



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

**EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS
NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS
URBANOS EN GUATEMALA**

Ing. Erick Rodolfo Mejía Rivera

Asesorado por el Mtro. Jorge Eduardo Morales Maldonado

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS
NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS
URBANOS EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ERICK RODOLFO MEJIA RIVERA

ASESORADO POR EL MTRO. JORGE EDUARDO MORALES MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA EN GEOMÁTICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	M.Sc. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Edson Toniño Hernández Mazariegos
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:

EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS URBANOS EN GUATEMALA

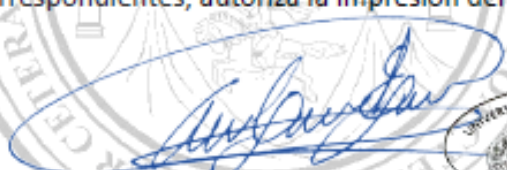
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 23 de mayo 2020.

Ing. Erick Rodolfo Mejía Rivera

DTG. 326.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS URBANOS EN GUATEMALA**, presentado por el Ingeniero Erick Rodolfo Mejía Rivera, estudiante del programa de Maestría en Ingeniería Geomática, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc



Guatemala, Agosto 2021

EEFFI-0985-2001

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS URBANOS EN GUATEMALA"** presentado por el Profesional **Erick Rodolfo Mejía Rivera** quien se identifica con Carné **008010242** correspondiente al programa de **Maestría en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cofi
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, Agosto 2021

EEPFI-0984-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Geomática** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS URBANOS EN GUATEMALA"** presentado por el Profesional **Erick Rodolfo Mejía Rivera** quien se identifica con Carné **008010242**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Turk
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, Agosto 2021

EEPM-0986-2021

En mi calidad como asesor del profesional **Erick Rodolfo Mejía Rivera** quien se identifica con Carné **008010242** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DEL USO DE IMÁGENES OBTENIDAS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT) EN EL LEVANTAMIENTO CATASTRAL DE PREDIOS URBANOS EN GUATEMALA"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Geomática en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Jorge Eduardo Morales Maldonado
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	El faro que siempre ilumina mi camino.
Mis padres	Rodolfo Mejía y Verónica Rivera. Su presencia me motiva a seguir.
Mis hermanos	Carolina y Guillermo Mejía, por su apoyo moral.
Mis hijos	Stéfano, Axel, Karol y Brian Mejía. Los cuatro puntos cardinales de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Querida casa de estudios.

Facultad de Ingeniería

Fuente de conocimientos y apoyo.

Geotecnologías S. A.

Empresa donde laboro, la cual me brindó equipo y software para este trabajo.

**Colegas y compañeros
de trabajo**

Quienes me han apoyado para alcanzar este logro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXXV
1. MARCO REFERENCIAL	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Tenencia de la tierra en Guatemala.....	2
1.3. Factores más frecuentes de conflictos agrarios.....	4
1.4. Orígenes de la aviación en Guatemala.....	5
1.5. Justificación	6
1.6. Alcances	7
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Breve historia de los VANT.....	9
2.2. Ventajas de los VANT.....	11
2.3. Desventajas en el uso de VANT	12
2.4. Aplicaciones profesionales de los VANT	12
2.4.1. Usos más comunes de los VANT	13
2.4.2. Volumetría con VANT	14

2.5.	Fotogrametría.....	16
2.6.	Catastro.....	18
2.6.1.	Breve historia del catastro en Guatemala.....	19
2.6.2.	Finalidad del catastro	20
2.6.3.	Generalidades del Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales del Registro de Información catastral	21
2.6.3.1.	Tolerancias, según actual reglamento	21
2.6.4.	Ciencias y disciplinas auxiliares del catastro.....	23
2.6.4.1.	Geodesia	23
2.6.4.2.	Topografía.....	23
2.6.4.3.	Geografía.....	23
2.6.4.4.	Cartografía.....	24
2.6.4.5.	Fotogrametría	24
2.6.4.6.	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	24
2.6.5.	Restitución catastral utilizando VANT.....	25
2.7.	Equipo utilizado.....	25
2.7.1.	VANT o drones.....	25
2.7.2.	GNSS	27
2.7.3.	Estación total.....	28
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	29
3.1.	Generación del ortomosaico.....	29
3.2.	Procedimientos para levantamientos catastrales mediante VANT	30
3.3.	Precisión de los vectores GNSS	35
3.4.	Comprobación de mediciones a frentes de casas.....	36

3.5.	Comparaciones según el estándar nacional de Estados Unidos para la exactitud de datos espaciales (NSSDA)	38
3.5.1.	Parámetros mínimos para cumplir con la hipótesis.....	38
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
	CONCLUSIONES	43
	RECOMENDACIONES	45
	REFERENCIAS	47
	APÉNDICES	57
	ANEXOS	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama del proceso para confeccionar la cartografía 1:1,000	XXIII
2.	Planificación de vuelo.....	XXV
3.	Polígono del área de estudio en Cubulco, Baja Verapaz	XXVI
4.	Puntos de control horizontal y vertical en el polígono de estudio	XXVII
5.	Punto de control A12.....	XXX
6.	Pantalla del <i>check list</i> antes del despegue.....	XXXI
7.	Visualización del vuelo en tiempo real.....	XXXI
8.	Extracto del ortomosaico generado con Agisoft Photoscan en el parque central del municipio de Cubulco, 2020.....	XXXIII
9.	Composición de dos ortomosaicos que permiten apreciar la correcta georreferenciación del segundo (Erick Mejía, 2020) respecto del primero (IGN, 2006).....	XXXIV
10.	Utilidades del uso de VANT: agricultura, construcción, techados y seguros, energía solar, topografía y minería	15
11.	Aplicación de cálculo de volúmenes derivados del uso de VANT	15
12.	Nombres aplicados a los vehículos aéreos no tripulados según el año.....	16
13.	Clasificación de la fotogrametría.	18
14.	Equipos utilizados: Mavic Pro, SP60 y Focus2	27
15.	Ortomosaico urbano de la población de Cubulco, Baja Verapaz	29
16.	Comprobación de campo	34
17.	Comprobación de medición al frente de una casa	38

TABLAS

I.	Equipo y software utilizado	XXIV
II.	Planificación GSD con DJI Mavic Pro	XXV
III.	Parámetros geodésicos para Guatemala	22
IV.	Características generales DJI Mavic Pro	26
V.	Especificaciones del receptor GNSS Spectra SP60	27
VI.	Especificaciones de la estación total Spectra Focus 2.....	28
VII.	Elementos a considerar en levantamientos catastrales mediante VANT.....	30
VIII.	Cuadro de coordenadas de los puntos de control terrestre GCP.....	32
IX.	Errores de los puntos de control terrestre GCP	32
X.	Resumen de comprobación de campo en las 9 áreas del estudio.....	34
XI.	Resultado del procesamiento de líneas base GNSS	35
XII.	Mediciones con estación total a frente de casas.....	36
XIII.	Errores obtenidos al comparar el ortomosaico con los puntos de control GCP.....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
Ha	Hectárea
Km	Kilómetro
m	Metro
mm	Milímetro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
px, pix	Píxel

GLOSARIO

Beidou	Sistema de navegación por satélite desarrollado por la República Popular de China.
Catastro	Registro administrativo dependiente del Estado, en el que se describen los bienes inmuebles.
CSV	Es un archivo de datos representados en una tabla separados por coma (del inglés <i>comma-separated values</i>).
Dátum	Marco de referencia que se utiliza para definir el tipo de coordenadas.
DSM	<i>Digital Surface Model</i> o modelo digital de superficie, indica el relieve del terreno, tomando en cuenta la vegetación, construcciones y objetos presentes.
DTM	Modelo digital del terreno (<i>digital terrain model</i>). Es la representación tridimensional de una superficie del terreno, consistente en coordenadas X, Y, Z, almacenadas en forma digital, sin tomar en cuenta la vegetación o

estructuras artificiales. Es equivalente al DEM o modelo digital de elevaciones.

Efemérides

Son los parámetros orbitales de alta precisión de un satélite.

Estación total

Es un aparato electromecánico que se utiliza para la topografía; consiste en la incorporación de un distanciómetro y un procesador a un teodolito.

GCP

Punto de control terrestre (*Ground Control Point*).

Geoposicionamiento

Método mediante el cual se ubica un punto en un sistema de coordenadas de referencia.

Georreferenciación

Es el proceso de relacionar el sistema de coordenadas original de un conjunto de datos (*data set*) con un sistema de coordenadas geográfico.

Glonass

Sistema global de navegación por satélite desarrollado por la Unión Soviética, siendo hoy administrado por la Federación Rusa.

GNSS

Sistema global de navegación por satélite que engloba a todas las constelaciones de satélites de geoposición.

GPS	Sistema global de posicionamiento, creado por el Estado de Defensa de Estados Unidos de América.
GSD	Distancia de muestreo del suelo (<i>ground sampling distance</i>) entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos.
GTM	Es la proyección cartográfica oficial para Guatemala.
IMU	Unidad de medición inercial de un VANT (<i>inertial measurement unit</i>). Es el formato estándar de la mayoría de las cámaras fotográficas. Admite diferentes niveles de compresión de la imagen; puede reproducir con bastante fidelidad los colores; también posee buen desempeño en imágenes oscuras o con sombra. Es un formato de archivo que se utiliza para mostrar datos geográficos en un navegador terrestre, como Google <i>Earth</i> .
Ortomosaico	Composición de imágenes a las que se han corregido todos los errores geométricos para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular. La imagen resultante tiene una resolución que varía entre los 2-20 cm/píxeles, dependiendo de la altura de vuelo y escalas, que varían entre

1:500 en adelante, según el tamaño del proyecto o nivel de detalle requerido.

PDOP

Position dilution of precision, por sus siglas en inglés. Dilución de precisión de la posición, o dilución geométrica de precisión; es un término utilizado en la navegación por satélite e ingeniería geomática para especificar la propagación del error como un efecto matemático de la geometría del satélite de navegación en la precisión de la medición posicional.

RAC

Red de apoyo catastral.

RIC

Registro de Información Catastral.

UTM

Sistema de coordenadas planas (E, N); sus siglas significan *Universal Transversal Mercator*.

VANT

Vehículo aéreo no tripulado (conocido popularmente como dron).

WGS84

Es un sistema geodésico de coordenadas geográficas usado mundialmente, que permite localizar cualquier punto de la Tierra por medio de tres unidades dadas. Sus siglas significan *World Geodetic System 1984*.

RESUMEN

Este trabajo contiene consideraciones técnicas para realizar trabajos de aerofotogrametría mediante la utilización de VANT en Guatemala. En la actualidad no se tiene una normativa para realizar levantamientos catastrales utilizando vehículos aéreos no tripulados. No hay certeza en cuanto a exactitudes de los levantamientos catastrales, que se pueden obtener mediante el uso de esta tecnología.

A través de este trabajo se demuestra que, utilizando las imágenes generadas por los vehículos aéreos no tripulados VANT, se puede obtener un ortomosaico de gran resolución espacial, que alcance los niveles de precisión requeridos por las normas catastrales de Guatemala, para realizar levantamientos catastrales urbanos a escala 1: 1,000.

Este estudio fue realizado en el municipio de Cubulco, Baja Verapaz, donde se colocaron marcas-foto identificables o dianas, las cuales se geoposicionaron y se realizaron los vuelos fotogramétricos. Del ortomosaico resultante se pudo comprobar que el error horizontal fue de $\pm 10,52$ cm.

Luego se procedió a efectuar mediciones topográficas en nueve sectores del proyecto y se compararon contra las distancias del ortomosaico, obteniendo diferencias máximas de 10 centímetros. También se comprobaron los frentes de 15 predios, donde se detectaron errores máximos de 16 centímetros. Con estos resultados se concluye que todas las mediciones realizadas están dentro de las tolerancias del manual de normas y procedimientos catastrales del RIC, que establece un máximo de 30 centímetros.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- Contexto general
 - Actualmente en Guatemala no existe una norma específica para realizar levantamientos catastrales mediante la utilización de vehículos aéreos no tripulados. Se han venido realizando levantamientos catastrales con métodos topográficos convencionales, los cuales se hacen mediante equipos de topografía (teodolito, distanciómetro, estaciones totales y equipos GNSS). Las ortofotos nacionales con que cuenta el RIC son del año 2006 y tienen una resolución de 0.50 m.
 - Con la aparición de los vehículos aéreos no tripulados o drones se han hecho pruebas en otros países con fines catastrales y topográficos y han dado buenos resultados; por lo que en el país surge la necesidad de incorporar otro método complementario, el cual ha tomado auge, es más reciente y está al alcance del gremio de agrimensores: los vehículos aéreos no tripulados (VANT).
- Descripción del problema: en el manual de normas y procedimientos catastrales del RIC no se menciona alguna normativa en cuanto a levantamientos catastrales a escalas grandes, realizados mediante VANT. Existe falta de certeza en cuanto a exactitudes de los levantamientos catastrales, que se pueden obtener mediante uso de vehículos aéreos no tripulados.

- Formulación del problema
 - Pregunta central: ¿De qué manera es posible realizar levantamientos catastrales urbanos a escala grande, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados VANT?
 - Pregunta 1: ¿Cuáles son los procedimientos para obtener las tolerancias permitidas por el RIC para levantamientos catastrales urbanos a escalas 1:1,000 mediante VANT?
 - Pregunta 2: ¿Qué comparaciones se derivan de los levantamientos mediante drones y los métodos convencionales?

- Delimitación del problema

El presente estudio se enmarcó dentro de la pequeña localidad rural de Cubulco, Baja Verapaz, Guatemala, con relieve regular, donde se aplicaron técnicas de topografía y fotogrametría hasta obtener un ortomosaico a escala 1: 1,000 y que, a su vez, este pueda servir para futuros trabajos de catastro urbano, cumpliendo con la reglamentación existente del Registro de Información Catastral (RIC).

OBJETIVOS

General

Determinar la aplicabilidad del método fotogramétrico para levantamiento catastral en Guatemala, utilizando fotografía aérea capturada por un vehículo aéreo no tripulado (VANT).

Específicos

- Determinar la consistencia geométrica predial alcanzada con ortofotos producidas a partir de un vuelo con VANT.
- Comparar los resultados obtenidos de un levantamiento fotogramétrico de gran escala con los obtenidos de un método directo, según la normativa vigente en Guatemala.
- Identificar la metodología mínima para la producción de ortofotos mediante VANT utilizables en catastro urbano, con apego a la calidad requerida por la normativa vigente en Guatemala.

HIPÓTESIS

Mediante imágenes obtenidas con vehículos aéreos no tripulados, VANT, genéricos de bajo costo, es posible generar un ortomosaico a escala 1:1000, con la suficiente resolución espacial que cumpla con la normativa del RIC, para levantamientos catastrales urbanos; es decir, que el ortomosaico resultante tenga una tolerancia dentro de los 30 centímetros, al compararse con su valor de geoposicionamiento.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Plan de acción:

- Se estableció un área de estudio de 76 Ha, en el casco urbano de Cubulco, Baja Verapaz, donde se marcaron 15 puntos de control horizontal y vertical.
- Fueron realizadas mediciones estáticas con equipos GNSS de doble frecuencia en todos los puntos de control.
- Se efectuaron cuatro misiones a 100 metros de altura de vuelo y con traslape de 80 % longitudinal y transversal.
- Se aplicó procesamiento GNSS y fotogramétrico a los datos obtenidos.
- Del vuelo resultante, también se logró obtener el modelo digital de superficie (DSM).
- Del ortomosaico obtenido, se hicieron mediciones gráficas y se compararon contra mediciones en campo, para tener resultados que permitieron elaborar algunas conclusiones.

El trabajo se realizó a través de las siguientes fases:

- Fase I: permisos con las autoridades municipales y Policía Nacional Civil
- Fase II: establecimiento de puntos de control horizontal y vertical
- Fase III: vuelo fotogramétrico mediante VANT
- Fase IV: mediciones terrestres de comprobación
- Fase V: cálculo y resultado de mediciones
- Fase VI: análisis, conclusiones y recomendaciones

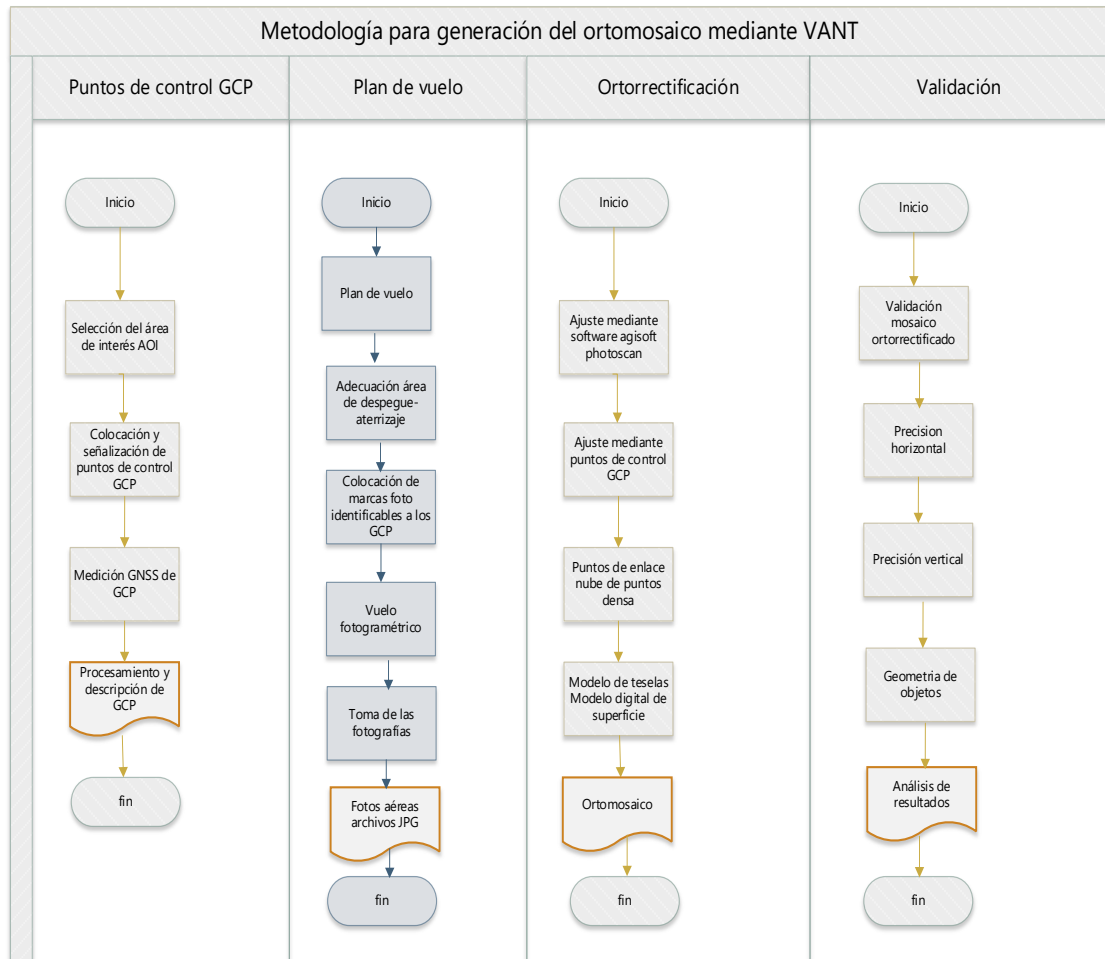
Datos generales:

Dentro de la metodología para la generación de cartografía catastral se consideraron 5 etapas:

- Etapa 1. Planificación de vuelo
- Etapa 2. Vuelo fotogramétrico
- Etapa 3. Medición y postproceso de puntos de apoyo fotogramétrico GCP
- Etapa 4. Procesamiento
- Etapa 5. Digitalización sobre ortofoto

En la figura 1 se explican los procesos a realizar para obtener el ortomosaico.

Figura 1. Diagrama del proceso para confeccionar la cartografía 1:1,000



Fuente: elaboración propia, empleando formas de Microsoft Word.

En la tabla I se listan los equipos y software utilizados para la generación de insumos cartográficos con fines catastrales.

Tabla I. **Equipo y software utilizado**

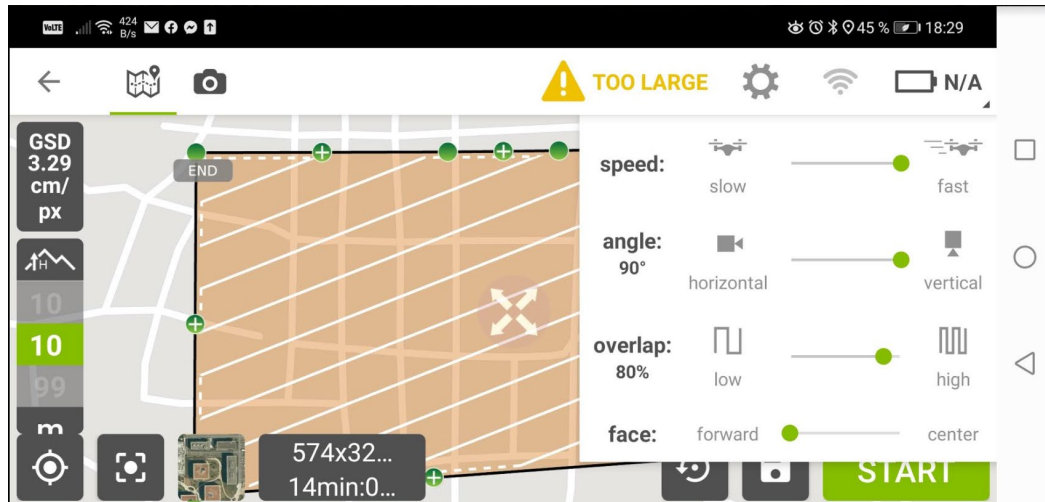
Equipo/software	Marca-modelo
VANT DJI Mavic Pro	
Cámara con sensor 1/2.3" CMOS de 12.71 Mpx (36.3 x 23.7 cm), F28 mm, f/2.2	DJI Mavic Pro
Estabilizador de 3 ejes Gimbal	
Receptor GNSS SP60	Spectra
Estación total Focus 2	Spectra
Software Ctrl+DJI para planificar vuelo	DJI
Software para proceso de imágenes (demo)	Agisoft Photoscan
Software de planificación GNSS y proceso (demo)	Spectra Survey Office
Software ArcGIS Pro (licencia)	Esri

Fuente: elaboración propia.

Planificación del vuelo fotogramétrico: la planificación es un proceso primordial para la generación de los productos cartográficos, ya que de esta dependen todos los resultados. Para la planificación del vuelo con el Mavic Pro se utilizó el software Ctrl+DJI, el cual es una aplicación configurable en Android e IOS, compatible con Google Earth, tomando en cuenta los parámetros de vuelo. En la figura 2 se puede ver la pantalla principal del plan de vuelo, utilizando la aplicación Ctrl+DJI.

En la tabla II se ve el resultado del análisis del tamaño de píxel resultante (GSD), al planificar el vuelo, en el cual se introdujeron los parámetros de área de estudio de la figura 3, altura de vuelo, traslapes y tiempo de vuelo.

Figura 2. Planificación de vuelo



Fuente: elaboración propia, empleando la aplicación Ctrl+DJI Pix4D, Google Play Store.

Tabla II. Planificación GSD con DJI Mavic Pro

Área	76.6 hectáreas
Tamaño de pixel	3.29 cm (GSD)
Tiempo del vuelo	4 vuelos de 20 minutos
Altura de vuelo	100 m
Traslape longitudinal y transversal	80 %

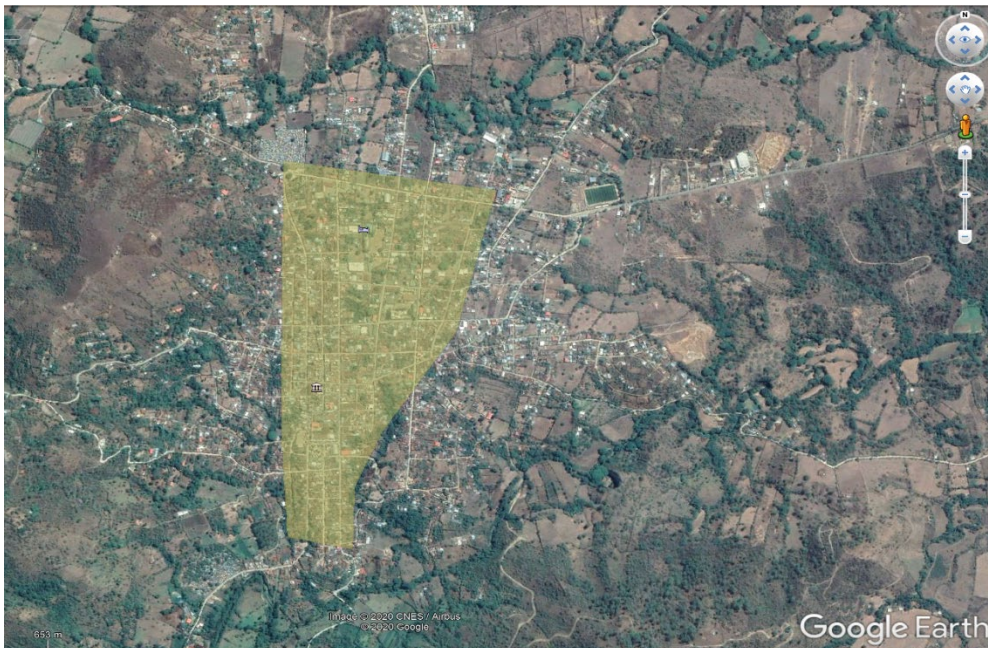
Fuente: elaboración propia.

Puntos de control (GCP):

Para asegurar una correcta cartografía se ubicaron puntos de control horizontal y vertical en el polígono que se muestra en la figura 4. Se marcaron, midieron y procesaron 15 puntos que sirvieron para georreferenciar las

fotografías aéreas. Se tomó como punto conocido la estación CUBULCO1 del IGN.

Figura 3. **Polígono del área de estudio en Cubulco, Baja Verapaz**



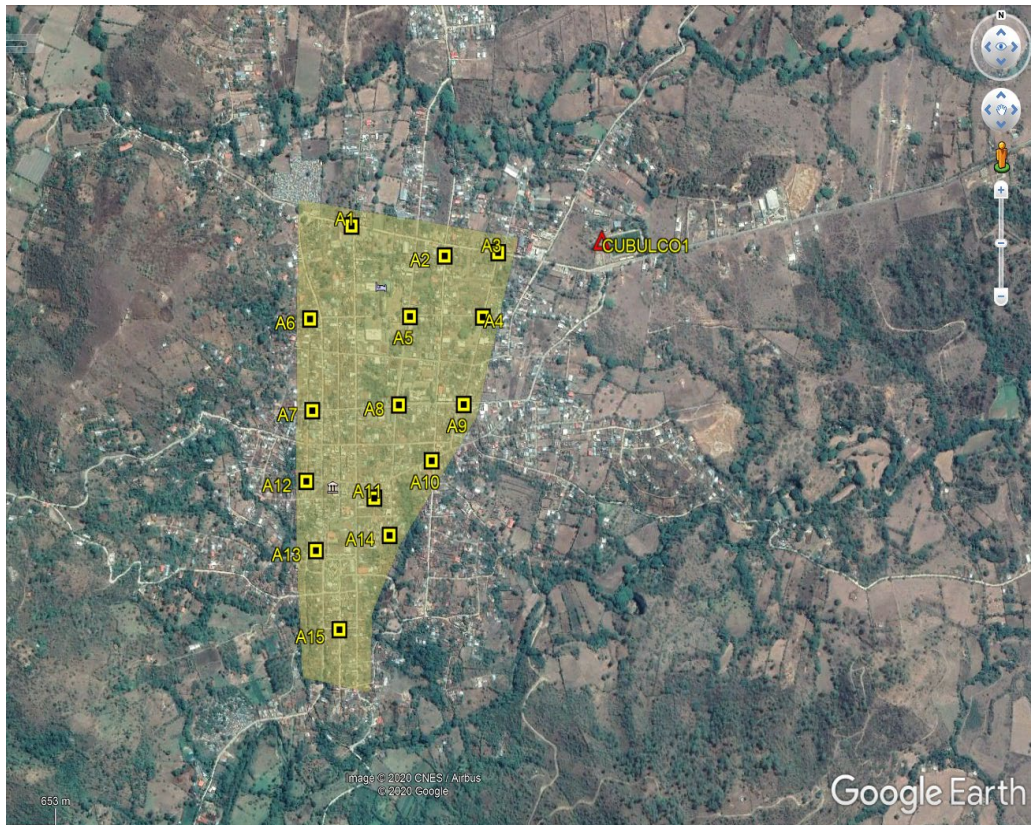
Fuente: elaboración propia, con adaptaciones realizadas de DJI y Spectra Geoespacial. Consultado el 12 de noviembre de 2020. Recuperado de <https://www.dji.com/mavic>; <https://spectrageoespacial.com/category/productos>.

Mediciones y establecimiento de los puntos de control terrestre GCP:

Los puntos de control terrestre se colocaron para la correcta orientación y georreferenciación del bloque fotogramétrico en el sistema de coordenadas nacionales, los cuales se nombran como GCP's; se repartieron de manera homogénea en el área de estudio, priorizando que sean de alta visibilidad, y se rastrearon durante sesiones de 20 minutos cada uno. La estación base se ubicó en el punto CUBULCO1.

Se colocó una marca permanente en cada punto, para posteriormente pintar dianas o cruces que se puedan visualizar desde la toma aérea.

Figura 4. **Puntos de control horizontal y vertical en el polígono de estudio**



Fuente: elaboración propia, con adaptaciones realizadas de DJI y Spectra Geoespacial.
Consultado el 12 de noviembre de 2020. Recuperado de <https://www.dji.com/mavic>;
<https://spectrageospatial.com/category/productos>.

El levantamiento se realizó con el método de posicionamiento estático en sitios claramente fotoidentificables.

Una vez completada la planificación y coordinación con el equipo de trabajo, se procedió a tomar las siguientes consideraciones, previas a la medición GNSS:

- Antes de colocar el equipo en el punto a observar se deben identificar los obstáculos o problemas que se determinaron en la etapa de reconocimiento.
- Para obtener una adecuada recepción de la señal emitida por los satélites, el ángulo de elevación sobre el horizonte no debe ser mayor a 15°.
- El número mínimo de satélites conectados debe ser de 4, es decir, que para cada sesión de observación se planificaron las horas en las que el PDOP fuera inferior a 5, determinándose una ventana de observación entre las 6 am a las 6 pm.
- Evitar la instalación de la antena en lugares donde pueda existir obstrucción o rebote de las señales electromagnéticas de los satélites, tales como la cercanía a construcciones, árboles, vehículos, entre otros.
- La altura de la antena deberá medirse desde la marca de la estación hasta la base de la antena.
- Se deberán evitar levantamientos en áreas en donde se produzcan transmisiones radiales, radares de frecuencia media, estaciones de microondas, antenas de transmisión de alta potencia, transformadores de alta tensión, sitios en que se produzca una alta interferencia causada por los sistemas de ignición vehicular y líneas de conducción eléctrica de alto voltaje.

- Las anotaciones de campo deberán ser conservadas cuidadosamente, ya que representan un documento de información primaria.

En la figura 5 se puede observar la medición del punto de control A12, ubicado frente a la iglesia católica de Cubulco.

Vuelo fotogramétrico:

Se escogió un sitio seguro y despejado, el cual fue utilizado como área de despegue y aterrizaje, ubicado en el jardín del hotel Los Delfines; se procedió a realizar el plan de vuelo mediante la aplicación Ctrl+DJI. Se cargó el área a sobrevolar mediante archivos KML, teniendo en cuenta que se debe abarcar un poco más del área requerida, para que exista suficiente cobertura en los bordes. Se escogió la altura de vuelo y la velocidad de la aeronave, el traslape longitudinal y transversal; se comprobó la carga de las baterías tanto del VANT, como del control y del teléfono.

Como se observa en la figura 6, se tiene un listado de chequeo antes de iniciar el vuelo.

Cuando ya se tienen todos los parámetros chequeados, el aparato está listo para el despegue.

Figura 5. **Punto de control A12**

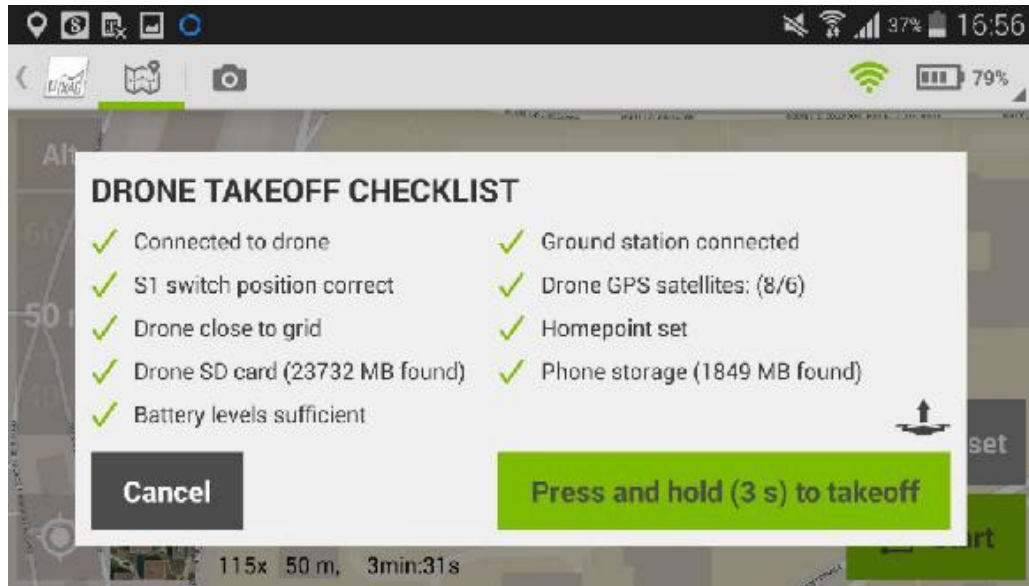


Fuente: [Fotografía de Erick Mejía]. (Cubulco, Baja Verapaz. 2020). Colección particular. Guatemala.

Cuando inicia el vuelo se puede seguir la trayectoria en la pantalla, donde se indica la línea de vuelo, velocidad, número de foto, estatus de la aeronave, entre otros.

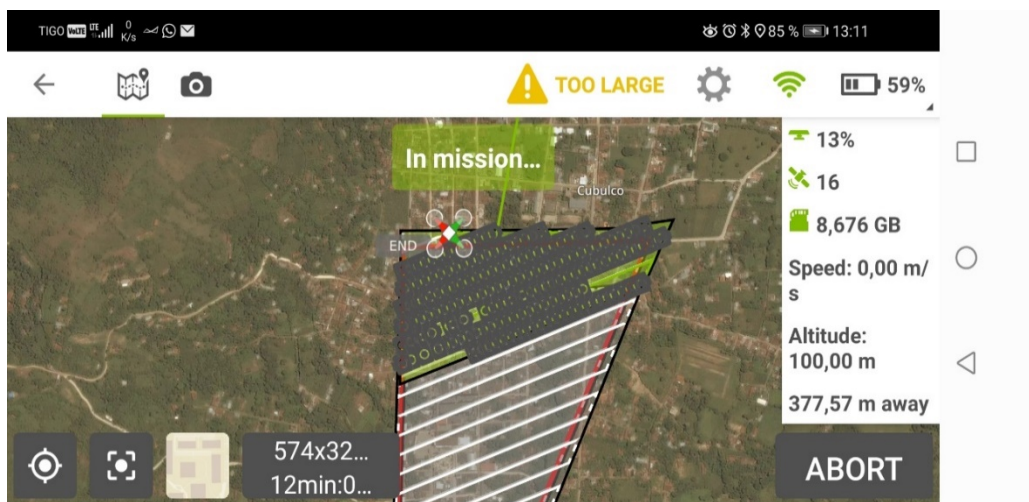
En la figura 7 se puede observar la forma en la que se visualiza el área a fotografiar, así como el número de satélites disponibles, altitud, señal, memoria, velocidad, batería, entre otros.

Figura 6. Pantalla del *check list* antes del despegue



Fuente: elaboración propia, empleando la aplicación Ctrl+DJI Pix4D, Google Play Store.

Figura 7. Visualización del vuelo en tiempo real



Fuente: elaboración propia, empleando la aplicación Ctrl+DJI Pix4D, Google Play Store.

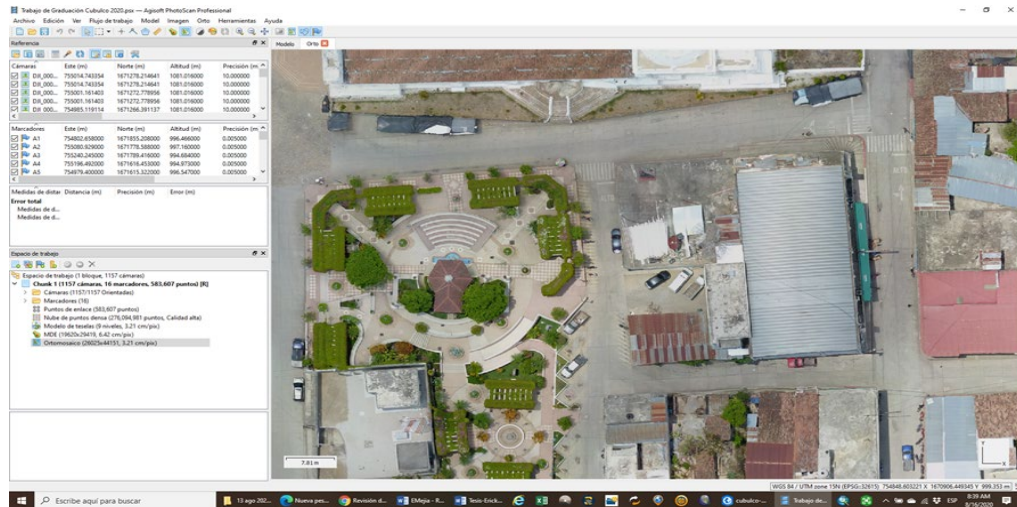
Una vez terminada la misión de vuelo, el VANT procede a regresar a la zona marcada para el aterrizaje, con una variación de aproximadamente 1 m, con lo cual se asegura un aterrizaje exitoso.

- Procesamiento de datos de la misión fotogramétrica: para el procesamiento de información generada se utilizó el software Agisoft Photoscan. Como procedimiento primario se transfieren los archivos guardados en la tarjeta SD del DJI Mavic Pro; de esta manera se obtienen todas las fotografías en formato JPG. Cada fotografía tiene su centro de exposición con coordenadas geográficas generadas mediante el sistema GNSS ubicado en el VANT, así como los ángulos de aleo, cabeceo y deriva (Yaw/kappa, Pitch/phi, Roll/Omega).
- Introducción de los puntos de control terrestre GCP (s.f): se introducen las coordenadas de los GCP obtenidas en el postproceso GNSS, las cuales se marcan de manera minuciosa para evitar errores y mejorar el procesamiento, en cada una de las fotografías sobre las cuales aparece. Normalmente los puntos de control se introducen mediante un archivo formato CSV.
- Ajuste absoluto: tiene como finalidad realizar la orientación relativa de las fotografías, basándose en los algoritmos del software. El programa encuentra puntos en común dentro de las imágenes para combinar la información del archivo en el que se localizan los desplazamientos y giros.
- Generación del DTM: la creación de la nube de puntos y el modelo digital del terreno (DTM) da inicio con la configuración de la resolución espacial del terreno (GSD), el formato de salida o la selección del formato en el

caso de la nube de puntos, con una resolución espacial esperada de 3.2 cm por pixel, para este proyecto. Es de hacer notar que en este estudio se llegó hasta obtener el modelo digital de superficie DSM, ya que habría que elaborar otro proceso de filtrado para obtener el relieve del terreno (sin vegetación o construcciones).

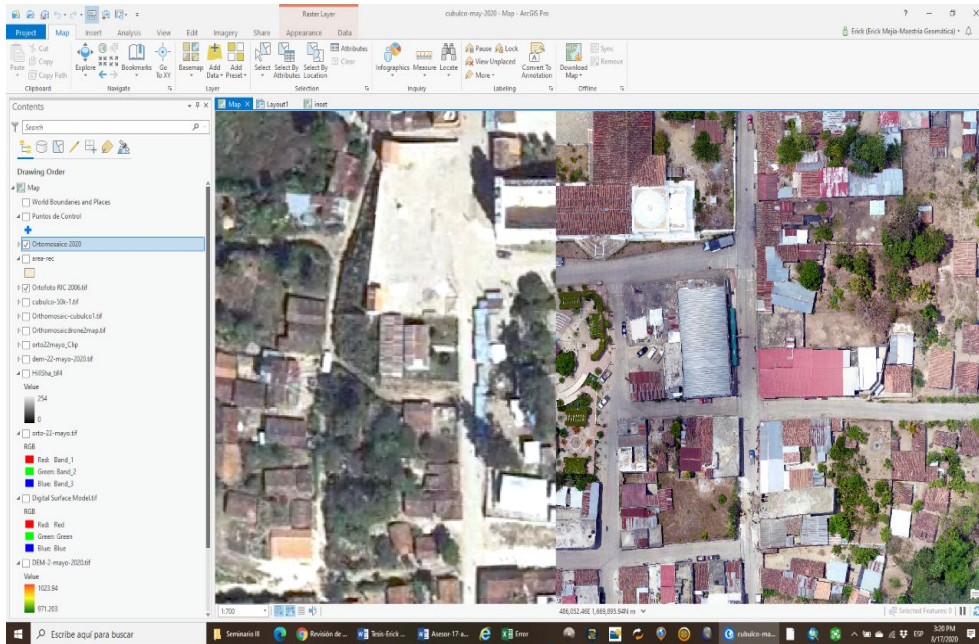
- Generación del ortomosaico: se denomina mosaico a un grupo de imágenes obtenidas de una o varias cámaras, que tienen áreas de traslape común, y que se combinan y unen en una sola imagen, la cual permite ampliar el rango de visión de la escena. Al corregir el mosaico de las distorsiones del relieve del terreno y de los objetos que contiene, se crea el ortomosaico (Escalante y Porras, 2016). En la figura 8 se puede ver una ortofoto generada mediante el software Agisoft Photoscan.

Figura 8. Extracto del ortomosaico generado con Agisoft Photoscan, parque central del municipio de Cubulco, 2020



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Agisoft Photoscan.

Figura 9. **Composición de dos ortomosaicos que permiten apreciar la correcta georreferenciación del segundo respecto del primero (IGN, 2006)**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa ArcGIS Pro.

INTRODUCCIÓN

Según estudios realizados en otros países, se han obtenido buenas precisiones utilizando VANT con características superiores, sin embargo, se ha podido demostrar que con el equipo utilizado en esta investigación también es posible alcanzar altas precisiones. De esta manera se podría complementar el trabajo de los agrimensores, y de las municipalidades, para obtener en corto tiempo y con pocos recursos humanos, ortofotos y ortomosaicos a gran escala.

El último vuelo fotogramétrico realizado a nivel nacional, data del año 2006 y cuenta con ortofotos con resolución espacial de 0.50 m; por lo que para fines catastrales a gran escala no sería suficiente. Este estudio abre las posibilidades de obtener ortofotos con diez veces mayor resolución espacial y a un costo asequible, al alcance de los municipios que tienen poco presupuesto. Es de hacer notar que las entidades que pueden ejecutar catastro en Guatemala son:

- La municipalidad
- El RIC en modalidad de ejecución directa o por subcontratación
- Otra institución del Estado mediante mandato especial.

Con la llegada de los VANT, (vehículos aéreos no tripulados, mejor conocidos como drones) equipados para capturar fotografías de alta definición y posicionamiento GNSS, se ha abierto una gran oportunidad de aprovechamiento para realizar labores de adquisición de datos geográficos, aplicados a las ciencias de la tierra.

Este trabajo busca hacer una evaluación de utilizar VANT como vehículos para capturar imágenes, que una vez procesadas y convertidas en ortofotos, servirán de base para la digitalización de predios urbanos.

En el medio pueden encontrarse imágenes satelitales de Google Earth que se basan en Landsat 7 y 8 que llegan hasta 15 metros por pixel o en el otro extremo, imágenes de Digital Globe con resoluciones de 30 centímetros por pixel. Sin embargo, para aplicaciones en áreas urbanas pequeñas, es posible obtener resoluciones espaciales del orden de pocos centímetros, como es el caso del uso de VANT de bajo costo como el DJI Mavic Pro, y otros.

La idea de este estudio se originó debido a que hasta ahora en Guatemala, los agrimensores no tienen la libertad de aplicar tecnologías de fotogrametría mediante la utilización de VANT. No existe una normativa para los parámetros que definan una ortofoto generada mediante VANT, en levantamientos urbanos con fines catastrales (Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales del RIC, 2008).

A través de este trabajo se pretende demostrar que, con la tecnología de los vehículos aéreos no tripulados, se pueden obtener ortofotos de gran calidad y exactitud, que alcancen los niveles de precisión requeridos por las normas catastrales de Guatemala.

Se realizó todo el proceso, desde el reconocimiento del área de estudio, contacto con las autoridades, permisos, colocación de los puntos de control, geoposicionamiento, planificación del plan de vuelo, mediciones fotogramétricas mediante VANT, procesamiento de la información, mediciones topográficas y comparación de resultados.

Este trabajo muestra en el primer capítulo, los antecedentes, justificación y alcances del estudio. En el segundo se presenta un resumen histórico y conceptos básicos de la utilización de los vehículos aéreos no tripulados y de los equipos y software empleados en el estudio.

El tercer capítulo incluye resultados del trabajo de campo y oficina. Luego en el cuarto se hace una discusión de los resultados encontrados. Por último, se incluyen las conclusiones y recomendaciones.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

Desde hace unos años en Guatemala, los vehículos aéreos no tripulados VANT, han venido cobrando mayor interés por el público, no solo para entretenimiento, sino para actividades comerciales, industriales y de agricultura. Gándara (2017) estima que en el país podría haber entre 2 mil a 2 mil 500 drones, de los que solamente 500 están registrados en la Dirección General que antes eran para uso exclusivo de grandes empresas u organizaciones; sin embargo, cada vez son más accesibles a todo el público, para que sean utilizadas en beneficio de tareas que estuvieron relegadas a métodos tradicionales.

En el caso de los VANT, estos constituyen una herramienta valiosa para toma de fotografías de alta definición, las cuales, al ser debidamente georreferenciadas, nos pueden generar nubes de puntos, mapas detallados en dos y tres dimensiones que servirán de apoyo para la cartografía y catastro a escalas urbanas 1:1000 o 1:500 (Fernández, 2010).

En otros países, de acuerdo con Vásquez (2017), se han hecho algunos estudios del tema de levantamientos catastrales mediante el uso de VANT, para hacer comparativos entre costos de la topografía tradicional de Aeronáutica Civil.

El desarrollo de las tecnologías en la toma de fotografías aéreas y fotogrametría según Zelaya *et al.* (2016) ha abierto nuevas áreas, versus la

combinación de topografía y fotogrametría mediante VANT (Coello y Ballesteros, 2015; Gallardo, 2007; Camargo, 2011; Sani, 2015).

Con esta información se pretende llegar a realizar levantamientos catastrales urbanos mediante el uso de VANT, que se encuentren dentro de los parámetros establecidos en la normativa oficial de Guatemala.

La Dirección General de Aeronáutica Civil tiene una reglamentación específica para los vehículos aéreos no tripulados (VANT), que se puede encontrar en su sitio web; sin embargo, de acuerdo con Gándara (2017) los trámites engorrosos hacen que los propietarios de VANT con peso mayor a 250 gramos, desistan de su inscripción.

Históricamente, en Guatemala la falta de registros catastrales fidedignos ha facilitado que proliferen las ocupaciones ilegales de la tierra. Esta situación, según Erba y Piumetto (2016) impide el correcto desarrollo de las municipalidades y sus respectivos planes de ordenamiento territorial POT, que garanticen una adecuada recaudación de impuestos y tenencia de la tierra. El primer mapa con fines catastrales que se conoce en el país es el llamado Ejidos de Guatemala de 1775 (Pellet, 1994).

1.2. Tenencia de la tierra en Guatemala

Según Davis (1997) en América Latina se dieron varios períodos relativos a la tenencia de la tierra:

- Período Precolombino
 - Se basaba en la producción con fines agrícolas para subsistir.
 - Las tierras eran trabajadas en usufructo.

- Período Colonial
 - En este tiempo se utilizaban el “repartimiento y encomienda”
 - La agricultura se manejaba en grandes latifundios
 - Existían las tierras comunales de indios

- Postindependencia
 - Los terrenos baldíos se declaraban particulares.
 - Se empieza a promocionar la compra y venta de propiedades.
 - Inicia el registro de matrículas de terrenos para el cobro de un impuesto territorial.

- Periodo Liberal
 - Se realiza la expropiación de tierras pertenecientes a la iglesia católica.
 - Se realizan grandes concesiones para favorecer a los cafetaleros.

- Periodo Revolucionario 1944 -1954
 - Se crea el marco legal que favorecía a los campesinos
 - Se prohíben los latifundios
 - Inicia la reforma agraria
 - Se da lugar a la expropiación de tierras a compañías extranjeras
 - Empiezan a organizarse los obreros y campesinos

- Época contrarrevolucionaria. décadas 1960-1990
 - Se deroga la reforma agraria

- Se hace la devolución de las tierras expropiadas
- Se adjudican tierras con vocación forestal
- Inicia el reasentamiento de campesinos en tierras, para vivienda
- La iglesia participa en organizar cooperativas agrícolas

1.3. Factores más frecuentes de conflictos agrarios

Según el Informe Nacional de Desarrollo Humano (2009-2010), se tienen las siguientes causas de conflictos agrarios:

- Los predios no aparecen registrados en el Registro General de la Propiedad.
- Los linderos tienen diferencias entre dos o más propietarios.
- Existencia de traslape de medidas entre predios y en documentos de posesión.
- Se encuentran diferencias de medidas entre linderos.
- Se da el caso de ventas duplicadas.
- Existen conflictos de herencia.
- Diferencias en los derechos de vía.
- Existencia de duplicación de documentos.
- Diferencias entre esquineros y colindancias.
- Incongruencia en los límites municipales

1.4. Orígenes de la aviación en Guatemala

Los inicios de la aviación en Guatemala se remontan a 1910, cuando los señores Alberto de la Riva y Víctor Ortiz, construyeron un aparato planeador con el que pudieron realizar los primeros intentos de volar que se tienen registrados en el país (DGAC, 2016).

A partir de la década del 2000, los drones o vehículos aéreos no tripulados empezaron a aparecer en Guatemala, como artefactos de entretenimiento; en la actualidad se han convertido en un dispositivo que, por su precio relativamente accesible, está al alcance de muchas personas; su crecimiento tan acelerado hizo que, expertos y juristas crearan un marco normativo para garantizar y resguardar la seguridad de los antiguos usuarios del espacio aéreo, así como de los futuros usuarios y de las personas y bienes en el espacio terrestre.

La Organización de Aviación Civil Internacional creó en el 2011 la primera circular, después de más de 5 años de investigación sobre el sistema de aeronaves no tripuladas, en donde analizan sus principales cuestionamientos sobre los drones y la urgente necesidad de que los Estados regulen su uso civil, ya que como ellos mismos establecen, es imperativo que todos los usuarios del espacio aéreo regulen la seguridad operacional para prevenir accidentes, y mencionan que los VANT presentan peligros para la aviación civil (DGAC, 2016).

Hasta la fecha no se tiene documentación oficial de estudios fotogramétricos mediante VANT en Guatemala; sin embargo, se han realizado estudios de suelos y cartografía digital para complementar los trabajos existentes.

El Colegio de Ingenieros de Guatemala ha organizado varios talleres y seminarios sobre drones; el primero se realizó en junio de 2016, con participación de profesionales de diferentes áreas.

1.5. Justificación

La línea de investigación de este trabajo está enmarcada dentro de la temática: cartografía de grandes, medianas y pequeñas escalas, utilizando percepción remota y/o fotogrametría. En el ámbito de los levantamientos catastrales en Guatemala se viene trabajando con metodologías tradicionales como la fotogrametría con aeronaves pilotadas, topografía con equipos convencionales como teodolitos, estaciones totales y con equipos GNSS. Sin embargo, han aparecido otras tecnologías, como los VANT con cámaras de alta definición, y posicionamiento GNSS que utilizan métodos de fotogrametría para la confección de cartografía en dos y tres dimensiones.

Según el listado de Agrimensores del Registro de Información Catastral RIC, a enero del 2020 estaban inscritos 715 profesionales y sería de mucha utilidad para dicho gremio si se permitiera utilizar VANT como complemento para levantamientos catastrales urbanos (escalas 1: 1,000 a 1: 5,000), y de esta manera poder entregar a sus clientes cartografía de alta calidad.

Es por ello que se pretende por medio de este estudio aportar en el campo del catastro, fotogrametría y geodesia, una evaluación del uso de imágenes obtenidas de vehículos aéreos no tripulados (VANT) en el levantamiento catastral de predios urbanos en Guatemala, para su aplicación en procesos de levantamiento catastral en áreas urbanas.

Los usuarios de esta tecnología vendrían a ser principalmente el gremio de profesionales y técnicos agrimensores, el Registro de Información Catastral, las municipalidades de todo el país, investigadores, estudiantes y otros profesionales de ramas afines a la Geomática.

Con esto también se contribuye a aumentar los recursos con que se cuenta actualmente para la presentación de la cartografía, que se debe adjuntar al realizar levantamientos catastrales urbanos. Este estudio también puede ser de gran ayuda para las pequeñas municipalidades del país, ya que podrían aplicar la metodología propuesta para actualizar el catastro municipal urbano.

Se presentan resultados de costos, precisiones y tiempos logrados en la ejecución del levantamiento mediante VANT, para que se puedan dimensionar las ventajas y desventajas al utilizar este método.

1.6. Alcances

El alcance de este estudio se extiende hasta obtener estos comparativos y sacar conclusiones en cuanto a exactitudes obtenidas. Finalmente, se presentará alguna propuesta de modificación al reglamento vigente del Registro de Información Catastral. Se busca beneficiar a la comunidad de profesionales agrimensores para que tengan más herramientas en su quehacer catastral.

Debido a la limitante de personal calificado, no se estará realizando un catastro detallado, es decir, mediciones de aleros, retiros y volados de las casas; sin embargo, se pretende realizar el primer paso para que las autoridades municipales puedan seguir alimentando y mejorando el catastro de su cabecera municipal.

2. MARCO TEÓRICO

Con el nacimiento de la Ley del Registro de Información Catastral, Decreto 41-2005, inicia la regularización del catastro en Guatemala, con lo cual se garantiza la certeza jurídica de la tenencia de la tierra, que viene siendo uno de los principales problemas en las áreas rurales. Con esta ley se pretende resolver muchos problemas agrarios (Vásquez, 2017; López, 2013).

Mediante el presente estudio se identificarán las ventajas y desventajas al trabajar levantamientos catastrales urbanos mediante el uso de VANT y de esta manera también saber si se pueden obtener las exactitudes requeridas en la reglamentación vigente en Guatemala.

2.1. Breve historia de los VANT

Desde hace siglos se ha tenido la idea de imitar el vuelo de las aves, sin embargo, a menudo se relaciona la idea de VANT con los aviones militares, o con juguetes cada vez más sofisticados, hasta llegar hoy en día a ser parte común de la sociedad.

Uno de los primeros registros que se tiene memoria data de 1849, cuando por medio del ejército austriaco se volaron doscientos globos aerostáticos sin tripulación y se lanzaron bombas sobre la ciudad de Venecia. Luego de esto, en 1898, en Estados Unidos se usó una cometa equipada con una cámara, siendo esta una de las primeras fotos de reconocimiento aéreo (Barrientos y Gutiérrez, 2007).

Fue hasta 1898, cuando Nikola Tesla pudo controlar un barco a distancia mediante una señal de radio, lo que dio inicio al uso del control remoto y con ello el nacimiento de la robótica (Tesla Memorial Society, 2018; Jonnes, 2003).

En la Primera Guerra Mundial se desarrolló un sistema de lanzamiento de torpedos mediante una catapulta ubicada en aviones sin tripulación (Cuerno, *et al.* 2016).

En 1915 el Dr. Wilhelm von Siemens desarrolló el torpedo planeador, el cual fue el precursor de los actuales misiles crucero (Sollinger, 2010).

Después de 1945 decae el desarrollo de los VANT, y fue hasta 1955, con el surgimiento de la guerra de Vietnam, donde se construyeron aviones no tripulados para vigilancia, como el BGM-34A y el BGM-34B Firebee (Hastings, 2012).

Después de Vietnam, muchos de los avances tecnológicos fueron hechos por Israel, incluyendo el avión no tripulado "Pioneer", el cual sería utilizado en más de 300 misiones en el Golfo Pérsico, y en la década de los 90, en Haití y los Balcanes (Hastings, 2012; Barrientos *et al.* 2007).

Luego del surgimiento de los satélites artificiales, el desarrollo en ciencias de la tierra y la necesidad de incrementar el número de imágenes para elaboración de cartografía, se llega a los atentados del 11 de septiembre del 2001 en Nueva York, donde inician los vuelos de VANT armados. En el 2002, con las operaciones militares de la CIA, se utilizó por primera vez el dron "Predator", para eliminar a sus enemigos en Afganistán (Hastings, 2012).

A partir de entonces se ha desarrollado otro tipo de VANT para uso civil, tanto para fotografía, documentales, monitoreo de fauna, vigilancia de volcanes, control de emergencias, entre otros. Posteriormente, se ha empleado para fines cartográficos, investigación, salvamento y rescates, índices de vegetación, agricultura de precisión, entre otros.

2.2. Ventajas de los VANT

Según varias publicaciones existen ventajas y desventajas si se compara el uso de VANT para levantamientos cartográficos con la topografía convencional (Barrientos, Gutiérrez, 2007; García, 2015; Gallardo, 2007); se citan las siguientes ventajas:

- La seguridad del topógrafo: se evita que personal de campo se arriesgue a subir o bajar a lugares inestables, con fuertes pendientes, gases tóxicos, peligro de hundimientos o riesgos inherentes a la conflictividad de ciertas áreas pobladas.
- Se puede obtener una mayor cantidad de información de puntos medidos en un día de trabajo, pues el dron puede sobrevolar en poco tiempo, áreas relativamente mayores que los que podría cubrir mediante topografía.
- Se pueden lograr imágenes con alta resolución para diferenciar visualmente rasgos y atributos del material que se esté estudiando (basura, materiales, arena, pedrín, sal, entre otros).
- El tiempo de entrega de un estudio volumétrico se reduce considerablemente, ya que, si se cuenta con suficientes puntos de control

fotoidentificables, es más rápido repetir los vuelos en diferentes intervalos de tiempo.

2.3. Desventajas en el uso de VANT

De acuerdo con Puerta (2015), existen las siguientes desventajas con el uso de VANT:

- Áreas restringidas de vuelo, sobre todo cercano a los aeropuertos y algunos edificios gubernamentales.
- La altura máxima dependerá de la escala o detalle que se necesite, así como al alcance del radio control del equipo.
- La batería del aparato tiene duración temporal limitada entre el rango de 20 a 30 minutos, teniendo que hacer cambios de batería entre vuelos.

2.4. Aplicaciones profesionales de los VANT

Con el desarrollo de la tecnología, los vehículos aéreos no tripulados se han especializado cada vez más mediante cámaras con mayor resolución espacial, espectral y radiométrica; el tamaño de las aeronaves se ha reducido, las baterías tienen mayor duración y cuentan con mayor estabilidad y autonomía (Pardo Ibarra, 2016).

Uno de los mayores usos de los VANT es en el área de la fotogrametría aplicada, la cual puede ser fotogrametría terrestre y aérea. En la terrestre se emplean equipos de topografía de alta precisión GNSS RTK, los cuales posicionan en tiempo real; mientras un escáner láser capta una nube de puntos

que conformarán un modelo tridimensional de fachadas, edificios y objetos (Ribeiro, 2017).

En la fotogrametría aérea, se emplean VANT vinculados o georreferenciados a puntos de control previamente colocados en tierra, para luego procesar modelos tridimensionales, nubes de puntos, modelos digitales del terreno, entre otros. Con esto se pueden obtener volúmenes precisos de objetos, montículos, depósitos de materiales, y otros elementos de interés como rellenos sanitarios, pilas de arena, sal, piedrín, carbón, entre otros (Zelaya *et al.* 2016).

2.4.1. Usos más comunes de los VANT

- Filmaciones de videos para eventos y publicidad: debido al auge de la publicidad, se hace cada vez más frecuente la filmación de bodas, eventos y anuncios publicitarios mediante VANT, pues sus precios son cada vez más accesibles, y los videos son de mejor calidad.
- Cartografía: los topógrafos y profesionales de ciencias de la tierra, elaboran mapas digitales tanto en 2D como en 3D; para esto se necesita adquirir un VANT de regular capacidad, tanto en calidad de imagen como en precisión del GNSS incorporado. Si se utilizan puntos de control de alta precisión, software de fotogrametría y se siguen ciertas normas, se pueden obtener excelentes resultados (Soriano, 2017; García, 2015).
- Emergencias: en países desarrollados se está utilizando en emergencias, como incendios y áreas de rescate, tanto para visualizar la escena, como para llevar suministros médicos.

- Logística: la empresa Amazon incursionó en este campo, pero por problemas de reglamentación aérea en las ciudades, tuvo que desplazarse a las áreas rurales.
- Seguridad: la incorporación de cámaras térmicas ha permitido la vigilancia nocturna, sobre todo en áreas fronterizas en países como Israel y EEUU; sin embargo, el poco tiempo de autonomía de vuelo viene siendo un obstáculo (Ríos *et al.*, 2016).

2.4.2. Volumetría con VANT

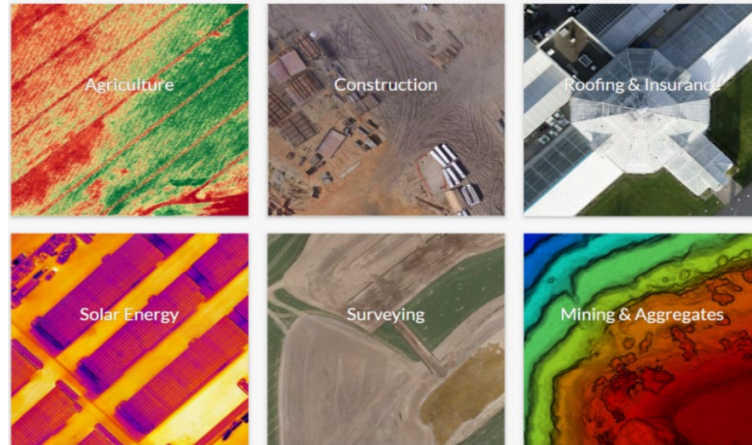
Se ha venido sustituyendo y complementando la topografía convencional para el cálculo de volúmenes en canteras, minas a cielo abierto, vertederos y patios de acopio, entre otros, ya que se han obtenido altas precisiones que no se obtenían anteriormente.

Debido al poco personal requerido, la reducción de tiempo de entrega y la baja exposición a sitios peligrosos, es que los VANT vienen a ser una valiosa herramienta para estos estudios (Rahman, 2017; Quispe, 2015).

La volumetría con VANT permite realizar las siguientes tareas:

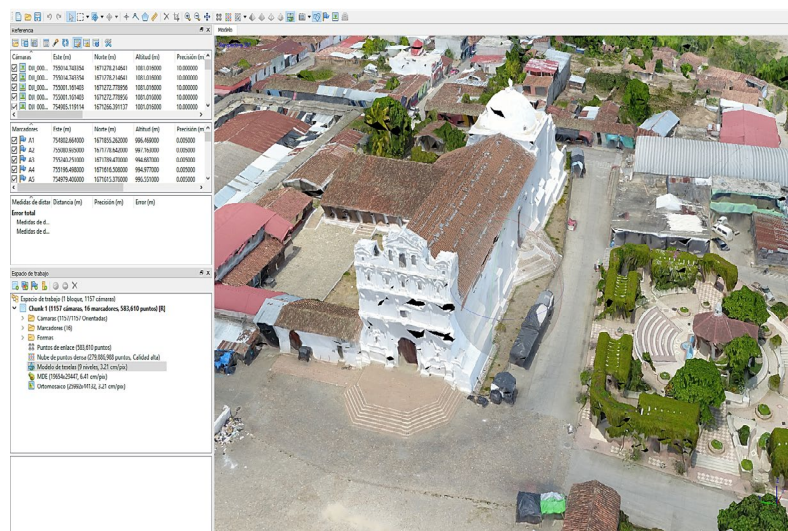
- Cálculo del volumen de material acumulado
- Mediciones periódicas para determinar diferencia de volúmenes
- Medición de áreas, perímetros y alturas relativas
- Control de existencias de material y auditorías a contratistas

Figura 10. **Utilidades del uso de VANT: agricultura, construcción, techados seguros, energía solar, topografía y minería**



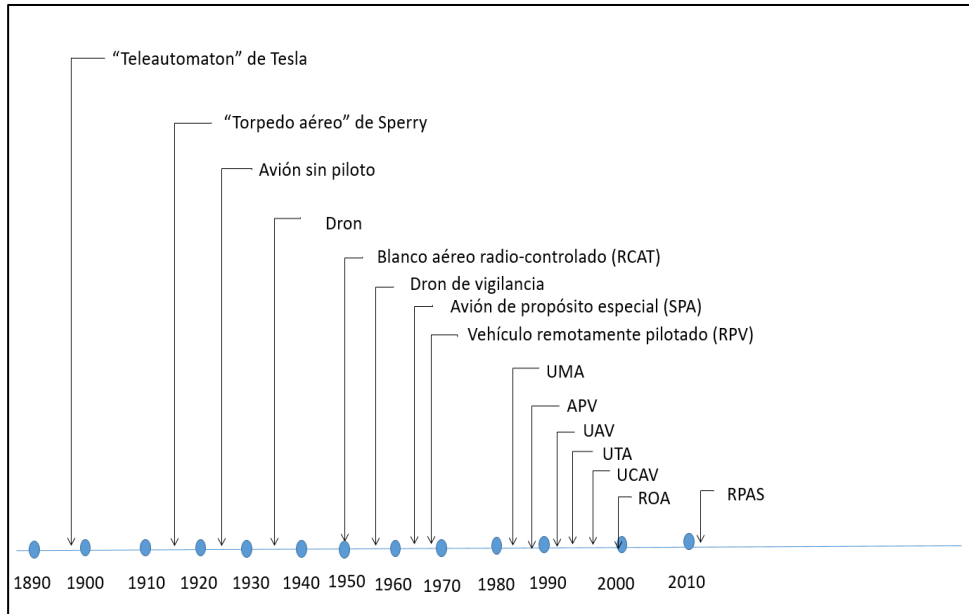
Fuente: Microdrones.com, case studies, 2016. Consultado el 27 de agosto 2018 Recuperado de <https://www.microdrones.com/en/content/drones-for-professional-use-the-basics/>

Figura 11. **Aplicación de cálculo de volúmenes derivados del uso de VANT**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Agisoft Photoscan.

Figura 12. **Nombres aplicados a los vehículos aéreos no tripulados, según el año**



Fuente: Castro, R. (2012). *Teledetección Aérea no Tripulada. Ventajas y aplicaciones*. Chile: CENIA. Consultado el 12 de septiembre de 2020. Recuperado de https://www.cenia.cl/documentos/docu50ed634f0e837_09012013_932am.pdf.

2.5. Fotogrametría

La palabra fotogrametría viene del griego: *photon* (luz), *graphos* (descripción) y *metron* (mediciones), o sea que son las medidas tomadas de las fotografías; "es la técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, posición y dimensión en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías" (Bonneval, 1972, p. 83).

Otra definición de fotogrametría se refiere al “arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante u otros fenómenos” (Sánchez, 2006, p. 42).

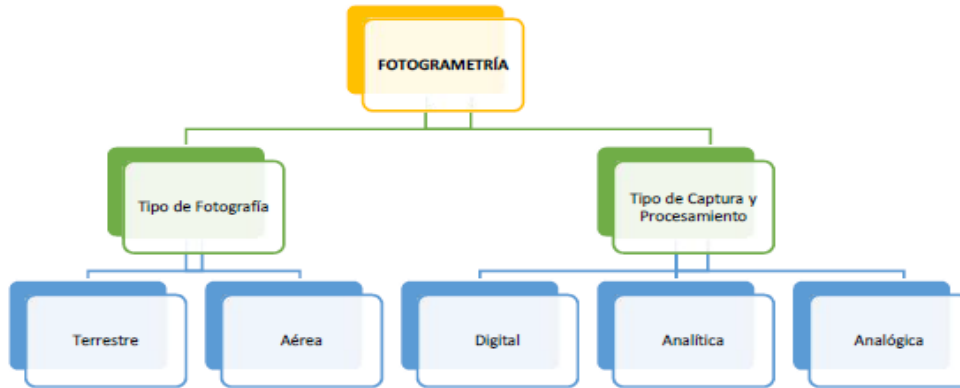
En la actualidad, de acuerdo con Llopis (2010) las técnicas empleadas en fotogrametría están íntimamente ligadas a los sensores remotos y a la fotointerpretación, ya que son complementarios entre sí, con el fin de establecer la dimensión, posición y características de cualquier figura, de tal manera que ahora es el principal insumo para generar cartografía temática en los sistemas de información geográfica (SIG), creando modelos tridimensionales a partir de imágenes en dos dimensiones.

Según lo señala Ricouz (2005), la fotogrametría utiliza la proyección ortogonal sobre un plano de referencia, partiendo del supuesto de una proyección central perfecta, es decir:

- Que los rayos de luz que atraviesan los lentes de la cámara no se desvían.
- Que la imagen es proyectada sobre una superficie absolutamente plana.
- Que existe el principio de colinealidad del objeto y su imagen.

Según Jáuregui (2010) la fotogrametría puede ser clasificada de acuerdo con el tipo de fotografía, captura y procesamiento, según se observa en la figura 13.

Figura 13. **Clasificación de la fotogrametría**



Fuente: Jáuregui, L. (2010). *Introducción a la fotogrametría*. Venezuela. Consultado el 12 de septiembre de 2020. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/272090105_Introduccion_a_la_Fotogrametria_y_Cartografia_aplicadas_a_la_Ingenieria_Civil.

2.6. Catastro

Puede definirse el catastro como un sistema integrado de bases de datos que reúne la información sobre el registro y propiedad del suelo junto con otras características ambientales, demográficas y socioeconómicas, convirtiéndose en una herramienta holística para la planificación a nivel local, regional y nacional (Erba, 2008).

Los orígenes del catastro se remontan hasta 3,000 años antes de Cristo, entre los fenicios, caldeos, egipcios y romanos con fines de recaudación de impuestos (Valladolid, 2002).

El objetivo debe ser llegar a tener un catastro territorial multifinalitario, “donde la información territorial y legal representada en forma gráfica y descriptiva, de todos los predios del territorio nacional, conformará el Centro

Nacional de Información Registro-Catastral, disponible para usos multifinalitarios” (Erba y Piumetto, 2016, p.102).

2.6.1. Breve historia del catastro en Guatemala

El Ministerio de Finanzas Públicas fue legalmente constituido a través del Decreto 106-71 del Congreso de la República de Guatemala, emitido el 8 de diciembre de 1971 (Lara, 2002).

Después de varios intentos por establecer un reordenamiento administrativo y de cobro de los impuestos, se crea el 28 de diciembre de 1978 la Dirección de Catastro y Avalúo de Bienes Inmuebles, como dependencia del Ministerio de Finanzas Públicas, para que asumiera la responsabilidad de elaborar el catastro nacional de las propiedades inmuebles, así como el mantenimiento del mismo (Erba, 2008).

En abril de 1997 se crea "la Comisión Institucional para el Desarrollo y Fortalecimiento de la Propiedad de la Tierra PROTIERRA, según Acuerdo Gubernativo 307-97, para la coordinación en el tema tierra” (Aylwin, 2002, p. 95).

En el 2005 se crea el Registro de Información Catastral como “entidad autónoma, y como autoridad competente para establecer, mantener y actualizar el Catastro Nacional de Guatemala” (Erba, 2008, p. 16).

Desde entonces, se tiene reglamentación específica para levantamientos catastrales, donde no está contemplado aún el uso de VANT.

A partir del 2015 comienzan a comercializarse los VANT con fines de fotografía y videos de alta resolución; los cuales, al tener integrado un sistema GNSS, logran el objetivo de planificar vuelos con precisiones del orden de los 10 metros. Esto los hace candidatos para lograr mayor precisión, si se logran asignar puntos de control geodésico a las fotografías.

Según la Ley del Registro de Información Catastral “el catastro es un instrumento técnico de desarrollo con información disponible para múltiples fines. Es un registro básico, gráfico y descriptivo de tipo predial, orientado a la certeza y seguridad jurídica de la propiedad, tenencia y uso de la tierra” (Decreto 41-2005, p. 17). El catastro debe ser descriptivo, gráfico, de acceso público y que se pueda actualizar (López, 2011).

2.6.2. Finalidad del catastro

De acuerdo con López (2013) algunas finalidades del catastro son:

- Obtener información completa sobre las diferentes propiedades inmuebles de un país.
- Censar las propiedades del Estado y de particulares.
- Tener información sobre los propietarios y predios colindantes.
- Avalúo de terreno y de las construcciones por cada predio.
- Estadísticas de fincas, predios y mejoras.
- Obtener el listado de propietarios.
- Materiales utilizados en las construcciones.
- Conocer el alcance de los servicios públicos de la zona.
- Tipificación de construcciones y vías.
- Frecuencia con que se está construyendo en un municipio.
- Proporcionar certeza jurídica.

- Brindar ayuda para resolver conflictos inmobiliarios.
- Que sea un instrumento para el desarrollo del área rural.
- Ordenamiento territorial.
- Inventario de recursos naturales.
- Contribuir para hacer transparente la negociación de tierras.

2.6.3. Generalidades del Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales del Registro de Información Catastral (RIC)

El Registro de Información Catastral (RIC) ha elaborado el documento denominado Norma Técnica Catastral, cuyo objetivo es estandarizar el proceso de levantamiento catastral y que a la vez sirva como una herramienta de control de calidad (Ley del Registro de Información Catastral, 2005).

Según el Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales “la cartografía catastral del RIC, en su totalidad y las fracciones que se utilicen en cualquier medio impreso o almacenamiento digital serán representadas utilizando la proyección GTM, conforme a lo definido por el Instituto Geográfico Nacional” (Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales, 2008, p. 3). Un resumen se muestra en la tabla III.

2.6.3.1. Tolerancias, según el actual reglamento

Según el reglamento actual, en el tema correspondiente a la tolerancia de los geoposicionamientos en terrenos de carácter rural: el geoposicionamiento final de los predios se considera efectivo si la coordenada determinada está dentro de un metro de su valor más probable.

En relación con la tolerancia de los geoposicionamientos en terrenos urbanos, en el manual se confirma que “el geoposicionamiento final de los predios se considera efectivo si la coordenada determinada está dentro de los 0.30 metros de su valor más probable” (Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales del RIC, 2008).

Tabla III. **Parámetros geodésicos para Guatemala**

Parámetros geodésicos para Guatemala	
Sistema de referencia geodésico	WGS84 aumentado basado en ITRF94 época 1997.5
Semieje mayor	6378137.0 metros
Semieje menor	6356752.3142 metros
Achatamiento (1/f)	298.2572236
Proyección oficial GTM (Guatemala <i>Transversa de Mercator</i>)	
Proyección	Transversa de mercator (tipo Gauss Kruger) en una zona única local
Elipsoide	WGS84
Longitud de origen	-90° 30' (meridiano central de proyección)
Latitud de origen	0° (el Ecuador)
Unidades	Metros
Falso norte	0 metros
Falso este	500,000 metros en el meridiano central
Factor de escala en el meridiano central	0,9998
Numeración de las zonas	No está dentro de la numeración normal de zonas UTM (15.5)

Fuente: Instituto Geográfico Nacional (1999). *Resolución Normativa IGN-01/99*. Consultado el 18 de septiembre de 2020. Recuperado de <http://ignguatemala.weebly.com/guatemala-transversa.html#:~:text=RESOLUCION%20NORMATIVA%20IGN%2D01%2F99,ELIPSOIDE%3A%20WGS84>.

2.6.4. Ciencias y disciplinas auxiliares del catastro

El catastro requiere apoyarse de varias disciplinas de la Geomática:

2.6.4.1. Geodesia

Ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Etimológicamente la palabra geodesia viene del griego γεωδαισία (geodaisia = división de la tierra), significa la medida de las dimensiones de la Tierra. En su acepción moderna también engloba el estudio del campo de gravedad.

“Ciencia que estudia los procedimientos matemáticos a través de los cuales se representará una fracción terrestre, pasando de una superficie esférica en 3 dimensiones a su representación en un mapa de 2 dimensiones” (Sevilla, 1999, p. 186).

2.6.4.2. Topografía

La topografía “es el conjunto de métodos e instrumentos necesarios para representar el terreno con todos sus detalles naturales o artificiales, en superficies de extensión limitada, de manera que sea posible prescindir de la esfericidad terrestre sin cometer errores apreciables” (Sánchez y Gallego, 2013, p. 174).

2.6.4.3. Geografía

Etimológicamente, Geografía quiere decir: descripción de la Tierra. Por tanto, “es la ciencia que estudia los hechos y los fenómenos físicos, biológicos y humanos, considerados en su distribución sobre la superficie de la Tierra, así

como la investigación de las causas que los producen y sus relaciones mutuas”. (Salinas y Luna, 2006, 117).

2.6.4.4. Cartografía

Es la ciencia que “se encarga de representar en un mapa una parte o la totalidad de la superficie terrestre, a través del sistema de proyección más adecuado” (Callejo y Llopis, 1991, p. 64).

2.6.4.5. Fotogrametría

Se refiere al “arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna y precisa de objetos físicos y su entorno por medio de procesos de registro, medida e interpretación de imágenes y modelos fotográficos, durante el levantamiento de predios catastrales de forma indirecta” (Vela y Ospina, 2013, p. 58).

2.6.4.6. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica SIG es un marco para recopilar, gestionar y analizar datos. Tiene sus orígenes en la ciencia de la geografía. Analiza la ubicación espacial y organiza capas de información en visualizaciones, utilizando mapas y escenas en 3D. Con esta capacidad única, SIG revela “conocimientos más profundos sobre los datos, como patrones, relaciones y situaciones; lo que ayuda a los usuarios a tomar decisiones más inteligentes” (Sarmiento y Montoya, 2015, p. 98).

Además de las ciencias mencionadas, también se tiene el Derecho, las Ciencias Económicas y la Valuación de Propiedades (Erba, 2008).

2.6.5. Restitución catastral utilizando VANT

La cartografía producida mediante vehículos aéreos no tripulados y utilizando métodos fotogramétricos; puede ser utilizada para el catastro a escalas 1: 5,000 hasta 1: 1,000, e incluso mayores, ya que es posible realizar alturas de vuelo cercanas al terreno. Se puede combinar el trabajo topográfico terrestre, con la restitución fotogramétrica (Fernández, 2010). En el presente trabajo se pretende desarrollar una restitución a escala 1:1,000 en una localidad urbana de una población al norte de Guatemala, a través de la cual se obtendrán mapas catastrales urbanos mediante el empleo de VANT.

2.7. Equipo utilizado

Entre los equipos a utilizar en este trabajo están: estación total, georreceptor GNSS, VANT y accesorios.

2.7.1. VANT o drones

La zona levantada comprenderá un área cercana a las 76 hectáreas. En la captura de imágenes mediante VANT DJI Mavic Pro se utilizarán los parámetros que se detallan a continuación:

- Recubrimiento longitudinal: 80 %
- Recubrimiento lateral: 80 %
- Altura de vuelo promedio: 100 m
- Tamaño de la imagen: 12 megapíxeles

- Resolución del pixel en terreno (GSD): 0.032 m
- Software fotogramétrico: Agisoft Photoscan y Drone2Map
- SIG: ArcGIS 10.8
- Sistema GNSS: Spectra SP60

Tabla IV. **Características generales DJI Mavic Pro**

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Dimensiones del VANT doblado	H83 mm x W83 mm x L198 mm
Dimensión del VANT en diagonal sin incluir las hélices	335 mm
Peso del VANT con batería, hélices y protector de Gimbal	1.64 lbs (743 g)
Peso del VANT con batería, hélices y sin protector de Gimbal	1.62 lbs (734 g)
Velocidad máxima de ascenso	5 m/s en modo sport
Velocidad máxima de descenso	3 m/s
Velocidad máxima en modo <i>sport</i> sin viento	65 kph
Altura máxima de vuelo sobre el nivel del mar	5000 m
Tiempo máximo de vuelo sin viento y volando a velocidad constante de 25 km/h	27 minutos
Tiempo máximo de vuelo en un solo punto estático con viento	24 minutos
Distancia máxima de vuelo	13 km
Temperatura de operación	0° a 40 °C
Sistema GNSS	GPS y GLONASS

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Equipos utilizados: Mavic Pro, SP60 y Focus2



Fuente: Spectra Precisión. (2016). *DJI.com y Spectra Geoespacial*. Consultado el 18 de noviembre de 2020. Recuperado de https://spectrageospacial.com/wp-content/uploads/SP60_UG_es_C.pdf.

2.7.2. GNSS

Las especificaciones del receptor GNSS Spectra SP60 (tomado del manual Spectra SP60), se dan a conocer en la tabla siguiente:

Tabla V. Especificaciones del receptor GNSS Spectra SP60

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Canales	240
GPS	L1C/A, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L1C
GLONASS	L1C/A, L2C/A, L1P, L2P
QZSS	L1C/A, L2C, L1Z, L1C
BeiDou	B1, B2, B1C
Galileo	E1, E5B
SBAS	L1C/A
L-band	MSS
Precisión horizontal estático y estático rápido	3 mm+ 0.5 ppm
Precisión vertical	5 mm + 0.5 ppm

Fuente: elaboración propia.

2.7.3. Estación total

A continuación, se describen todas las características de la estación *spectra focus 2*.

Tabla VI. **Especificaciones de la estación total *Spectra Focus 2***

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Medición de distancias con prisma	Desde 2.5 m hasta 4.000 m
Medición de distancias sin prisma	1 m hasta 500 m
Precisiones con prisma	+-(2+2 ppm x D) mm
Precisiones sin prisma	+-(3+2 ppm x D) mm
Ampliación de telescopio 30X	Campo de visión 1°30'
Distancia mínima de enfoque	1.0 m
Puntero láser	Sí
Memoria aproximada	10,000 puntos
<i>Interface standard</i> puerto RS232, tarjeta SD, conector mini USB	Sí
Formato de datos	ASCII (DXF/GSI opcional)

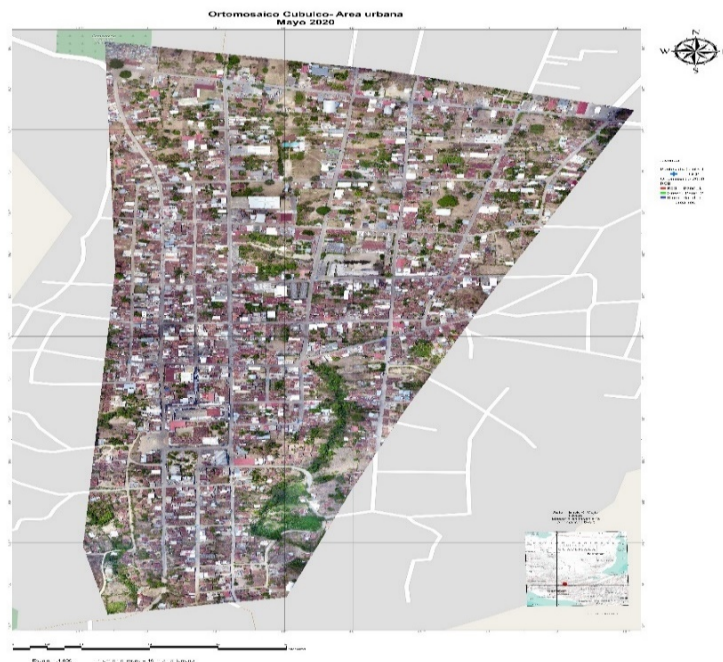
Fuente: elaboración propia.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Generación del ortomosaico

Después de realizar los procesos de campo y oficina descritos en el capítulo correspondiente al resumen del marco metodológico, se logró generar el ortomosaico final de la figura 15, que servirá de base para la realización de levantamientos catastrales urbanos escala 1: 1,000, en el municipio de Cubulco, Baja Verapaz.

Figura 15. **Ortomosaico urbano de la población de Cubulco, Baja Verapaz**



Fuente: elaboración propia, empleando software ArcGIS Pro.

3.2. Procedimientos para levantamientos catastrales mediante VANT

Este es uno de los objetivos del presente trabajo de investigación, la descripción de los procedimientos para levantamientos catastrales utilizando vehículos aéreos no tripulados. En el marco metodológico todo el proceso, el cual se resume en la figura 1. Puede apreciarse con mayor detalle en el apéndice 3. Un resumen de elementos que se deben tomar en cuenta para realizar levantamientos catastrales urbanos utilizando vehículos aéreos no tripulados, se puede ver en la tabla VII.

Tabla VII. **Elementos a considerar en levantamientos catastrales mediante VANT**

Elemento	Descripción
Permisos	PNC, municipalidad
Dianas, pintura clavos de acero, herramientas	Para monumentación y marcación de GCP
2 receptores GNSS	Para el geoposicionamiento de los GCP
2 trípodes o 2 bastones y 2 bípodes	Para el geoposicionamiento de los GCP
VANT DJI Mavic Pro cámara FC220 Distancia focal 4,73 mm Resolución 4000 x 3000 pixeles Pixel 1,57x1,57 micras	Para los vuelos fotogramétricos
Estación total y cinta métrica	Para realizar comprobaciones de campo
Laptop Asus X64 Intel i7 de 32 GB de RAM y tarjeta de Video Nvidia de 1GB	4 procesadores principales y 8 procesadores lógicos
Software Spectra Survey Office	Para procesamiento de datos GNSS
Software Agisoft Photoscan	Para procesar las imágenes y obtener el ortomosaico

Continuación de la tabla VII.

Software ArcGIS Pro	Para obtener el mapa escala 1:1000
Personal de apoyo	2 personas en total

Fuente: elaboración propia.

Una vez procesadas todas las líneas base de los puntos de control terrestre GCP, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla VIII, donde se pueden ver en las primeras columnas y las coordenadas en el elipsoide WGS84 (latitud, longitud y altura elipsoidal); luego las coordenadas en la proyección UTM zona 15, norte (este, norte) y, por último, las coordenadas en la proyección GTM (este, norte y elevación). En las coordenadas proyectadas, la elevación se basa en el modelo geoidal EGM96 global.

Al procesar las imágenes obtenidas de los vuelos fotogramétricos, referenciar los GCP y hacer los ajustes necesarios, el software Agisoft Photoscan muestra los errores obtenidos, según la tabla IX, donde se observan errores en este, norte y elevación, así como un error total tridimensional y los errores en píxeles.

Para obtener los errores de los puntos de control terrestre GCP, respecto de su posición en el ortomosaico, se aplican las siguientes fórmulas:

$$dh = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \pm 10.52 \text{ cm} = \text{error horizontal obtenido}$$

$$dt = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} = \pm 22.12 \text{ cm} = \text{error total (tridimensional)}$$

Tabla VIII. **Cuadro de coordenadas de los puntos de control terrestre GCP**

PUNTOS DE CONTROL												
DATUM WGS84												
Punto	Latitud N			Longitud W			Altura Elips. (m)	UTM15N-WGS84		GTM		Elevación MSL (m)
	gra	min	seg	gra	min	seg		Este	Norte	Este	Norte	
A1	15	6	35.609	90	37	45.410	999.447	754802.658	1671855.208	486105.696	1670818.834	996.466
A2	15	6	33.019	90	37	36.123	997.160	755080.929	1671778.588	486382.910	1670739.101	997.160
A3	15	6	33.315	90	37	30.786	994.684	755240.245	1671789.416	486542.243	1670748.110	994.684
A4	15	6	27.706	90	37	32.313	997.959	755196.492	1671616.453	486496.552	1670575.761	994.973
A5	15	6	27.746	90	37	39.581	999.536	754979.400	1671615.322	486279.592	1670577.098	996.547
A6	15	6	27.480	90	37	49.506	1008.089	754683.019	1671603.968	485983.279	1670569.122	1005.097
A7	15	6	19.536	90	37	49.284	1003.402	754692.282	1671359.784	485989.759	1670324.995	1000.402
A8	15	6	20.047	90	37	40.672	1000.016	754949.368	1671378.267	486246.885	1670340.543	997.020
A9	15	6	20.094	90	37	34.215	1001.239	755142.223	1671381.795	486439.651	1670341.876	998.244
A10	15	6	15.198	90	37	37.400	997.767	755048.708	1671230.224	486344.475	1670191.469	994.767
A11	15	6	11.937	90	37	43.112	998.247	754879.161	1671128.122	486173.881	1670091.362	995.241
A12	15	6	13.396	90	37	49.885	1001.236	754676.378	1671170.793	485971.717	1670136.310	998.230
A13	15	6	7.369	90	37	48.930	999.852	754706.891	1670985.786	486000.107	1669951.080	999.852
A14	15	6	8.701	90	37	41.587	997.814	754925.785	1671029.132	486219.348	1669991.908	994.805
A15	15	6	0.469	90	37	46.583	989.904	754779.280	1670774.391	486070.045	1669739.002	989.904
CUBULCO1	15	6	34.304	90	37	20.516	998.548	755546.681	1671823.121	486848.857	1670778.308	995.573

Fuente: elaboración propia mediante software Survey Office. Elevación MSL, según modelo geoidal EGM96 global.

Tabla IX. **Errores de los puntos de control terrestre GCP**

Nombre	Error este(cm)	Error norte (cm)	Error elevación (cm)	Total (cm)	Imagen (pixeles)
A1	6.08053	-8.07938	-11.1116	15.0239	0.870
A2	-0.296195	0.916255	23.5272	23.5469	0.847
A3	4.16409	-5.328	-10.1018	12.1562	0.926
A4	3.86064	3.49432	-5.22733	7.37833	0.638
A5	2.8236	3.05749	-26.217	26.5453	1.366
A6	-24.2095	-1.85609	31.3063	39.6185	1.243
A7	-7.69614	-3.93195	0.193654	8.64455	1.161
A8	-9.5888	2.39429	-3.76724	10.5769	3.128

Continuación de la tabla IX.

A9	2.96001	1.26757	17.913	18.2002	0.852
A10	0.487422	8.84239	-11.1756	14.259	0.810
A11	-0.621579	4.25238	-3.76348	5.71252	1.224
A12	-0.637057	4.02476	-23.9021	24.247	1.282
A13	-18.0418	9.60496	38.9877	44.0205	1.459
A14	7.83105	-3.70034	16.9445	19.0299	0.966
A15	9.35764	1.0512	-18.7348	20.9682	0.972
Total	9.30499	4.91141	19.4549	22.1178	1.486

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Como método para comparar la consistencia geométrica predial, mediante ortofotos, se procedió a:

- Ubicar 9 áreas cercanas a algunos GCP
- Localizar elementos visibles en las imágenes
- Tomar medidas de las distancias (en el terreno y en la ortofoto).

Todo el proceso del método utilizado se presenta en la siguiente figura.

Figura 16. **Comprobación de campo**



Fuente: elaboración propia, empleando GCP A08.

De estas 55 mediciones se puede ver un resumen de las diferencias máximas obtenidas en la siguiente tabla.

Tabla X. **Resumen de comprobación de campo en las 9 áreas del estudio**

Punto comprobación	Diferencia máxima (m)
A14	0.10
A13	0.09
A1	0.07
A3	0.07
A11	0.06
A4	0.04
A15	0.04
A7	0.03
A8	0.03

Fuente: elaboración propia.

Desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad S = \pm 0.032 \text{ m}$$

De la tabla X también se ve que la diferencia máxima obtenida al medir una distancia en el terreno y su correspondiente en el ortomosaico, fue de 10 cm.

3.3. Precisión de los vectores GNSS

Mediante el software Survey Office, se procesaron 15 vectores para obtener coordenadas de los GCP, los cuales se muestran en la tabla XI.

Los promedios de las precisiones horizontales fueron de ± 0.009 m y las precisiones verticales de ± 0.017 m.

Tabla IXI. **Resultado del procesamiento de líneas base GNSS**

Observación	Desde	Hacia	Tipo de solución	Prec. horiz. (m)	Prec. vert. (m)	Azimet geodesico	Dist. elipsoidal (m)	Diferencia elevación (m)
CUBULCO1 -- - A12 (B1)	CUBULCO1	A12	Fixed	0.013	0.017	233°46'00.98"	1087.200	2.689
CUBULCO1 -- - A7 (B2)	CUBULCO1	A7	Fixed	0.017	0.028	242°08'57.27"	971.553	4.855
CUBULCO1 -- - A8 (B3)	CUBULCO1	A8	Fixed	0.007	0.014	233°56'34.08"	744.465	1.469
CUBULCO1 -- - A9 (B4)	CUBULCO1	A9	Fixed	0.007	0.017	223°07'26.80"	598.385	2.691
CUBULCO1 -- - A4 (B5)	CUBULCO1	A4	Fixed	0.008	0.016	240°04'21.54"	406.460	-0.589
CUBULCO1 -- - A5 (B6)	CUBULCO1	A5	Fixed	0.010	0.017	250°30'06.88"	603.898	0.988

Continuación de la tabla XI.

CUBULCO1 -- - A6 (B7)	CUBULCO1	A6	Fixed	0.011	0.023	256°22'54.69"	890.673	9.541
CUBULCO1 -- - A1 (B8)	CUBULCO1	A1	Fixed	0.010	0.022	273°05'22.20"	744.413	0.900
CUBULCO1 -- - A2 (B9)	CUBULCO1	A2	Fixed	0.007	0.014	265°09'30.04"	467.686	1.594
CUBULCO1 -- - A3 (B10)	CUBULCO1	A3	Fixed	0.007	0.015	264°20'35.79"	308.159	-0.884
CUBULCO1 -- - A15 (B11)	CUBULCO1	A15	Fixed	0.010	0.016	216°48'52.04"	1298.988	-5.625
CUBULCO1 -- - A13 (B12)	CUBULCO1	A13	Fixed	0.004	0.007	225°42'13.81"	1185.428	4.317
CUBULCO1 -- - A14 (B13)	CUBULCO1	A14	Fixed	0.005	0.008	218°38'42.84"	1007.525	-0.734
CUBULCO1 -- - A11 (B14)	CUBULCO1	A11	Fixed	0.008	0.015	224°27'52.53"	963.252	-0.300
CUBULCO1 -- - A10 (B15)	CUBULCO1	A10	Fixed	0.012	0.024	220°38'48.63"	773.962	-0.780

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.4. Comprobación de mediciones a frentes de casas

Se midieron las coordenadas de los frentes de 15 propiedades distribuidas por toda el área, utilizando estación total y cinta métrica y se compararon con las distancias digitalizadas del ortomosaico, según muestra la tabla XII.

Tabla XII. Mediciones con estación total a frente de casas

GCP	Punto	ESTACIÓN TOTAL		ORTOFO		
		Este	Norte	Metros Dist. coordenadas	TO Dist. ortofoto	Metros Diferencia
A1	1	486100.34	1670817.92	7.59	7.59	0.00
	2	486107.80	1670816.50			
A2	1	486387.64	1670754.10	17.61	17.60	-0.01

Continuación de la tabla XII.

A3	2	486386.63	1670736.52			
	1	486577.86	1670744.54	18.01	17.96	-0.05
A4	2	486595.68	1670741.92			
	1	486484.99	1670581.13	12.28	12.29	0.01
A5	2	486497.27	1670581.11			
	1	486331.70	1670581.23	10.00	10.08	0.08
A6	2	486341.70	1670581.30			
	1	485987.40	1670560.99	4.54	4.51	-0.03
A7	2	485987.15	1670556.46			
	1	485999.54	1670322.96	15.68	15.81	0.13
A8	2	486015.21	1670322.44			
	1	486260.85	1670344.15	10.84	10.89	0.05
A9	2	486271.69	1670344.13			
	1	486441.42	1670341.73	19.77	19.73	-0.04
A10	2	486461.19	1670342.01			
	1	486330.21	1670184.57	19.59	19.47	-0.12
A11	2	486348.54	1670191.47			
	1	486170.94	1670097.63	16.94	16.98	0.04
A12	2	486170.92	1670080.69			
	1	485971.14	1670142.17	15.42	15.35	-0.07
A13	2	485969.81	1670126.81			
	1	486030.34	1669967.16	29.70	29.86	0.16
A14	2	486030.66	1669937.46			
	1	486212.62	1669984.77	9.48	9.48	0.00
A15	2	486222.10	1669984.63			
	1	486047.74	1669743.18	8.76	8.81	0.05
	2	486056.50	1669743.22			

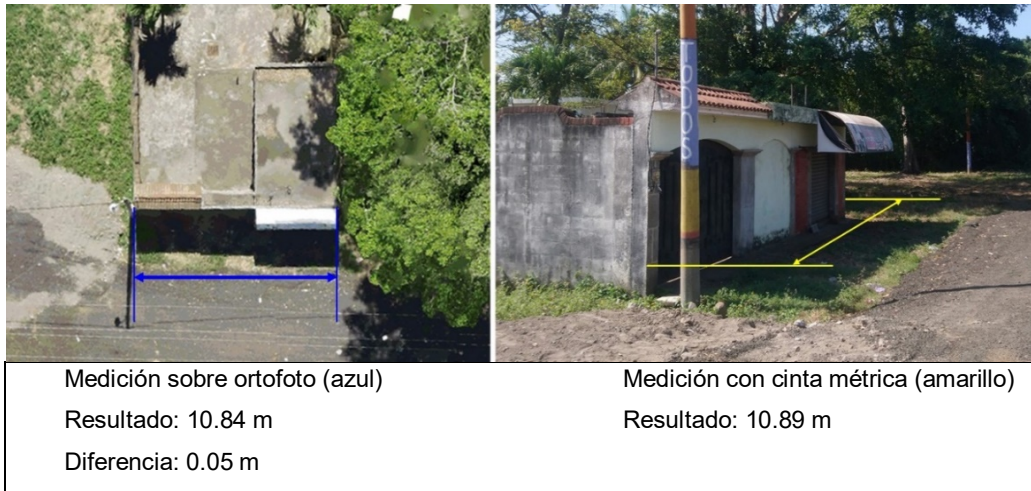
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Promedio 0.01 m

Diferencia máxima 0.16 m

Desviación estándar 0.07 m

Figura 17. **Comprobación de medición al frente de una casa**



Fuente: [Fotografía de Erick Mejía]. (Cubulco, Baja Verapaz. 2020). Colección particular.
Guatemala.

3.5. Comparaciones según el estándar nacional de Estados Unidos para la exactitud de datos espaciales (NSSDA)

Utilizando los modelos de la National Standard for Spatial Data Accuracy NSSDA, se compararon las coordenadas medidas desde el ortomosaico, de los puntos de control terrestre GCP y las coordenadas topográficas de los mismos puntos, con lo cual se obtienen los resultados de la tabla XIII.

3.5.1. Parámetros mínimos para cumplir con la hipótesis

Los parámetros mínimos que se utilizaron en el estudio fueron los siguientes:

- Resolución de cámara: 4,000x3,000 pixeles
- Distancia focal: 4.73 mm

- Altura de vuelo: 100 m
- GSD: 3.2 cm/px
- Horario para realizar el vuelo: entre las 11:30 am y 1:30 pm
- Clima: cielo despejado y velocidad del viento inferior a 10 km/h
- Traslape: transversal y longitudinal 80 %
- Tamaño de las dianas o cruces de los GCP: 0.45 m x 0.45 m
- Equipo GNSS: L1/L2 (sesiones de 20 minutos mínimo)
- Distancias de los vectores GNSS: máximo 5 kilómetros

Tabla XIII. **Errores obtenidos al comparar el ortomosaico con los puntos de control GCP**

Point ID	Valores derivados de la ortofoto			Valores topograficos de los GCP			Residuales (Errores)		
	Este (E)	Norte (N)	Elevacion (H)	Este (E)	Norte (N)	Elevacion (H)	Δx Este (E)	Δy Norte (N)	Δz Elevacion (H)
	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros
A1	486105.730	1670818.780	996.350	486105.696	1670818.834	996.466	-0.034	0.054	0.116
A2	486382.870	1670739.120	997.360	486382.910	1670739.101	997.160	0.040	-0.019	-0.200
A3	486542.260	1670748.070	994.570	486542.243	1670748.110	994.684	-0.017	0.040	0.114
A4	486496.620	1670575.750	994.950	486496.552	1670575.761	994.973	-0.068	0.011	0.023
A5	486279.560	1670577.120	996.220	486279.592	1670577.098	996.547	0.032	-0.022	0.327
A6	485983.060	1670569.100	1005.430	485983.279	1670569.122	1005.097	0.219	0.022	-0.333
A7	485989.700	1670324.980	1000.410	485989.759	1670324.995	1000.402	0.059	0.015	-0.008
A8	486246.850	1670340.580	997.006	486246.885	1670340.543	997.020	0.035	-0.037	0.014
A9	486439.720	1670341.890	998.420	486439.651	1670341.876	998.244	-0.069	-0.014	-0.176
A10	486344.510	1670191.520	994.630	486344.475	1670191.469	994.767	-0.035	-0.051	0.137
A11	486173.920	1670091.410	995.190	486173.881	1670091.362	995.241	-0.039	-0.048	0.051
A12	485971.720	1670136.380	998.000	485971.717	1670136.310	998.230	-0.003	-0.070	0.230
A13	485999.970	1669951.180	1000.280	486000.107	1669951.080	999.852	0.137	-0.100	-0.428
A14	486219.430	1669991.850	995.040	486219.348	1669991.908	994.805	-0.082	0.058	-0.235
A15	486070.190	1669739.020	989.700	486070.045	1669739.002	989.904	-0.145	-0.018	0.204
Numero de check points							15	15	15
Error medio (m)							0.002	-0.012	-0.011
desviación estándar (m)							0.091	0.046	0.219
RMSE (m)							0.088	0.046	0.211
RMSEr (m)							0.099	RAIZ(RMSE ^{x2} + RMSE ^{y2})	
NSSDA exactitud Horizontal (ACC _r) al 95% nivel de confianza							0.172	=RMSEr × 1.7308	
NSSDA exactitud Vertical (ACC _z) al 95% nivel confianza							0.414	=RMSEz × 1.9600	
RMSE	error medio cuadrático								
RMSEr	error medio cuadrático horizontal								
NSSDA	National standard for spatial data accuracy								

Fuente: elaboración propia, mediante modelo de la NSSDA.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Después de haber analizado los resultados del presente estudio surgieron las siguientes interpretaciones y análisis:

- El ortomosaico resultante es preciso en su posición geográfica, es decir, está correctamente georreferenciado, como puede observarse en la figura 9, en cumplimiento con el primer aspecto básico de calidad de una ortofoto, como se establece en la norma ISO 19113.
- Los resultados de la tabla XI muestran precisiones horizontales de los vectores de los GCP entre 0.04 m y 0.017 m; lo que significa una buena calidad del geoposicionamiento estático, debido a la planificación previa al levantamiento (*GNSS Planning*), líneas base menores a 5 km, y al uso de georreceptores de doble frecuencia.
- De la tabla IX se deduce que el error total de los 15 puntos de control terrestre GCP es de ± 10.52 cm horizontal y de ± 22.12 cm tridimensional; lo cual demuestra que el amarre horizontal y vertical derivado del proceso fotogramétrico es confiable.
- Se midieron 55 distancias alrededor del estudio y se obtuvieron diferencias máximas del orden de los 10 cm. Es decir, si se toma cualquier elemento visible desde el ortomosaico, pueden esperarse estos errores máximos.

- Al comparar coordenadas en el ortomosaico versus coordenadas topográficas, y utilizando los estándares de la NSSDA de los Estados Unidos, se obtienen resultados aceptables, según la tabla XIII, donde se tienen errores medios cuadráticos en el este de ± 0.09 m; en el norte de ± 0.05 m y en elevación de ± 0.21 m; se obtuvo una exactitud horizontal al 95 % de nivel de confianza de ± 0.17 m.

Se analizaron los aspectos básicos de calidad de una ortofoto, según la norma ISO 19113 (Normas sobre la calidad en información geográfica), donde intervienen cinco componentes:

- La precisión en la posición: ya discutida en los párrafos anteriores.
- La precisión temática: esta se cumple, porque el ortomosaico corresponde con la realidad del terreno.
- Completitud: el ortomosaico resultante sí cubre el área de estudio.
- Consistencia lógica: el ortomosaico carece de errores radiométricos (traslapes, pixeles en blanco, franjas de colores, entre otros).
- Precisión temporal: el producto obtenido puede tener una validez de 2 años sin sufrir variaciones significativas, en poblados como el del estudio, ya que el desarrollo urbano crece a un ritmo relativamente lento.

Al pasar las pruebas anteriores como comprobación final, se procedió a realizar mediciones con estación total y cinta métrica, de los frentes de 15 predios en estudio; se tomaron coordenadas en campo y sus respectivos elementos en el ortomosaico. Los resultados se presentan en la tabla XII, que muestra errores máximos de 16 cm y una desviación estándar de 7 cm. Puede afirmarse que el error máximo al medir el frente de un predio está por debajo de la tolerancia establecida. Se notó que la mayoría de los frentes de las propiedades cuentan con obstrucciones que dificultan visualizar desde la fotografía aérea.

CONCLUSIONES

1. Con base en los resultados de este estudio, donde se aplicaron tecnologías modernas de geoposicionamiento y fotogrametría aplicada, pudo comprobarse que es posible incluir el método fotogramétrico descrito, para apoyar con levantamientos catastrales mediante VANT en Guatemala.
2. Se realizaron las comprobaciones de campo en diferentes sectores del polígono de estudio y se confirma que existe una consistencia geométrica de los predios urbanos, a través de las ortofotos producidas a partir de un vuelo con VANT. Esta consistencia tiene que ver con la integridad de la ortofoto, como imagen altamente representativa del terreno, y también al hecho de que las líneas visibles de los predios digitalizadas sobre la ortofoto, dan valores de medida que no sobrepasaron los 0.07 m de error medio cuadrático, al compararlos con los obtenidos en campo por métodos directos.
3. La hipótesis se basó en demostrar que es posible cumplir con la tolerancia que establece la norma técnica catastral del RIC, donde se requiere que la coordenada determinada esté dentro de 0.30 m de su valor más probable. En las comprobaciones de distancias medidas en campo se obtuvieron diferencias del orden de los ± 3.2 centímetros, mientras que en las posiciones de los puntos de control versus las imágenes georrectificadas, se apreciaron ± 10.52 centímetros de diferencia. También al medir 15 frentes de predios distribuidos en todo el polígono de estudio, se encontraron diferencias máximas de 16 cm y una desviación

estándar de 7 cm; por lo que se concluye que estas diferencias son inferiores a los 30 centímetros que establece la normativa del RIC.

4. Se puede concluir que el ortomosaico obtenido es de gran apoyo en los levantamientos catastrales urbanos; sin embargo, no sustituye el trabajo topográfico de campo para medir los voladizos de los techos de lámina y teja, donde no se puede distinguir en la foto; así como en los interiores de los predios, donde existen árboles o techados.

5. Se desarrolló un diagrama de flujo que identifica la metodología mínima para generar ortofotos utilizables en catastro urbano (figura 1), el cual dio como resultado una precisión horizontal de 0.07 m en los predios muestreados. Según la Guía de supervisión y control de calidad para levantamiento catastral del RIC, se hizo una evaluación de los esquineros en 15 predios y se obtuvo un error sigma NE de ± 0.05 m mediante la

fórmula $\sigma_{NE} = \pm \sqrt{\frac{r_s}{n-1}}$.

RECOMENDACIONES

1. El Registro de Información Catastral debe considerar reformas en su normativa técnica, a modo de incluir la posibilidad de hacer levantamiento catastral con ortofotos obtenidas de vuelos con VANT, en virtud de que la normativa actual no es específica en tal aspecto.
2. Se recomienda a la municipalidad de Cubulco, Baja Verapaz utilizar el ortomosaico generado, para proceder con la identificación y digitalización predial de acuerdo con sus propias normas técnicas, considerando que a la fecha esta zona aún no ha sido declarada zona en proceso catastral por parte del RIC.
3. Aplicar el análisis del presente estudio en zonas ya catastradas para comparar la precisión obtenida en el levantamiento catastral fotogramétrico con datos prediales validados.
4. Considerar en futuras investigaciones el impacto obtenido de aplicar la metodología del presente estudio sobre el tiempo y costo del levantamiento catastral urbano.
5. Ampliar los estudios posteriores al presente, hacia la evaluación del resultado obtenido con distintas alturas de vuelo, mayor o menor densidad de puntos de control, distribución predial irregular y con variaciones marcadas en la altura del terreno.

6. Se recomienda realizar el proceso fotogramétrico con distintos software especializados y que esto permita comparar los diferentes resultados, tanto en exactitud como en tiempo de procesamiento.

REFERENCIAS

1. Aylwin, J. (2002). *El acceso de los indígenas a la tierra en los ordenamientos jurídicos de América Latina: un estudio de casos*. Alemania: CEPAL. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4517/1/S027521_es.pdf.
2. Barrientos, A; Del Cerro, J; Gutiérrez, P; San Martín, R. Martínez, A. y Rossi, C. (2007). *Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones*. Madrid. Recuperado de <https://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>.
3. Bonneval, H. (1972). *La Photogrammétrie. Principes généraux et terminologie*. París: Eyrolles. Recuperado de https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2011num_12_1_1176.
4. Callejo, M. y Llopis, C. (1991). *Planos y mapas: actividades interdisciplinarias para representar el espacio* Madrid: Narcea Ediciones. Recuperado de https://docs.google.com/document/d/1xWdKDTfAQmxFDUFC4uFhVaGgPJ2eUG58i_5usLBI0_o/edit.
5. Camargo, J. (2011). *Estudio y diseño de metodología con técnicas GPS para la actualización de la cartografía catastral del municipio Palavecino*. Venezuela. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/112987196/tesis-fotogrametria-catastral>.

6. Castro, R. (2012). *Teledetección aérea no tripulada: ventajas y aplicaciones*. Chile: CENIA. Recuperado de [https://www.cenia.cl/documentos/docu50ed634f0e837_09012013_932 am.pdf](https://www.cenia.cl/documentos/docu50ed634f0e837_09012013_932_am.pdf).
7. Coello et. al. (2015). *Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con Topografía clásica*. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Técnicos en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://oa.upm.es/34699/1/PFC_ALBA_COELLO_ROMERO.pdf.
8. Congreso de la República de Guatemala. (2005). *Ley de Registro de Información Catastral. Decreto número 41-2005*. Recuperado de <https://srp.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Ley-del-Registro-de-Informacion-Catastral.pdf>.
9. Cuerno _Rejado, C., García-Hernández, L., Sánchez-Carmona, A., Carrío, A., Sánchez-López, J. y Campoy, P. (2016), *Historical evolution of the unmanned aerial vehicles to the present*. España: Centro de Automática y Robótica, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de [.http://digital.csic.es/handle/10261/140304](http://digital.csic.es/handle/10261/140304).
10. Davis, S. (1997). *La tierra de nuestros antepasados: estudio de la herencia y la tenencia de la tierra en el altiplano de Guatemala*. Guatemala: Centro de Investigaciones Regionales de Mesoamérica. Recuperado de <http://www3.tau.ac.il/ojs/index.php/eial/article/view/1065/1097>.
11. Dà-Jiāng Innovations. (2017). *Manual del usuario V.2.0*. USA. Recuperado de <https://www.dji.com/mavic/>.

12. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2016). *Reseña histórica acerca de la Dirección General de Aeronáutica Civil. Guatemala*. Recuperado de <http://www.dgac.gob.gt/index.php/acerca-de/resena-historica>.
13. Erba, D. (2008). *El catastro territorial en América latina y el caribe*. Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy. Recuperado de <https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/el-catastro-territorial-america-latina-full.pdf>.
14. Erba D. y Piumetto, M. (2016). *Para leer el suelo urbano. Catastros multifinalitarios para la planificación y el desarrollo de las ciudades de América Latina*. Lincoln Institute of Land Policy. Recuperado de <https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/para-leer-el-suelo-urbano-catastros-full.pdf>
15. Escalante J. y Porras, H. (2016). *Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Ortomosaicos-y-modelos-digitales-de-elevaci%C3%B3n-a-de-Torrado-Jim%C3%A9nez/36367d144670a0e9579deffdeefe8dadd1664377>.
16. Fernández de Córdoba, R. (2010). *Producción de productos cartográficos: MDT y ortofoto a partir de imágenes capturadas por un vehículo UAV*. España: USAL. Recuperado de https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/119810/1/TFM_MoraFernandezdeCordobaR_Generacion.pdf.

17. Gallardo, B. (2007). *Estudio de viabilidad de aplicaciones de observación aérea con UAV's y elaboración de un plan de empresa*. Cataluña. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3604/1/55726-1.pdf>.
18. Gándara, N. (marzo 14, 2017). *Podrán volar drones de manera ilimitada*. Prensa Libre. Recuperado de: <https://www.prensalibre.com/economia/podran-volardrones/#:~:text=Aerobots%2C%20 empresa %20guatemalteca%20de%20tecnolog%C3%ADao%20drones%20de%20manera%20ilimitada>.
19. Gándara, N. (mayo 8, 2017). *Bajo incentivo para el registro de drones*. Recuperado de https://www.prensalibre.com/economia/economia/bajo-incentivo-para-el-registro-de-drones_.
20. García F. (2015). *Planificación de vuelos fotogramétricos para UAV*. Tesis de Maestría, Universidad de Oviedo, Escuela Politécnica de Mieres, España. Recuperado de https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/33969/4/TFM_EduardoGarciaFernandez.pdf.
21. García, M. (2002). *Antecedentes, elaboración y espíritu de la nueva ley orgánica del banco de Guatemala*. Guatemala: Universidad del Istmo. Recuperado de <http://glifos.unis.edu.gt/library/index.php?Lang=en&title=220060&query=@title=Special:GSMSearchPage@process=@autor=LARA%20@mode=&recnum=17>.
22. Gellert, G. (1994). Ciudad de Guatemala: factores determinantes en su desarrollo urbano (1775 hasta la actualidad). *Mesoamérica*, 15(27), 1-68. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/286659>.

23. Hastings, M. (2012). *The rise of the killer VANT: how America goes to war in secret*. USA. Recuperado de <https://www.rollingstone.com/politics/politics-news/the-rise-of-the-killer-drones-how-america-goes-to-war-in-secret-231297/>.
24. Instituto Geográfico Nacional de Guatemala. (1999). *Resolución Normativa IGN-01/99*. Recuperado de <http://ignguatemala.weebly.com/guatemala-transversa.html>.
25. Jáuregui, L. (2010). *Introducción a la fotogrametría*. Venezuela. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/272090105_Introduccion_a_la_Fotogrametria_y_Cartografia_aplicadas_a_la_Ingenieria_Civil.
26. Llopis, J. P. (diciembre, 2006). Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. *Revista de Geografía Norte Grande*. (No. 36). (pp 97-101). Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022006000200007EditorialClub Universitario.
27. López R. (2013). *Leyes aplicadas en la agrimensura y catastro para trabajos de medida legal*. Guatemala: Universidad de San Carlos. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3542_C.pdf.
28. López, J. C. (2011). *La regularización de la tenencia de la tierra en Guatemala en el marco de la ley del Registro de Información Catastral, Decreto 41-2005*. Guatemala: Universidad de San Carlos, Facultad de Agronomía. Recuperado de <http://postgrado.fausac>.

gt/wp-content/uploads/2016/09/Juan-Carlos-L%C3%B3pez-Taracena.pdf.

29. Pardo, J. A. (2016). *Implementación de un Sistema de Comunicación Inalámbrico entre un UAV/RPA con su estación terrena para la transmisión de imágenes térmicas en tiempo real y su utilización en el control de Incendios*. Universidad Pontificia Católica de Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/12152>.
30. PNUD (2010). *Guatemala: hacia un Estado para el desarrollo humano. Informe nacional de desarrollo humano 2009/2010*. Recuperado de http://desarrollohumano.org.gt/wp-content/uploads/2016/04/INDH_2009-2010_1.pdf.
31. Puerta, C. y Militares, E. (2015). *Tecnología DRONE en levantamientos topográficos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado de https://www.academia.edu/19589719/TECNOLOGIA_DRONE_EN_LEVANTAMIENTOS_TOPOGRAFICOS.
32. Quispe E. (2015). Análisis de GSD para la generación de cartografía utilizando la tecnología drone, huaca de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima Perú. *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, (Vol. 18) (No.36) (pp 21-26). Recuperado de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/12014>.

33. Registro de Información Catastral. (2009). *Guía de supervisión y control de calidad para levantamiento catastral*. Recuperado de http://www.guatecompras.gt/concursos/files/391/1952722@06_Guia%20Sup%20y%20Control%20Calidad%20Levantamiento%20Catastral_1.pdf.
34. Ribeiro K. (2017). *Avances metodológicos para el empleo de vehículos aéreos no tripulados en agricultura de precisión*. España: UCLM. Recuperado de <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/15293>.
35. Ríos, M., Pérez Alonso, J., Lashera Velasco, J., López Ayuso, B., Muñoz Solera, R. Martínez Riquelme, C. y Fernández Pacheco, A. (febrero, 2016). Utilidad de los vehículos aéreos no tripulados en la búsqueda y triaje de personas en situaciones de catástrofe. *Emergencias*. 28(2) (pp.109-113). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/299446396_Utilidad_de_los_vehiculos_aereos_no_tripulados_en_la_búsqueda_y_triaje_de_personas_en_situaciones_de_catastrofe.
36. Salinas, A. (2006). *Geografía, un enfoque constructivista*. México: Pearson Educación. Recuperado de <https://books.google.com.gt/books?id=a0hqcd-vgt8C&pg=PP1&lpg=PP1&dq=Geograf%C3%ADa+un+enfoque+constructivista.+Pearson+Educaci%C3%B3n.&source=bl&ots=dYELyau08P&sig=ACfU3U2bLmy5kgi5E9y294MTMrjJus9B6w&hl=es-419&sa=X&ved=2ah>.
37. Sánchez J. (2006). *Introducción a la fotogrametría*. Madrid: ETSI. <https://docplayer.es/15050160-Introduccion-a-la-fotogrametría.html>.

38. Sánchez M. y Gallego, A. (2013). *Manual de topografía en ingeniería*. España: Editorial UPV. Recuperado de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/94991902-5f0a-4616-9f60-98d193a6a523/TOC_6139_01_01.pdf?guest=true.
39. Sani, J. (2015). *Vehículos aéreos no tripulados para la elaboración de cartografía escalas grandes referidas al marco de referencia Sirgas-Ecuador*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/274385188_VEHICULOS_AEREOS_NO_TRIPULADOS_UAV_PARA_LA_ELABORACION_DE_CARTOGRAFIA_ESCALAS_GRANDES_REFERIDAS_AL_MARCO_DE_REFERENCIA_SIRGAS-ECUADOR.
40. Sarmiento F. y Montoya, D. (2015). *Diseño y creación del laboratorio de herramientas educativas SIG para las ciencias sociales en la educación básica secundaria*. Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22521>.
41. Sevilla de Lerma, M. (1999). *Introducción histórica a la geodesia*, Instituto de Astronomía y Geodesia. Madrid. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/253045493_Introduccion_Historica_a_la_Geodesia.
42. Sollinger, G. (2010). The development of unmanned aerial vehicles in Germany (1914-1918), *Scientific Journal of Riga Technical University*. vol. 16. Recuperado de <http://ortus.rtu.lv>.

43. Soriano, F. y Cristian, R. (2017). *Aplicación de fotogrametría con RPAS para mejorar la efectividad en cuantificación de la explotación en la Cantera Santa Genoveva-2016*. Perú: Universidad César Vallejo. Recuperado de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/23113>
44. Spectra geoespacial. (2017). *Guía del usuario*. Estados Unidos. Recuperado de https://spectrageospatial.com/wp-content/uploads/SP60_UG_es_C.pdf.
45. Vásquez, J. (2017). *Elaboración de la norma técnica para la generación de cartografía catastral de Escala 1: 1,000 empleando UAV*. Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/13353>.
46. Vela B. y Ospina, C. (2013). *Inteligencia visual para el modelamiento de entornos urbanos mediante imágenes ópticas panorámicas de 360 grados*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/143448062.pdf>.
47. Zelaya, R., Guevara Aguilar, A. y Pacas Cruz, N. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. Universidad de El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/14218/1/50108282.pdf>.

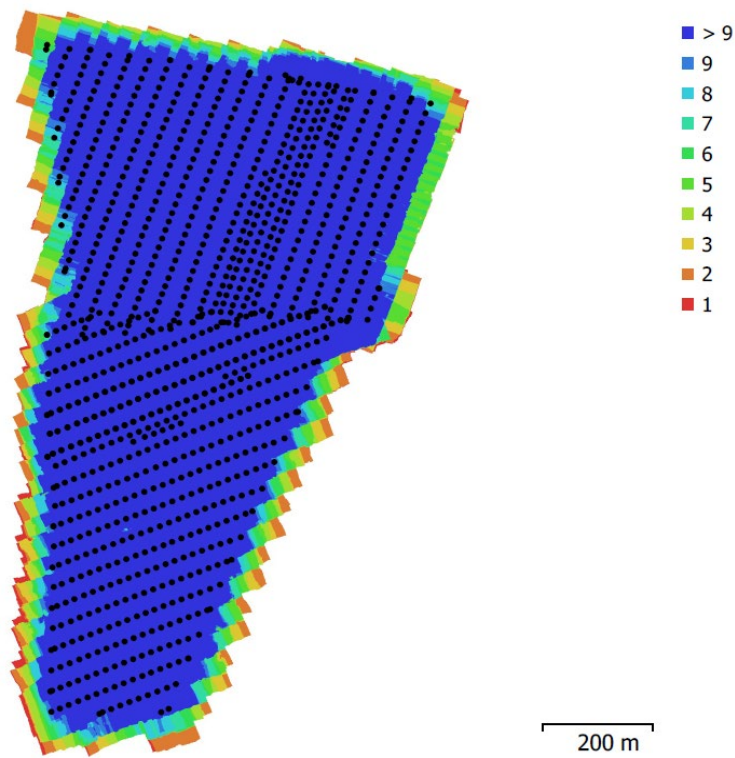
APÉNDICES

Apéndice 1. **Agisoft PhotoScan: informe de procesamiento 21 de junio 2020**



Fuente: elaboración propia empleando el programa Agisoft Photoscan.

Apéndice 2. **Datos del levantamiento. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes**



Número de imágenes: 1,157	Posiciones de cámara:	1,157
Altitud media de vuelo: 100 m	Puntos de enlace:	583,607
Resolución en terreno: 3.21 cm/pix	Proyecciones:	3,527,534
Superficie cubierta: 0.766 km ²	Error de reproyección:	8.99 pix

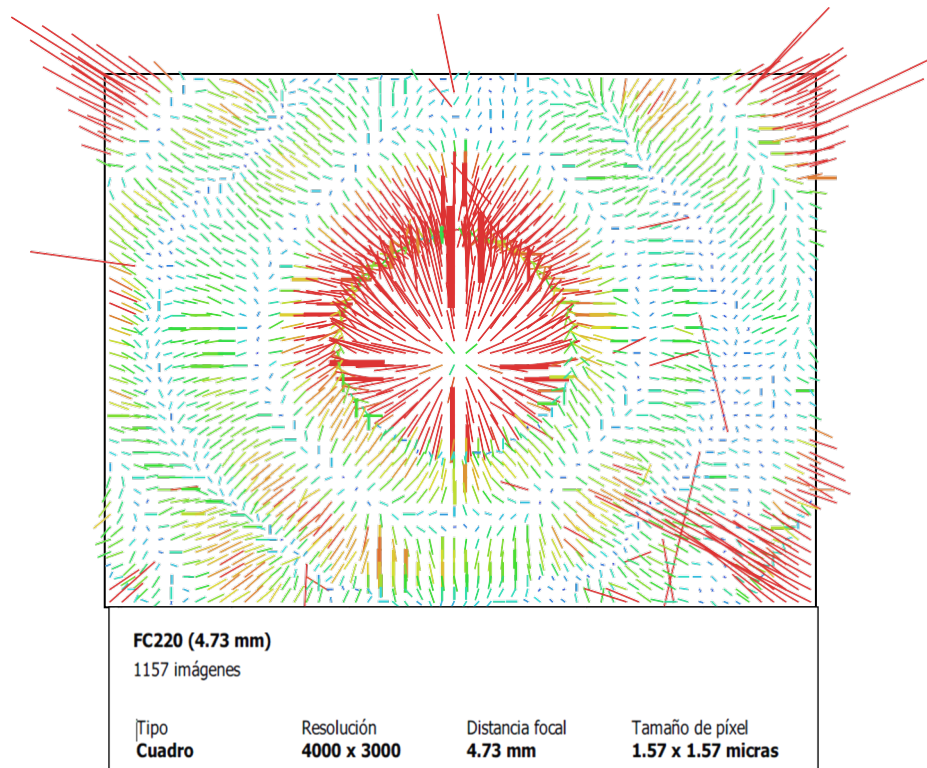
Fuente: elaboración propia, empleando el programa Agisoft Photoscan.

Apéndice 3. Cámaras

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
FC220 (4.73 mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 micras	No

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Gráfico de residuales para cámara FC220



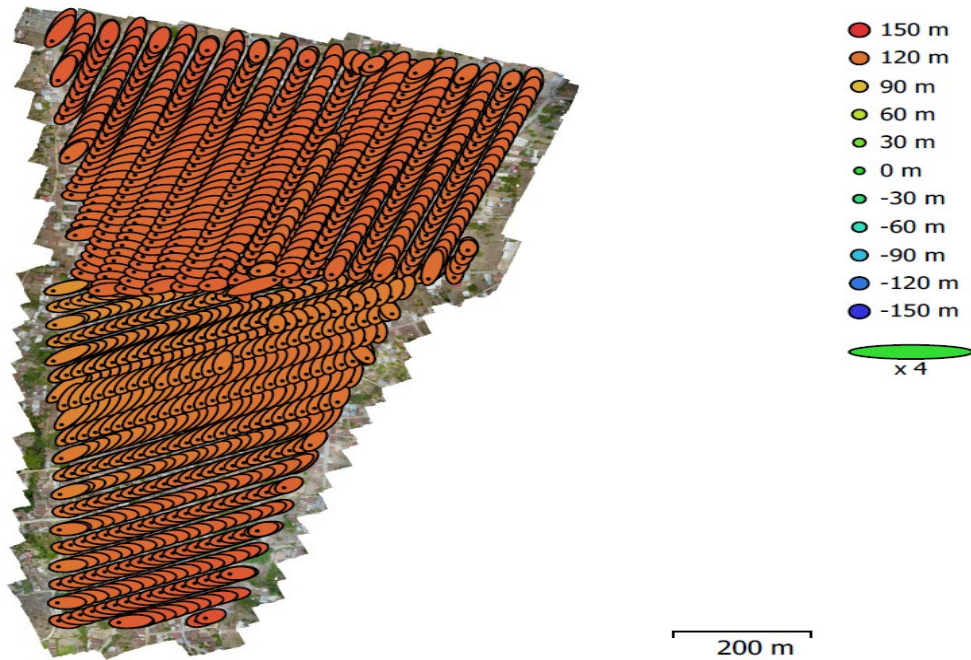
Fuente: elaboración propia, empleando Agisoft Photoscan.

Apéndice 5. Coeficientes de calibración y matriz de correlación

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	6075.58	7	1.00	-0.14	-0.52	-0.22	-0.10	0.29	-0.49	0.62	-0.69	0.01	-0.04
Cx	-75.853	0.64		1.00	0.08	0.02	-0.02	0.00	0.01	-0.02	0.02	0.86	0.02
Cy	-94.7355	0.63			1.00	0.12	0.04	-0.13	0.22	-0.28	0.31	0.01	0.72
B1	-34.5508	0.25				1.00	0.03	-0.04	0.08	-0.11	0.13	-0.02	0.04
B2	0.295515	0.25					1.00	-0.03	0.05	-0.06	0.07	-0.04	-0.02
K1	0.425274	0.0031						1.00	-0.96	0.88	-0.81	0.04	0.03
K2	-8.83641	0.084							1.00	-0.98	0.95	-0.06	-0.04
K3	76.8855	0.91								1.00	-0.99	0.07	0.04
K4	-227.214	3.3									1.00	-0.08	-0.04
P1	-0.000364384	4.2e-05										1.00	0.02
P2	-0.000443671	3.3e-05											1.00

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 6. **Posiciones de cámaras y estimación de errores**



Fuente: elaboración propia, empleando Agisoft Photoscan.

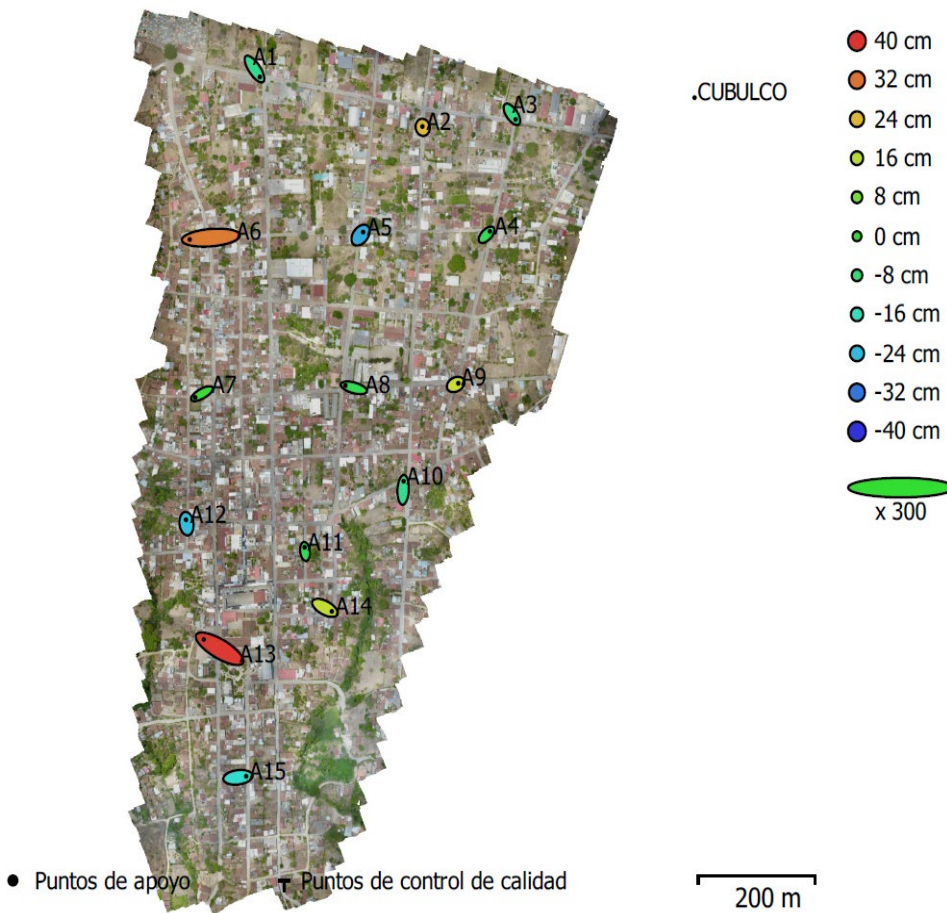
El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY. Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Apéndice 7. **Errores medios de las posiciones de cámaras**

X = este, Y = norte, Z = altitud				
Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error XY (m)	Error compuesto (m)
5.09913	4.99251	122.873	7.13627	123.08

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores



Fuente: elaboración propia, empleando Agisoft Photoscan.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY. Posiciones estimadas de puntos de apoyo se indican con los puntos negros, puntos de control con cruzamiento.

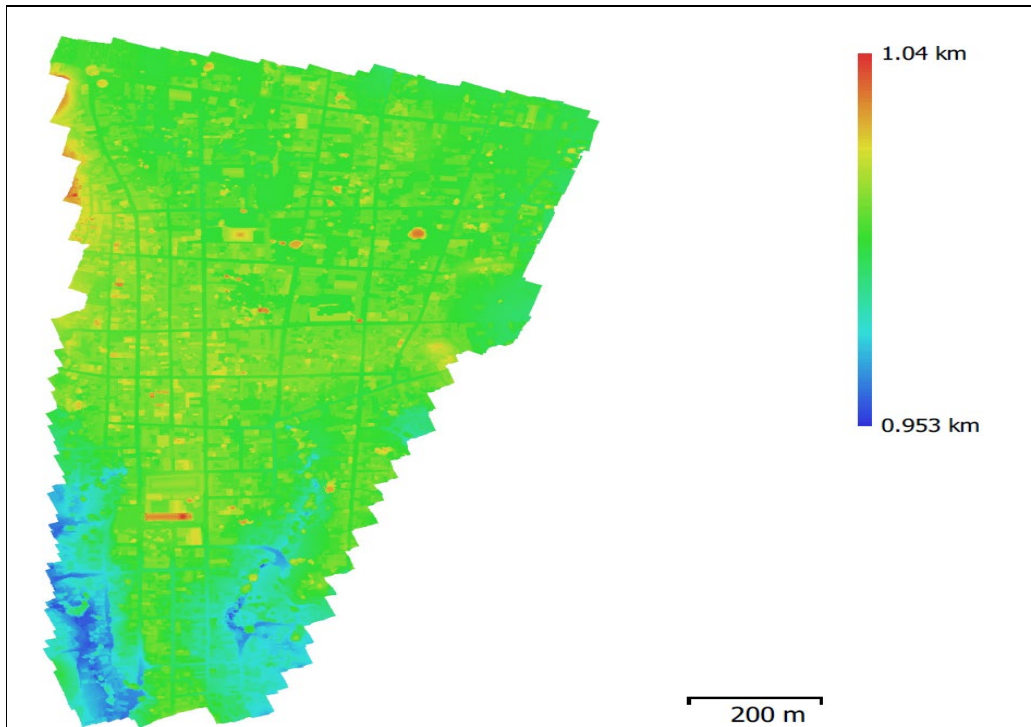
Apéndice 9. Puntos de apoyo

Nombre	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
A1	6.08053	-8.07938	-11.1116	15.0239	0.870 (20)
A2	-0.296195	0.916255	23.5272	23.5469	0.847 (27)
A3	4.16409	-5.328	-10.1018	12.1562	0.926 (16)
A4	3.86064	3.49432	-5.22733	7.37833	0.638 (21)
A5	2.8236	3.05749	-26.217	26.5453	1.366 (24)
A6	-24.2095	-1.85609	31.3063	39.6185	1.243 (12)
A7	-7.69614	-3.93195	0.193654	8.64455	1.161 (22)
A8	-9.5888	2.39429	-3.76724	10.5769	3.128 (46)
A9	2.96001	1.26757	17.913	18.2002	0.852 (37)
A10	0.487422	8.84239	-11.1756	14.259	0.810 (23)
A11	-0.621579	4.25238	-3.76348	5.71252	1.224 (22)
A12	-0.637057	4.02476	-23.9021	24.247	1.282 (31)
A13	-18.0418	9.60496	38.9877	44.0205	1.459 (20)
A14	7.83105	-3.70034	16.9445	19.0299	0.966 (23)
A15	9.35764	1.0512	-18.7348	20.9682	0.972 (24)
Total	9.30499	4.91141	19.4549	22.1178	1.486

X = este, Y = norte, Z = altitud.

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 10. **Modelo digital de Superficie *Digital Surface Model***



Resolución:	6.42 cm/pix
Densidad de puntos:	243 puntos por metro cuadrado

Fuente: elaboración propia, empleando Agisoft Photoscan.

Apéndice 11. Resumen de procesamiento

Generales	
Cámaras Cámaras orientadas	
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zona 15N (EPSG:32615)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo
Nube de puntos	
Puntos	583,607 de 697,119
RMS error de reproyección	2.79834 (8.98622 pix)
Error de reproyección máximo	2382.31 (8217.33 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	
Superposición efectiva	
Parámetros de orientación	
Preselección genérica	
Preselección de referencia	
Puntos clave por foto	
Puntos de enlace por foto	
Tiempo de búsqueda de puntos homólogos	2 horas 33 minutos
Parámetros de optimización	
Compensar <i>rolling-shutter</i>	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2 No
Tiempo de optimización	4 minutos, 8 segundos
Nube de puntos densa	
Parámetros de reconstrucción	
Filtrado de profundidad	
Tiempo de generación de mapas de profundidad	Un día, una Hora
Tiempo de generación de nube de puntos densa	12 horas 55 Minutos
Modelo de teselas	
Tamaño de tesela	Nube de puntos densa 256
Duración de procesamiento	22 horas 22 minutos
Resumen final	
Sistema de coordenadas	19,620 x 29,419 WGS 84 / UTM zona 15N (EPSG:32615) Nube de puntos densa Habilitada
Duración del procesamiento	13 minutos 46 segundos

Continuación del apéndice 11.

Ortomosaico	
Sistema de coordenadas	26,025 x 44,151 WGS 84 / UTM zona 15N (EPSG:32615)
Canales	
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Modelo digital de elevaciones
Realizar el relleno de agujeros	
Duración del proceso	38 minutos 1 segundo
Software	
Plataforma	1 4.0 build 5076

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Resultados procesamiento GNSS con Software Survey Office de Spectra**

	Proyecto GNSS	GCP Cubulco
Erick Mejia Rivera	Phone: 57829351 erick.mejia@gmail.com	Ingeniería en Geomática Universidad de San Carlos de Guatemala
Project file data	Coordinate System C:\Users\ip\Documents\ SurveyOffice\Tesis- Cubulco1.vce	GTM
Tamaño	80 KB 5/24/2020 9:34:13 AM (UTC:-6)	Datum: WGS 19 Zone: Default
Tiempo	Hora estándar, América Central	Geoid: EGM96
Número de referencia	1-2 mayo 2020	Vertical datum: EGM96

Fuente: elaboración propia.

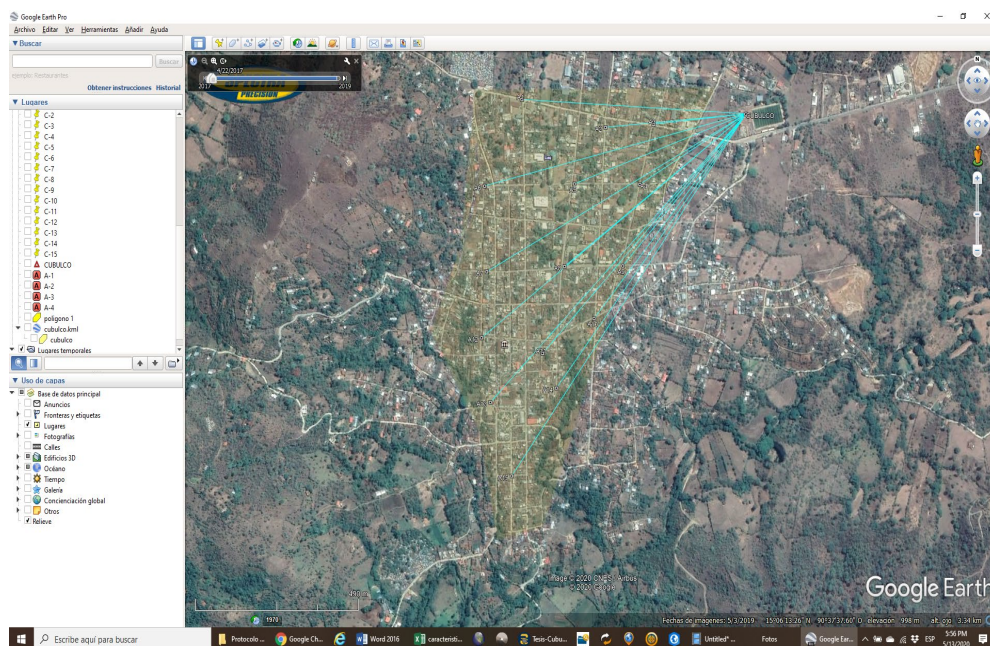
Apéndice 13. Resultado del procesamiento de líneas base GNSS

Observación	From	To	Solución type	H. Prec. (metro)	V. Prec. (metro)	Geodetic Az.	Ellipsoid Dist. (metro)	Δ Height (metro)
CUBULCO1 - -- A12 (B1)	CUBULCO1	A12	Fixed	0.013	0.017	233°46'00.98"	1087.200	2.689
CUBULCO1 - -- A7 (B2)	CUBULCO1	A7	Fixed	0.017	0.028	242°08'57.27"	971.553	4.855
CUBULCO1 - -- A8 (B3)	CUBULCO1	A8	Fixed	0.007	0.014	233°56'34.08"	744.465	1.469
CUBULCO1 - -- A9 (B4)	CUBULCO1	A9	Fixed	0.007	0.017	223°07'26.80"	598.385	2.691
CUBULCO1 - -- A4 (B5)	CUBULCO1	A4	Fixed	0.008	0.016	240°04'21.54"	406.460	-0.589
CUBULCO1 - -- A5 (B6)	CUBULCO1	A5	Fixed	0.010	0.017	250°30'06.88"	603.898	0.988
CUBULCO1 - -- A6 (B7)	CUBULCO1	A6	Fixed	0.011	0.023	256°22'54.69"	890.673	9.541
CUBULCO1 - -- A1 (B8)	CUBULCO1	A1	Fixed	0.010	0.022	273°05'22.20"	744.413	0.900
CUBULCO1 - -- A2 (B9)	CUBULCO1	A2	Fixed	0.007	0.014	265°09'30.04"	467.686	1.594
CUBULCO1 - -- A3 (B10)	CUBULCO1	A3	Fixed	0.007	0.015	264°20'35.79"	308.159	-0.884
CUBULCO1 - -- A15 (B11)	CUBULCO1	A15	Fixed	0.010	0.016	216°48'52.04"	1298.988	-5.625
CUBULCO1 - -- A13 (B12)	CUBULCO1	A13	Fixed	0.004	0.007	225°42'13.81"	1185.428	4.317
CUBULCO1 - -- A14 (B13)	CUBULCO1	A14	Fixed	0.005	0.008	218°38'42.84"	1007.525	-0.734
CUBULCO1 - -- A11 (B14)	CUBULCO1	A11	Fixed	0.008	0.015	224°27'52.53"	963.252	-0.300
CUBULCO1 - -- A10 (B15)	CUBULCO1	A10	Fixed	0.012	0.024	220°38'48.63"	773.962	-0.780

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Precisión tridimensional= ± 1.92 cm y precisión horizontal = ± 0.91 cm

Apéndice 14. Mapa con los vectores de los puntos de control GCP



Fuente: elaboración propia, con adaptaciones realizadas de DJI y Spectra Geoespacial.
Consultado el 12 de noviembre de 2020. Recuperado de <https://www.dji.com/mavic>;
<https://spectrageospatial.com/category/productos>

Apéndice 15. Procedimientos para levantamientos catastrales mediante VANT

- Obtención de permisos con las autoridades municipales y de la Policía Nacional Civil.
- Reconocimiento de campo para establecer la ubicación de los puntos de control terrestre GCP. Esto incluye localizar la estación que servirá de referencia para las mediciones estáticas mediante posicionamiento GNSS.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Estación CUBULCO1 del Instituto Geográfico Nacional**



Fuente: [Fotografía de Erick Mejía]. (Estación del Instituto Geográfico Nacional de Cubulco, Baja Verapaz. 2020). Colección particular. Guatemala.

Marcado de quince (15) GCP y pintura de las dianas o marcas foto identificables. Para este caso se utilizó una plantilla de cartón con medidas de la cruz de 0.45 m de longitud, y pintura acrílica color blanco de secado rápido. Para el centro se utilizó un clavo de acero, según muestra la siguiente figura.

Apéndice 17. **Marcación de un punto de control terrestre GCP**



Fuente: [Fotografía de Erick Mejía]. (Calle principal de Cubulco, Baja Verapaz. 2020). Colección particular. Guatemala.

Planificación de la medición GNSS. Utilizando el software gratuito <http://www.gnssplanningonline.com/#/charts> se procedió a colocar las coordenadas y elevación de Cubulco, Baja Verapaz; el ángulo de elevación y período de observación, así como las constelaciones de satélites que se iban a observar. Se obtuvieron los gráficos, donde se muestra que es posible medir de 6 a.m. a 6 p.m., sin mayores problemas. Ver la siguiente figura.

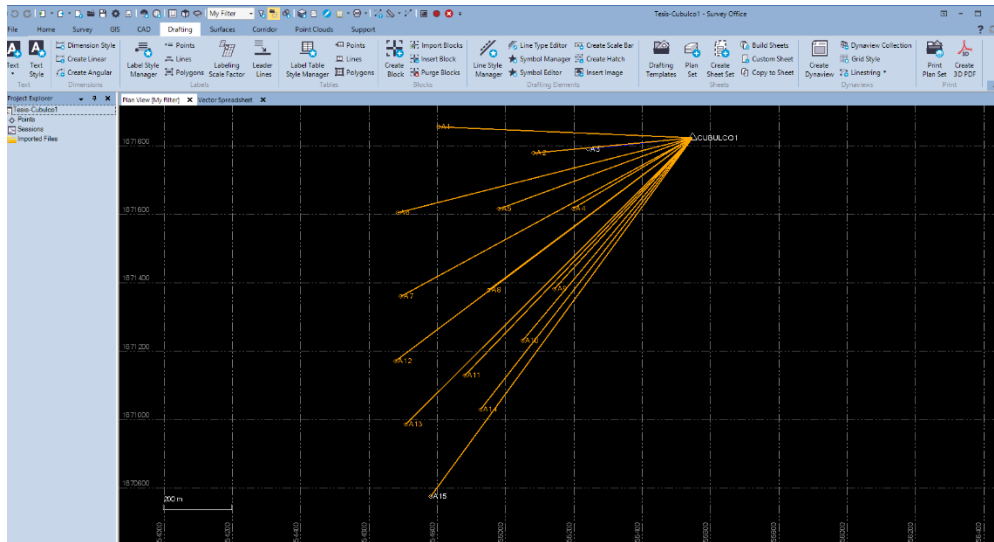
Apéndice 18. Medición GNSS en punto de control A03



Fuente: [Fotografía de Erick Mejía]. (Calle principal de Cubulco, Baja Verapaz. 2020). Colección particular. Guatemala.

- Procesamiento de la red GNSS mediante software Spectra Survey Office, para lo cual se le introducen las coordenadas conocidas de la estación base: CUBULCO1, y se procede a calcular los vectores hacia los GCP.

Apéndice 19. Vectores GNSS para darle posicionamiento a los GCP



Fuente: elaboración propia, empleando el Software SURVEY OFFICE, versión 5.10 de Spectra.

Obtención de coordenadas de los puntos de control, resultado del procesamiento en Survey Spectra Office: se obtienen coordenadas tanto en sistema WGS84, como en sistema GTM.

Se alcanzaron precisiones horizontales entre 5 y 13 mm y en vertical precisiones entre 7 y 28 mm.

Apéndice 20. **Cuadro de coordenadas de los puntos de control terrestre GCP**

PUNTOS DE CONTROL												
DATUM WGS84												
Punto	Latitud N			Longitud W			Altura Elipsoidal (m)	UTM15N-WGS84		GTM		Elevación MSL (m)
	grados	minutos	segundos	grados	minutos	segundos		Este	Norte	Este	Norte	
A1	15	6	35.609	90	37	45.410	999.447	754802.658	1671855.208	486105.696	1670818.834	996.466
A2	15	6	33.019	90	37	36.123	997.160	755080.929	1671778.588	486382.910	1670739.101	997.160
A3	15	6	33.315	90	37	30.786	994.684	755240.245	1671789.416	486542.243	1670748.110	994.684
A4	15	6	27.706	90	37	32.313	997.959	755196.492	1671616.453	486496.552	1670575.761	994.973
A5	15	6	27.746	90	37	39.581	999.536	754979.400	1671615.322	486279.592	1670577.098	996.547
A6	15	6	27.480	90	37	49.506	1008.089	754683.019	1671603.968	485983.279	1670569.122	1005.097
A7	15	6	19.536	90	37	49.284	1003.402	754692.282	1671359.784	485989.759	1670324.995	1000.402
A8	15	6	20.047	90	37	40.672	1000.016	754949.368	1671378.267	486246.885	1670340.543	997.020
A9	15	6	20.094	90	37	34.215	1001.239	755142.223	1671381.795	486439.651	1670341.876	998.244
A10	15	6	15.198	90	37	37.400	997.767	755048.708	1671230.224	486344.475	1670191.469	994.767
A11	15	6	11.937	90	37	43.112	998.247	754879.161	1671128.122	486173.881	1670091.362	995.241
A12	15	6	13.396	90	37	49.885	1001.236	754676.378	1671170.793	485971.717	1670136.310	998.230
A13	15	6	7.369	90	37	48.930	999.852	754706.891	1670985.786	486000.107	1669951.080	999.852
A14	15	6	8.701	90	37	41.587	997.814	754925.785	1671029.132	486219.348	1669991.908	994.805
A15	15	6	0.469	90	37	46.583	989.904	754779.280	1670774.391	486070.045	1669739.002	989.904
CUBULCO 1	15	6	34.304	90	37	20.516	998.548	755546.681	1671823.121	486848.857	1670778.308	995.573

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Plan de vuelo fotogramétrico: mediante la aplicación Ctrl+DJI se puede introducir el área a fotografiar, la altura que se desea volar (100 m), el traslape lateral y longitudinal (80 %).

- Vuelo fotogramétrico: aquí se procede a realizar el vuelo, el cual se realiza de manera semiautomática, mediante la aplicación Ctrl+DJI, el cual se encarga del despegue y aterrizaje seguro y del vuelo fotogramétrico.

- Procesamiento en Agisoft Photoscan. Para esto se siguen los siguientes pasos:
 - Añadir fotos: se cargan directamente desde la carpeta donde se encuentran las imágenes obtenidas del VANT DJI Mavic Pro.
 - Orientar fotos: acá intervienen los puntos de control, los cuales se deben fotoidentificar en las fotos y ubicarlos mediante sus coordenadas precisas. La diferencia total de los 15 puntos es de 22.12 cm (en tres dimensiones).

Apéndice 21. Errores de los puntos de apoyo GCP luego de procesar en Agisoft Photoscan

Nombre	Error este(cm)	Error norte (cm)	Error elevación (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
A1	6.08053	-8.07938	-11.1116	15.0239	0.870 (20)
A2	-0.296195	0.916255	23.5272	23.5469	0.847 (27)
A3	4.16409	-5.328	-10.1018	12.1562	0.926 (16)
A4	3.86064	3.49432	-5.22733	7.37833	0.638 (21)
A5	2.8236	3.05749	-26.217	26.5453	1.366 (24)
A6	-24.2095	-1.85609	31.3063	39.6185	1.243 (12)
A7	-7.69614	-3.93195	0.193654	8.64455	1.161 (22)
A8	-9.5888	2.39429	-3.76724	10.5769	3.128 (46)
A9	2.96001	1.26757	17.913	18.2002	0.852 (37)
A10	0.487422	8.84239	-11.1756	14.259	0.810 (23)
A11	-0.621579	4.25238	-3.76348	5.71252	1.224 (22)
A12	-0.637057	4.02476	-23.9021	24.247	1.282 (31)

Continuación del apéndice 21.

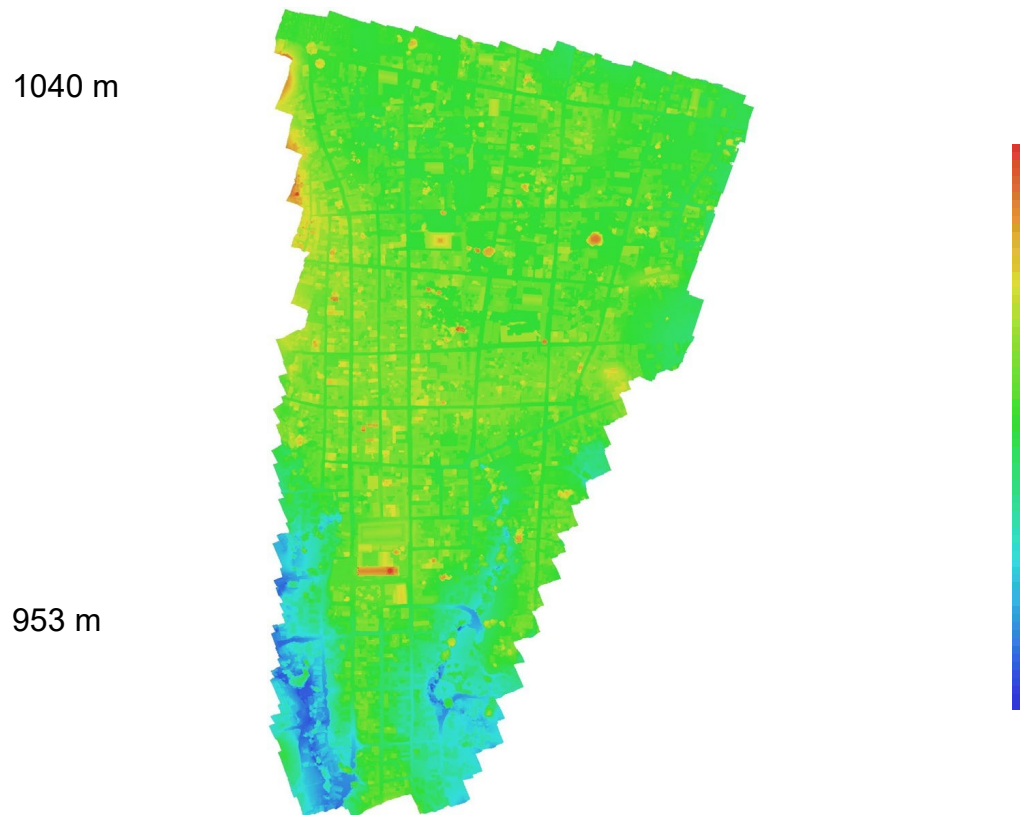
A13	-18.0418	9.60496	38.9877	44.0205	1.459 (20)
A14	7.83105	-3.70034	16.9445	19.0299	0.966 (23)
A15	9.35764	1.0512	-18.7348	20.9682	0.972 (24)
Total	9.30499	4.91141	19.4549	22.1178	1.486
Diferencias: X = este, Y = norte, Z = altitud. Unidades en cm					

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 10.52 \text{ cm} = \text{error horizontal obtenido.}$$

- Crear nube de puntos densa, la cual interviene en la creación de los modelos tridimensionales.
- Crear la malla con la cual se obtienen caras triangulares tridimensionales que conforman la superficie de los objetos.
- Crear modelo de teselas, con el cual se le coloca textura a la malla creada anteriormente.
- Crear modelo digital de elevaciones. Con el software se logra obtener el DSM. Nota: el DSM resultante contiene tanto la vegetación, construcciones y objetos, ya que, para poder eliminar dichos elementos, se requiere un procesamiento posterior (no se evaluará en este estudio).

Apéndice 22. **Generación del modelo digital de superficie o DSM**



Fuente: elaboración propia, empleando Agisoft Photoscan.

- Crear ortomosaico. El producto resultante puede exportarse como formato TIFF hacia el software ArcGIS para su posterior mapeo.
- Generar reporte.
- Comprobación o validación de campo. Se miden distancias en el terreno y se comparan contra las obtenidas del ortomosaico; luego se revisan los errores obtenidos.

Apéndice 23. **Comprobación de la consistencia geométrica predial con ortofotos**

		PUNTOS DE COMPROBACION												
		distancias en metros												
GCP	LUGAR												promedio (m)	
A13	Monumento cruz	a	b	c	d									
	medidas ortofoto	2.07	2.09	2.09	2.11									
	medidas en campo	2.01	2.02	2.02	2.02									
	diferencias	-0.06	-0.07	-0.07	-0.09								-0.072	
	gradas templo	a	b	c										
	medidas ortofoto	4.33	6.25	4.39										
	medidas en campo	4.28	6.18	4.38										
	diferencias	-0.05	-0.07	-0.01									-0.043	
	A11	Cuadros de calle	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	
		medidas ortofoto	2.98	3.06	2.92	3.08	3.00	3.05	2.97	3.00	2.98	3.00	2.99	
medidas en campo		3.00	3.03	2.98	3.02	2.95	3.02	2.98	3.03	2.98	3.01	2.97		
diferencias		0.02	-0.03	0.06	-0.06	-0.05	-0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	-0.02	-0.006	
A8		pasos de cebra	a	b	c	d								
	medidas ortofoto	5.02	7.48	5.08	5.13									
	medidas en campo	5.05	7.47	5.06	5.10									
	diferencias	0.03	-0.01	-0.02	-0.03								-0.008	
A7	cuadros de calle	a	b	c	d	e	f	g						
	medidas ortofoto	3.01	2.96	3.02	3.05	3.05	2.99	3.03						
	medidas en campo	3.01	2.97	3.05	3.03	3.02	3.00	3.01						
	diferencias	0.00	0.01	0.03	-0.02	-0.03	0.01	-0.02					-0.003	
A4	divisiones de calle	a	b	c	d	e	f							
	medidas ortofoto	14.78	20.01	20.11	20.19	20.16	19.89							
	medidas en campo	14.76	19.97	20.10	20.20	20.20	19.88							
	diferencias	-0.02	-0.04	-0.01	0.01	0.04	-0.01						-0.005	
A3	isla gasolinera	a	b	c	d	e								
	medidas ortofoto	3.98	3.64	3.99	8.81	13.94								
	medidas en campo	3.97	3.59	3.98	8.74	13.97								
	diferencias	-0.01	-0.05	-0.01	-0.07	0.03							-0.022	
A1	cancha de basket	a	b	c	d	e								
	medidas ortofoto	3.96	4.71	4.06	4.74	9.22								
	medidas en campo	3.98	4.69	3.99	4.71	9.20								
	diferencias	0.02	-0.02	-0.07	-0.03	-0.02							-0.024	
A14	divisiones de calle	a	b	c										
	medidas ortofoto	4.99	20.09	19.95										
	medidas en campo	5.06	19.99	20.02										
	diferencias	0.07	-0.10	0.07									0.013	
A15	divisiones de calle	a	b	c	d	e	f	g						
	medidas ortofoto	3.00	2.98	2.97	3.03	2.93	3.01	2.98						
	medidas en campo	3.03	3.00	2.98	3.01	2.97	3.03	2.97						
	diferencias	0.03	0.02	0.01	-0.02	0.04	0.02	-0.01					0.013	
												TOTAL	-0.016	

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

- Comprobación o validación de frentes de predios. Esta es una validación para comprobar que la medición de predios en la ortofoto es congruente con la medición en campo, mediante estación total o cinta métrica.

Apéndice 24. Comprobación de medidas diferentes de predios

ESTACIÓN TOTAL				ORTOFOTO		
GCP	Punto	Este	Norte	Dist. de coordenadas	Dist. ortofoto	Diferencia
A1	1	486100.34	1670817.92	7.59	7.59	0.00
	2	486107.80	1670816.50			
A2	1	486387.64	1670754.10	17.61	17.60	-0.01
	2	486386.63	1670736.52			
A3	1	486577.86	1670744.54	18.01	17.96	-0.05
	2	486595.68	1670741.92			
A4	1	486484.99	1670581.13	12.28	12.29	0.01
	2	486497.27	1670581.11			
A5	1	486331.70	1670581.23	10.00	10.08	0.08
	2	486341.70	1670581.30			
A6	1	485987.40	1670560.99	4.54	4.51	-0.03
	2	485987.15	1670556.46			
A7	1	485999.54	1670322.96	15.68	15.81	0.13
	2	486015.21	1670322.44			
A8	1	486260.85	1670344.15	10.84	10.89	0.05
	2	486271.69	1670344.13			
A9	1	486441.42	1670341.73	19.77	19.73	-0.04
	2	486461.19	1670342.01			
A10	1	486330.21	1670184.57	19.59	19.47	-0.12
	2	486348.54	1670191.47			
A11	1	486170.94	1670097.63	16.94	16.98	0.04
	2	486170.92	1670080.69			
A12	1	485971.14	1670142.17	15.42	15.35	-0.07
	2	485969.81	1670126.81			
A13	1	486030.34	1669967.16	29.70	29.86	0.16
	2	486030.66	1669937.46			

Continuación del apéndice 24.

A14	1	486212.62	1669984.77	9.48	9.48	0.00
A15	1	2	486222.10	1669984.63		
	2	486056.50	1669743.22			
					Promedio	0.01
Diferencia máxima: 0.16 m			Desviación estándar: 0.07			

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Comprobación o validación de los puntos de control elaborada por la NSSDA, en la cual se digitalizan las coordenadas de la ortofoto y se comparan contra las obtenidas del procesamiento GNSS; se analizan los errores obtenidos.

Apéndice 25. **Comprobación de estándares de la NSSDA**

Point ID	Valores derivados de la ortofoto			Valores topograficos de los GCP			Residuales (Errores)		
	Este (E)	Norte (N)	Elevacion (H)	Este (E)	Norte (N)	Elevacion (H)	Δx Este (E)	Δy Norte (N)	Δz Elevacion (H)
	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros	metros
A1	486105.730	1670818.780	996.350	486105.696	1670818.834	996.466	-0.034	0.054	0.116
A2	486382.870	1670739.120	997.360	486382.910	1670739.101	997.160	0.040	-0.019	-0.200
A3	486542.260	1670748.070	994.570	486542.243	1670748.110	994.684	-0.017	0.040	0.114
A4	486496.620	1670575.750	994.950	486496.552	1670575.761	994.973	-0.068	0.011	0.023
A5	486279.560	1670577.120	996.220	486279.592	1670577.098	996.547	0.032	-0.022	0.327
A6	485983.060	1670569.100	1005.430	485983.279	1670569.122	1005.097	0.219	0.022	-0.333
A7	485989.700	1670324.980	1000.410	485989.759	1670324.995	1000.402	0.059	0.015	-0.008
A8	486246.850	1670340.580	997.006	486246.885	1670340.543	997.020	0.035	-0.037	0.014
A9	486439.720	1670341.890	998.420	486439.651	1670341.876	998.244	-0.069	-0.014	-0.176
A10	486344.510	1670191.520	994.630	486344.475	1670191.469	994.767	-0.035	-0.051	0.137
A11	486173.920	1670091.410	995.190	486173.881	1670091.362	995.241	-0.039	-0.048	0.051
A12	485971.720	1670136.380	998.000	485971.717	1670136.310	998.230	-0.003	-0.070	0.230
A13	485999.970	1669951.180	1000.280	486000.107	1669951.080	999.852	0.137	-0.100	-0.428
A14	486219.430	1669991.850	995.040	486219.348	1669991.908	994.805	-0.082	0.058	-0.235
A15	486070.190	1669739.020	989.700	486070.045	1669739.002	989.904	-0.145	-0.018	0.204
Numero de check points							15	15	15
Error medio (m)							0.002	-0.012	-0.011
desviación estándar (m)							0.091	0.046	0.219
RMSE (m)							0.088	0.046	0.211
RMSEr (m)							0.099	RAIZ(RMSE ^{x2} + RMSE ^{y2})	
NSSDA exactitud Horizontal , (ACCr) al 95% nivel de confianza							0.172	=RMSEr × 1.7308	
NSSDA exactitud Vertical (ACCz) al 95% nivel confianza							0.414	=RMSEz × 1.9600	
RMSE	error medio cuadrático								
RMSEr	error medio cuadrático horizontal								
NSSDA	National standard for spatial data accuracy								

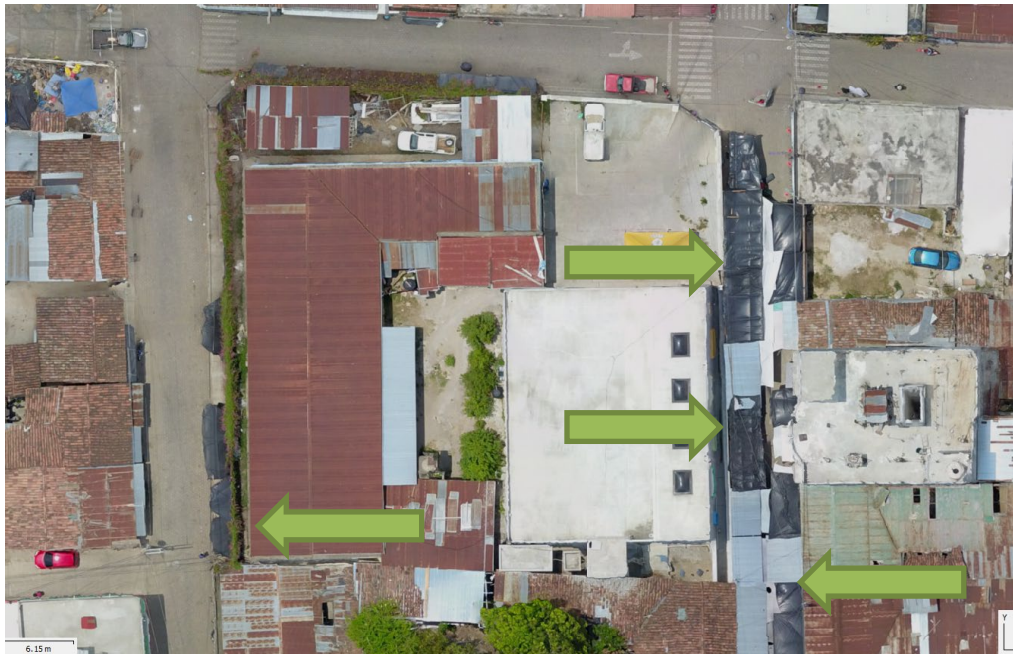
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 26. **Costos y tiempos de ejecución del trabajo de investigación**

Cantidad	Total días	Descripción	Precio total
1	90	Laptop Asus i7 32 GB RAM- depreciación por utilización	Q2,500.00
1	365	Microsoft Office 365	Q300.00
1	365	ArcGIS personal use	Q250.00
2	2	Renta equipo GNSS	Q1,600.00
1	30	Software Agisoft Photoscan - trial	Q0.00
1	1	Renta equipo estación total	Q200.00
1	2	VANT Mavic Pro - depreciación por utilización	Q1,000.00
1	6	Combustible y viáticos, pago de ayudantes	Q6,000.00
1	1	Materiales de oficina, papelería e impresión	Q1,000.00
Total			Q12,850.00

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 27. **Obstrucciones de los frentes de las propiedades**



Fuente: elaboración propia, empleando el programa Agisoft Photoscan.

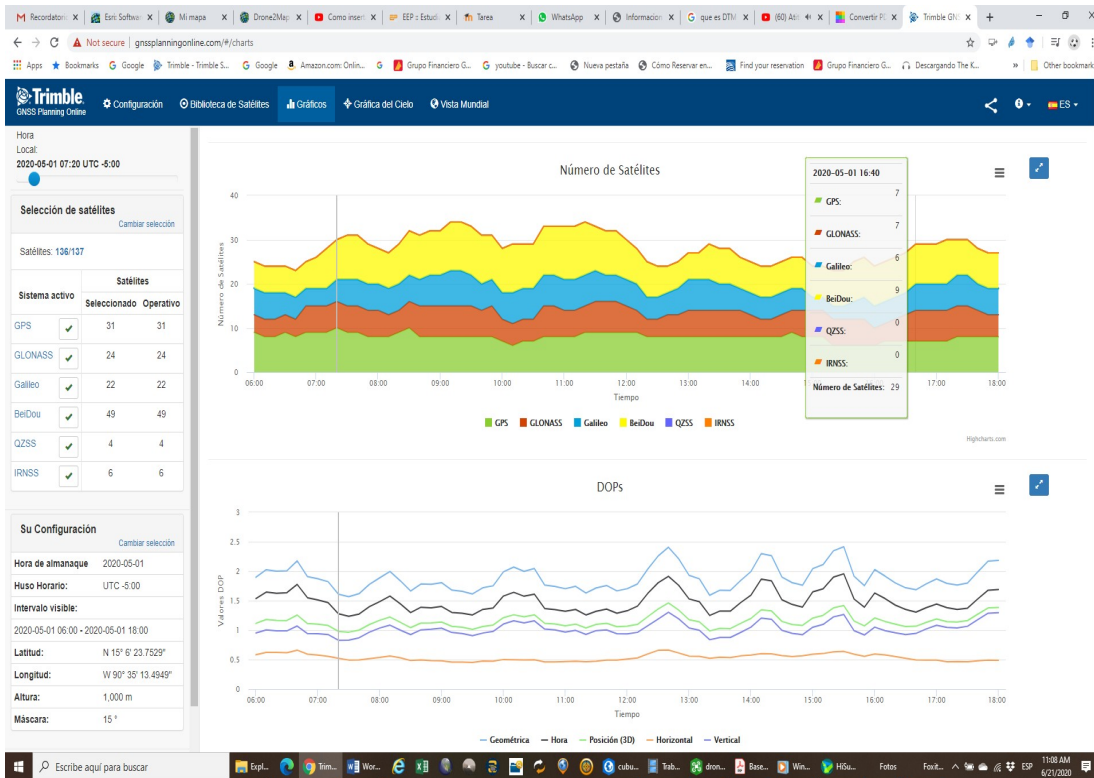
ANEXOS

Anexo 1. Descripción estación Cubulco 1

Estación		Orden	
CUBULCO 1			
Latitud 15° 06' 34.30375" N	Longitud 90° 37' 20.51642" W	Sistema de Referencia Geodésico WGS84 EPOCA 2011.30	
Norte (Y) 1,671,823.1210 m.	Este (X) 755,546.6814 m.	Zona y Proyección 15 UTM	
Norte (Y) 1,670,778.3076 m.	Este (X) 486,848.8571 m.	Zona y Proyección 15.5 GTM	
Altura Elipsoidal: 998.5477 m.	Elevación:	Orden:	Datúm: Puerto de San José 1949 / 50
Características de la marca : Ficha de Bronce de 0.075 m., de diámetro, incrustada en monumento de concreto de 0.30 m. de diámetro por 0.10 m. de alto y 1.15 m. de profundidad.		Estampado CUBULCO I IGN 2010.	
Referencia No. 1: Az ° a mts.	Referencia No. 2: Az ° a mts.	Referencia No. 3: Az ° a mts.	Referencia No. 4: Az ° a mts.
Localización Depto.: Baja Verapaz, Municipio: Cubulco		Trabajo GEODESIA-IGN	
Acceso: Dirigase hacia Salama, de ahí hacia el W pase por San Miguel Chicaj, recorra aproximadamente 40 kilómetros en la carretera asfaltada y llegara a Cubulco, ahí comunicarse con el sindico Municipal quien le dara una persona de acompañante porque es una area muy sola, la estación esta dentro del complejo deportivo en la primera grada frente al campo de futbol. El complejo deportivo esta en la entrada a la poblacion de Cubulco.			
MAPA DE REFERENCIA		CROQUIS	
			
			
Monumentada por: O. Cruz y E. Escobar Fecha: Septiembre de 2,010		Reposicionada por: Mynor Cerna, Alex Laparra Fecha: Abril de 2011	

Fuente: Instituto Geográfico Nacional. *División de Geodesia*. Consultado el 20 de noviembre de 2020. Recuperado de <http://www.ign.gob.gt/geodesia.html>.

Anexo 2. Planificación de las observaciones GNSS



Fuente: Trimble, GNSS Planning Online. *Número de satélites*. Consultado el 20 de noviembre de 2020. Recuperado de <https://www.gnssplanning.com/#/settings>.

Medición GNSS tipo vectorial, a partir de la estación CUBULCO1, y posicionando puntos de control terrestre numerados de A01 al A15, en las calles de Cubulco, con duración de 20 minutos por estación. Según se muestra en la figura.