar un área de aproximadamente 11,50 hectáreas de terreno, para tener un precio unitario de Q 516,17 por hectárea. Lo que pretendemos hacer es ejemplificar como obtener costos para un proyecto de fotogrametría con drone y obtener un precio unitario por hectárea equivalente a un rango entre 65 y 70 dólares estadounidenses USD. El tipo de cambio lo hemos tomado como $Q\ 7,70 = 1,00\ USD$.

Es importante saber también que, el precio puede variar de acuerdo a los tiempos estimados de entrega, un proyecto se puede encarecer si el producto terminado es urgente y se precisa de poco tiempo para poder finalizarlo.

De igual forma, un proyecto puede tener un precio unitario por hectárea menor de 65 o 70 dólares estadounidenses mientras más grande sea el área a cubrir o el número de kilómetros lineales sea mayor.

5.1.7. Resultados

Como resultado de este análisis, vemos en cada uno de los ítems que hemos desarrollado que, no podemos definir si existe un método superior a otro dependiendo del tipo de vehículo que se utilice, tripulado o no, sino que, cada proyecto tiene sus propias exigencias, así pues, puede existir la posibilidad de que un proyecto vea resuelta su necesidad utilizando un ortomosaico que puede estar desactualizado y ser completamente funcional. Mientras que otro proyecto necesite de datos actualizados y podamos hacer un estudio con un drone.

CONCLUSIONES

1. Cada proyecto de ingeniería civil que requiera un estudio fotogramétrico, define, de acuerdo a sus necesidades y su presupuesto, que tipo de vehículo es el más adecuado para obtener una ortofotografía. Algunos de los aspectos más relevantes son el tamaño y el tipo del proyecto, pues, de acuerdo a ellos podemos definir si es más adecuado un vuelo en una aeronave tripulada, un drone multirotor o uno de ala fija.
2. Un estudio fotogramétrico con una aeronave tripulada contiene información de grandes extensiones de terreno, aproximadamente 2 175,00 hectáreas en una ortofotografía a escala 1:50 000 del IGN, pero debemos tener en cuenta la fecha en que fue realizado pues, puede tener información desactualizada y podríamos ver comprometido nuestro trabajo. Por su parte, la información que podemos obtener de un drone puede ser actualizada casi al instante, pero con extensiones pequeñas de terreno, como máximo 25,00 hectáreas para un vuelo a 100 m de altura, hecho con una sola batería. Una de las grandes desventajas del drone es el tiempo de autonomía de vuelo, regularmente de 30 minutos por cada batería, por ello es necesario, en muchas ocasiones tener a la mano baterías extras para cumplir con el plan de vuelo.
3. Los estudios fotogramétricos con vehículos tripulados y drones se hacen en su totalidad con dispositivos digitales; las cámaras, los comparadores, los restituidores y los trazadores análogos, se consideran obsoletos y han sido reemplazados por dispositivos electrónicos digitales, tales como los ordenadores.

4. Bajo ninguna circunstancia el drone puede ser utilizado como un instrumento topográfico puro. Para realizar fotogrametría aérea, es necesario tener control terrestre o puntos de apoyo con equipos como GPS, estación total o teodolito, la finalidad es dar sustento a la información recolectada por el drone y aumentar la precisión y la estabilidad de un modelo fotogramétrico.
5. El criterio y la experiencia del profesional que realiza un estudio fotogramétrico con un drone es de carácter vital y esencial, pues de carecer de estas dos cualidades, el estudio puede contener errores graves.
6. Para tener una posición conservadora, concluimos que la ortofotografía con drone no puede ser utilizada para levantamientos topográficos de precisión milimétrica, para ello seguimos precisando de estudios de levantamiento topográfico convencionales como el realizado con una estación total.
7. La precisión de un ortomosaico hecho con fotografías tomadas por un drone depende del sensor o cámara, la altura de vuelo y los traslapes longitudinal y transversal. Nosotros hemos alcanzado una precisión o GSD de 2,00 cm/pixel, esto quiere decir que, un pixel en la ortofotografía representa dos centímetros del terreno real.
8. Los traslapes para las fotografías captadas por drone, que van a ser post procesadas para obtener un producto fotogramétrico, no deben ser menores a 80 % en la dirección longitudinal y 60 % de traslape lateral, para evitar deformaciones o distorsiones, errores e imprecisiones en el modelo final.

9. La cantidad de información obtenida en un estudio fotogramétrico, indistintamente si fue realizado con un vehículo tripulado o uno no tripulado, puede ser utilizada en la elaboración de su producto por excelencia, la ortofotografía, como la presentada en el apéndice 3. También es posible dibujar hojas cartográficas y aunque es redundante, pero decimos que es posible dibujar curvas de nivel con esta misma información, las hojas cartográficas tienen dibujadas las curvas de nivel a un intervalo definido y de acuerdo a la escala de la hoja. Del estudio fotogramétrico podemos trazar perfiles topográficos y sus respectivas secciones transversales y por último podemos obtener un modelo digital de terreno o MDT. Toda la información que hemos descrito es generada por una nube de puntos georreferenciados y ortorrectificados, calculados mediante procesos matemáticos hechos por el programa de restitución.

RECOMENDACIONES

1. Instar a cualquier estudiante o profesional a estudiar el procedimiento para hacer un estudio fotogramétrico utilizando un drone, pero sustentando el modelo con apoyo topográfico utilizando una estación total y documentar las diferencias, sobre todo, en la precisión del ortomosaico con respecto al obtenido en este trabajo.
2. Dirigir a los estudiantes o profesionales que están familiarizados en trabajar con productos fotogramétricos, especialmente con drones, a definir cuál es el proceso matemático para calcular la escala de las fotografías que se usarán para generar un ortomosaico.
3. Actualizar la información fotogramétrica del país y, por ende, la información cartográfica, pues se cuenta con registros que datan del año 2006 que como vimos en el desarrollo de este trabajo, están desactualizados.
4. Invitar a los departamentos y centros de investigaciones de la Universidad de San Carlos de Guatemala, a conformar un proyecto en donde se pueda hacer una maqueta virtual del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala, haciendo para esto, modelos digitales de terreno o MDT, para cada edificio y poder vincularlo a un Sistema de Información Geográfica o una plataforma como Google Earth, como lo hacen algunas instituciones y gobiernos, por ejemplo, Francia cuenta con MDT de toda la ciudad de París en la vista tridimensional de Google Earth.

5. Utilizar todo estudio fotogramétrico realizado con un drone en las etapas iniciales de la planificación de un proyecto de obra civil, como lo es el estudio de prefactibilidad o para el desarrollo de proyectos que no requieran precisiones milimétricas como, por ejemplo, cálculo de movimiento de tierras, proyectos de reconocimiento de uso de suelo o proyectos fotointerpretativos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AEROPRODUCCIONES. *Producción cartográfica con UAVs, Anfiteatro de Tarragona*. [En línea]. <<http://www.aeroproducciones.com/wp-content/uploads/Produccion-cartografica-con-UAVs-Aeroproducciones.pdf>>. [Consulta: 4 de junio de 2020].
2. AGISOFT LLC. *Agisoft PhotoScan User Manual: Standar Edition, version 1.2*. [En línea]. <https://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf>. [Consulta: 20 de septiembre de 2021].
3. ARÉVALO VALDÉS, Jorge Alejandro. *Diseño de la línea pelo a tierra o preliminar de caminos y carreteras a partir de la información de fotografías aéreas aplicando fotogrametría*. Trabajo de graduación de Maestría en Ing. Vial. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008. 117 p.
4. DAVIS, Raymond; FOOTE, Francis y KELLY, Joe. *Tratado de topografía*. 5ª ed. California, Estados Unidos: Colección Ciencia y Técnica Aguilar. 989 p.
5. Dirección General de Aeronáutica Civil de Guatemala (DGAC). *Regulación de aeronaves no tripuladas, aeronaves de modelismo y fuegos artificiales*. Guatemala: RAC 101. 22 p.

6. Fundación de la energía de la comunicación de Madrid, Consejería de Economía y Hacienda de Madrid. *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid, España: 2015. 237 p.
7. GONOS TOPOGRAFÍA. *Precisión al servicio del ingenio*. [En línea]. <<http://www.gonostopografia.com/media/geomatica.pdf>>. [Consulta: 14 de abril de 2022].
8. HUERTA, Eduardo; MANGIATERRA, Aldo y NOGUERA, Gustavo. *GPS: Posicionamiento Satelital*. Argentina: UNR Editora – Universidad Nacional de Rosario, 2005. 148 p.
9. Leica Geosystems Customer Education. *Introduction to the Leica Photogrammetry Suite*. Erdas Imagine. 2004. 217 p.
10. Leica Geosystems. *Principios básicos de topografía*. 35 p.
11. REYES ARREAGA, Sergio Iván. *Guía teórico y práctica del curso de topografía 3*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 217 p.
12. SANTAMARÍA PEÑA, Jacinto y SANZ MÉNDEZ, Teófilo. *Fundamentos de fotogrametría*. España: Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones, 2011. 65 p.
13. TORRES NIETO, Álvaro y VILLATE BONILLA, Eduardo. *Topografía*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 4ª ed. Colombia: Editorial Norma, 1968. 296 p.

14. WOLF, Paul. y GHILANI, Charles. *Topografía*. 11^a ed. México: Editorial Alfaomega, 2008. 952 p.
15. YouTube. *Referencia multimedia Topografía con drones + GPS RTK + Estación total*. [En línea]. <<https://www.youtube.com/watch?v=iWz82F354TE>>. [Consulta: 24 de agosto de 2019].
16. _____. *Referencia multimedia Topografía con drones en Perú*. [En línea]. <https://www.youtube.com/watch?v=_cieg8laqMA>. [Consulta: 18 de diciembre de 2019].

APÉNDICES

- Apéndice 1. **Plano en escala 1/1 000 que contiene las curvas de nivel con intervalos de 1,00 m, de las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las curvas de nivel son producto del estudio fotogramétrico realizado con un drone, en este trabajo de investigación**

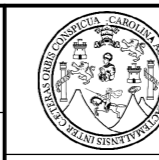
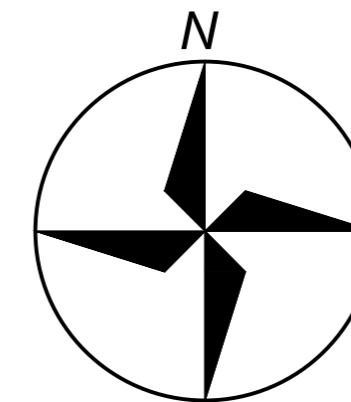
Fuente: elaboracion propia.

DATOS DEL PROYECTO

DATUM: WGS 84
 PROYECCIÓN: UTM
 ALTURA DE VUELO: 80 M.
 NÚMERO DE FOTOGRAFÍAS: 308
 ÁREA CUBIERTA: 11.50 HECTÁREAS.
 TRASLAPE LONGITUDINAL: 80%
 DRONE: PHANTOM 4 PRO.

COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE APOYO DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO

Nombre	Descripción	Este	Error al 95%	Norte	Error al 95%	Altura Elipsoidal	Error al 95%
GUAT		767172.884	0.000	1614480.807	0.000	1519.873	0.000
CII-	Base	763480.081	0.000	1613947.929	0.000	1484.012	0.000
P1--	P. Mártires	763777.501	0.002	1614144.606	0.002	1488.248	0.006
P2--	Biblioteca	763809.534	0.014	1614068.188	0.012	1488.307	0.016
P3--	CII2	763586.859	0.004	1614095.252	0.004	1486.250	0.006
P4--	Cancha Ing.	763690.535	0.002	1614113.960	0.004	1486.571	0.006
P5--	CII nuevo	763520.192	0.002	1613950.751	0.004	1484.202	0.006
P6--	Iglú	763580.953	0.010	1614010.100	0.012	1484.013	0.018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
 FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO:
 "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES"

CONTIENE:
CURVAS DE NIVEL

REVISÓ:
 Ing. Alfredo Beber

Vo.Bo.: _____

APROBÓ:
 Ing. Alejandro Castañón

EJECUTESE: _____

ESTUDIANTE:
 Saúl Rodenas Chivichón

FECHA: 2022
 ESCALA: 1:1000

HOJA No
 01 / 03



NOTA:

Este plano contiene las curvas de nivel que se obtuvieron de realizar un estudio fotogramétrico en las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ESPECIFICACIONES

- Curvas de nivel primarias a cada 1.00 m de elevación.
- Curvas de nivel secundarias a cada 0.50 m de elevación.
- Se indica el trazo del Alineamiento A-A planteado en el Anexo 2.
- Se indican las ubicaciones de los edificios que abarca la ortofotografía del Anexo 3.

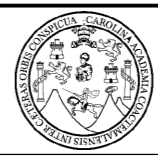
CURVAS DE NIVEL

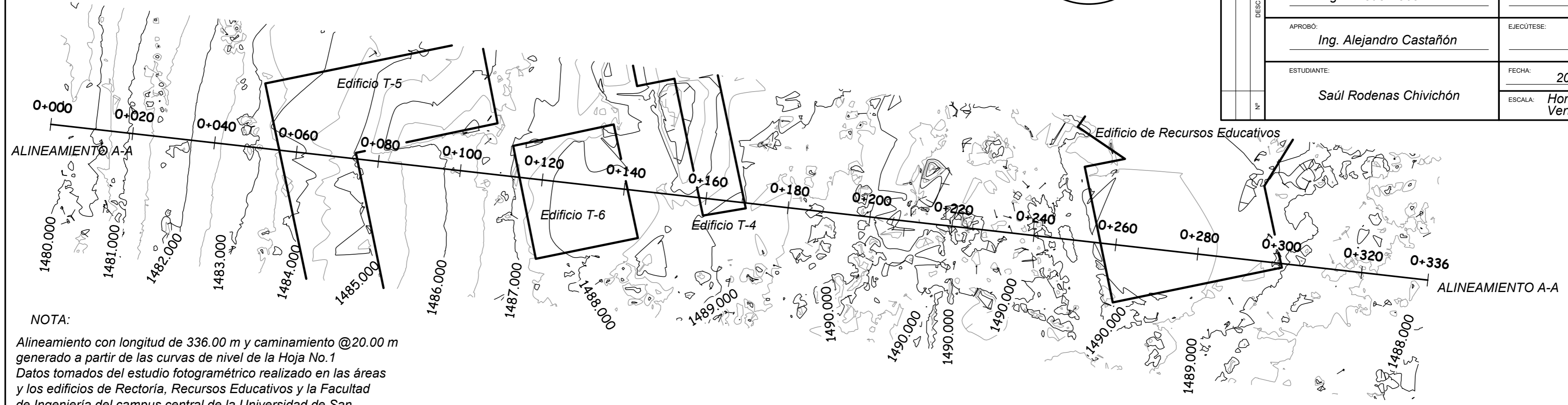
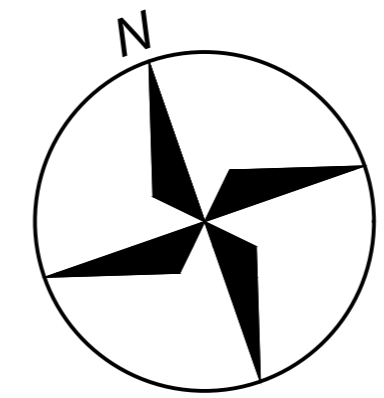
ESCALA: 1 / 1000
 INTERVALO: @ 1.00 m

Apéndice 2. **Plano que contiene planta y perfil topográfico. En la planta se trazó un alineamiento que tiene 336,00 metros de longitud con caminamientos a cada 20,00 m. El perfil topográfico contiene las alturas del alinamiento con escala horizontal 1/750 y escala vertical 1/250, de las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esta planta y perfil topográfico son producto del estudio fotogramétrico realizado con un drone, en este trabajo de investigación**

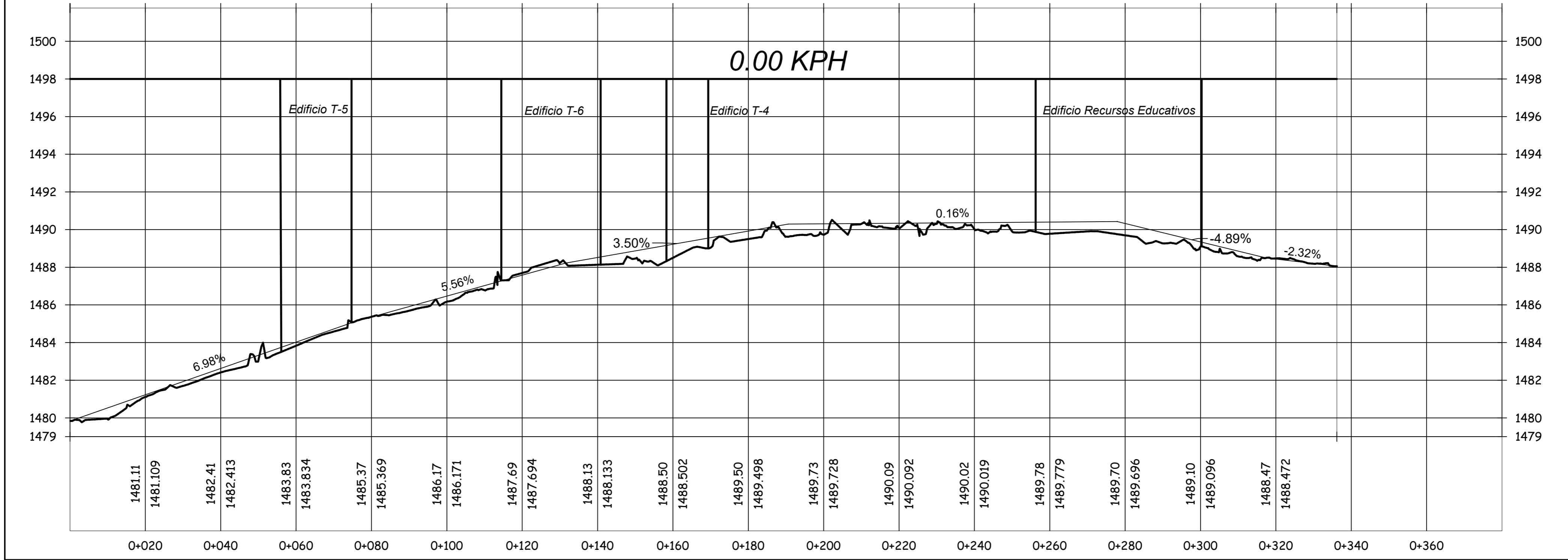
Fuente: elaboracion propia.

DATOS DEL PROYECTO
 DATUM: WGS 84
 PROYECCIÓN: UTM
 ALTURA DE VUELO: 80 M.
 NÚMERO DE FOTOGRAFÍAS: 308
 ÁREA CUBIERTA: 11.50 HECTÁREAS.
 TRASLAPE LONGITUDINAL: 80%
 DRONE: PHANTOM 4 PRO.

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS FACULTAD DE INGENIERÍA	
PROYECTO: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES"	
CONTIENE: <h2 style="text-align: center;">PLANTA Y PERFIL 0+000 - 0+336</h2>	
REVISÓ: Ing. Alfredo Beber	Vo.Bo.:
APROBÓ: Ing. Alejandro Castañón	EJECÚTESE:
ESTUDIANTE: Saúl Rodenas Chivichón	FECHA: 2022 ESCALA: Horiz: 1:750 Vert: 1:250
HOJA No 02 03	



NOTA:
 Alineamiento con longitud de 336.00 m y caminamiento @20.00 m generado a partir de las curvas de nivel de la Hoja No.1
 Datos tomados del estudio fotogramétrico realizado en las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



Apéndice 3. **Plano en escala 1/1 000 que contiene la ortofotografía de las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esta ortofotografía tiene GSD = 2,00 cm/pixel y es producto de realizar un estudio fotogramétrico con un drone Phantom 4 Pro, a una altura de 80,00 m sobre el nivel del terreno, con total de 308 fotografías que conforman el ortomosaico**

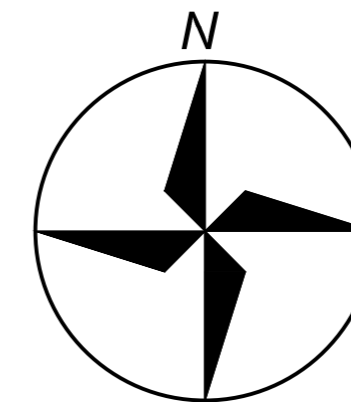
Fuente: elaboracion propia.

DATOS DEL PROYECTO

DATUM: WGS 84
 PROYECCIÓN: UTM
 ALTURA DE VUELO: 80 M.
 NÚMERO DE FOTOGRAFÍAS: 308
 ÁREA CUBIERTA: 11.50 HECTÁREAS.
 TRASLAPE LONGITUDINAL: 80%
 DRONE: PHANTOM 4 PRO.

COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE APOYO DEL MODELO FOTOGRAMÉTRICO

Nombre	Descripción	Este	Error al 95%	Norte	Error al 95%	Altura Elipsoidal	Error al 95%
GUAT		767172.884	0.000	1614480.807	0.000	1519.873	0.000
CII-	Base	763480.081	0.000	1613947.929	0.000	1484.012	0.000
P1--	P. Mártires	763777.501	0.002	1614144.606	0.002	1488.248	0.006
P2--	Biblioteca	763809.534	0.014	1614068.188	0.012	1488.307	0.016
P3--	CII2	763586.859	0.004	1614095.252	0.004	1486.250	0.006
P4--	Cancha Ing.	763690.535	0.002	1614113.960	0.004	1486.571	0.006
P5--	CII nuevo	763520.192	0.002	1613950.751	0.004	1484.202	0.006
P6--	Iglú	763580.953	0.010	1614010.100	0.012	1484.013	0.018



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
 FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO:
 "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS FOTOGRAMÉTRICOS UTILIZANDO VEHÍCULOS AÉREOS TRIPULADOS Y NO TRIPULADOS DE USO CIVIL O DRONES"

CONTIENE:
ORTOFOTOGRAFÍA

REVISÓ:
Ing. Alfredo Beber

Vo.Bo.: _____

APROBÓ:
Ing. Alejandro Castañón

EJECÚTESE: _____

ESTUDIANTE:
Saúl Rodenas Chivichón

FECHA: **2022**
 ESCALA: **1:1000**

HOJA No
03
03



NOTA:
 Este plano contiene la ortofotografía de las áreas y los edificios de Rectoría, Recursos Educativos y la Facultad de Ingeniería del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ORTOFOTOGRAFÍA
 ESCALA: 1 / 1000
 GSD: 2.00 CM/PIXEL

Apéndice 4. **Comparación del nivel de detalle observable de una ortofotografía escala 1/50 000 tomada con un vehículo tripulado, fotografía superior, y otra fotografía con GSD = 2,00 cm/píxel tomada con un dron Phantom 4 Pro, fotografía inferior. En las fotografías se muestra el Aula Magna de la Universidad de San Carlos de Guatemala**



Continuación apéndice 4.



Fuente: primera fotografía, sección del ortomosaico 29591_14_ORT_RGB del IGN. Segunda fotografía: tomada de la galería propia del autor de este trabajo.

Apéndice 5. **Modelo Digital de Terreno MDT, correspondiente al edificio de Rectoría del Campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Este modelo fue creado a partir de la toma de 55 fotografías capturadas con un drone Phantom 4 Pro, que realizó un vuelo circular alrededor de dicho edificio**



Fuente: elaboración propia, con programa Agisoft PhotoScan.

