

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN ADMINISTRACIÓN DE TIERRAS



DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN TOPOGRÁFICA DEL
CUADRICÓPETRO DJI PHANTOM 4 PRO, COMPARÁNDOLO CON
EL EQUIPO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL A TRAVÉS DEL
MÉTODO DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAFAMÉTRICO EN FINCA
“ANONAS” DEL MUNICIPIO DE IPALA, CHIQUIMULA

NERY ALEXANDER GARCIA PÉREZ

CHIQUMULA, GUATEMALA, NOVIEMBRE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN ADMINISTRACIÓN DE TIERRAS

DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN TOPOGRÁFICA DEL
CUADRICÓPETRO DJI PHANTOM 4 PRO, COMPARÁNDOLO CON
EL EQUIPO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL A TRAVÉS DEL
MÉTODO DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN FINCA
“ANONAS” DEL MUNICIPIO DE IPALA, CHIQUIMULA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Sometido a consideración del Honorable Consejo Directivo

Por

NERY ALEXANDER GARCIA PÉREZ

Al conferírsele el título de

INGENIERO EN ADMINISTRACIÓN DE TIERRAS

En el grado académico de

LICENCIADO

CHIQUIMULA, GUATEMALA, NOVIEMBRE 2019

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE
INGENIERÍA EN ADMINISTRACIÓN DE TIERRAS**



RECTOR
M.Sc. Ing. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS

CONSEJO DIRECTIVO

Presidente:	Ing. Agr. Edwin Filiberto Coy Cordón
Representante de Profesores:	M.Sc. Mario Roberto Díaz Moscoso
Representante de Profesores:	M.Sc. Gildardo Guadalupe Arriola Mairén
Representante de Graduados:	Inga. Evelin Dee Dee Sumalé Arenas
Representante de Estudiantes:	A.T. Estefany Rosibel Cerna Aceituno
Representante de Estudiantes:	P.C. Elder Alberto Masters Cerritos
Secretaria:	Licda. Marjorie Azucena González Cardona

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Coordinador Académico:	M. A. Edwin Rolando Rivera Roque
Coordinador de Carrera:	M.Sc. Marlon Leonel Bueso Campos

ORGANISMO COORDINADOR DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

Presidente:	M.Sc. Marlon Leonel Bueso Campos
Secretario:	M.Sc. Victoria María Callén Valdés
Vocal:	M.Sc. Jeovani Joel Rosa Pérez

TERNA EVALUADORA

Ing. en AT. Freddy Alexander Díaz Valdés
Ing. Agr. Sergio Waldemar Albizurez Ortega
Ing. en AT. Juan Carlos Jordán Arriaza

Chiquimula, 2 de octubre de 2019

Señores
Consejo Directivo
Centro Universitario de Oriente
Ciudad de Chiquimula

Honorables miembros:

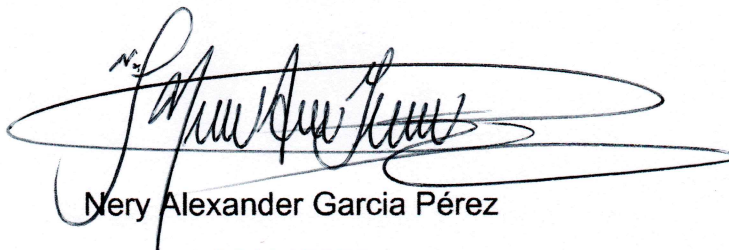
De conformidad con las normas establecidas por la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a su consideración el trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN TOPOGRÁFICA DEL CUADRICÓPTERO DJI PHANTOM 4 PRO, COMPARÁNDOLO CON EL EQUIPO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN FINCA "ANONAS" DEL MUNICIPIO DE IPALA, CHIQUIMULA.

El cual presento como requisito previo a optar al título de Ingeniero en Administración de Tierras, en el grado académico de Licenciado.

Atentamente

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Nery Alexander Garcia Pérez

201345355

Chiquimula, 30 de septiembre de 2019
Ref. TG-AT-08-2019

Ing. Agr. Edwin Filiberto Coy Córdón
DIRECTOR
Centro Universitario de Oriente
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable señor Director:

En atención a la designación efectuada según Acta de Aprobación de Tema de Trabajo de Graduación APT-01-2019 de fecha 18-02-2019, para asesorar al estudiante **NERY ALEXANDER GARCIA PÉREZ** con Registro Académico **201345355**, en el trabajo de graduación denominado **"DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN TOPOGRÁFICA DEL CUADRICÓPTERO DJI PHANTOM 4 PRO, COMPARÁNDOLO CON EL EQUIPO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN FINCA "ANONAS" DEL MUNICIPIO DE IPALA, CHIQUIMULA"**, tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he procedido a asesorar y orientar al sustentante sobre el contenido de dicho trabajo.

En mi opinión, el trabajo presentado reúne los requisitos exigidos por las normas pertinentes, razón por la cual recomiendo la aprobación del informe final para su discusión en el Examen General Público, previo a optar el título de **Ingeniero en Administración de Tierras**, en el Grado Académico de **Licenciado**.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Freddy Alexander Díaz Valdés
Colegiado No. 5,506

c.c. archivo
FADV / lm

D-TG-AT-177/2019

EL INFRASCRITO DIRECTOR DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE ORIENTE DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, POR ESTE MEDIO HACE CONSTAR QUE: Conoció el Trabajo de Graduación que efectuó el estudiante **NERY ALEXANDER GARCIA PÉREZ** titulado “**DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN TOPOGRÁFICA DEL CUADRICÓPTERO DJI PHANTOM 4 PRO, COMPARÁNDOLO CON EL EQUIPO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO EN FINCA “ANONAS” DEL MUNICIPIO DE IPALA, CHIQUIMULA**”, trabajo que cuenta con el aval de su Revisor y Coordinador de Trabajos de Graduación, de la carrera de Administración de Tierras. Por tanto, la Dirección del CUNORI con base a las facultades que le otorga las Normas y Reglamentos de Legislación Universitaria **AUTORIZA** que el documento sea publicado como **Trabajo de Graduación a Nivel de Licenciatura**, previo a obtener el título de **INGENIERO EN ADMINISTRACIÓN DE TIERRAS**.

Se extiende la presente en la ciudad de Chiquimula, a cuatro de noviembre de dos mil diecinueve.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Agr. Edwin Filiberto Coy Cordón
DIRECTOR
CUNORI – USAC



DEDICATORIA

A DIOS

Señor y dador de vida, Espíritu de la Biblia y Moral Universal. Protector, guía y camino de mis decisiones, haciendo de esta victoria absoluta. Eh Dios: ¿Recuerdas el día que tanto pedía en mis oraciones? Es hoy.

A MI MADRE:

Que me enseñó a ser un hombre y amar lo que me apasiona. Se convirtió en la piedra angular de mi dedicación y esmero, gracias por darme la oportunidad de ofrecer estas líneas en el fruto de su anhelo. Eh Sabina: ¿Recuerdas el día que tanto deseabas poder llegar a ver? Es hoy.

A MI PADRE:

Que me enseñó que si tenía que hacer algo, debía tomarme mi tiempo y hacerlo bien. Por supuesto Julio, esto también es para ti.

A MI TÍA:

Por cumplir con responsabilidades que no pidió adquirir, sin menoscabo de sus propias tareas. Ha sido y es esa segunda madre que siempre necesité. Gracias Lugarda del Carmen, por alimentarme y hacer de mí un hombre feliz.

A MI ABUELA:

Evangelina o Angela, no importa, para mí siempre será Mamallita, a secas. De no ser por sus consejos no amaría la vida y no la tomaría por los cuernos. Gracias por enseñarme a ser libre.

A MI HERMANA:

Mi gran amiga, porque juntos hemos vivido buenos y malos momentos, aun así, tu amor y apoyo ha sido incondicional. Eh Dania: Eso que tanto quieres, con el tiempo lo lograrás.

AGRADECIMIENTOS

A LA JOVEN:

Me prometí agradecer, y cumpliré la promesa. Gracias Jenny Lee por su amor, su apoyo y su tiempo. Por los momentos vividos juntos, me han hecho crecer, madurar, pero, sobre todo, sin temor a equivocarme, ser una mejor persona.

A MIS HERMANOS:

¿Qué buscan, viejos amigos? Después de tantos años, sueños que albergan bajo cielos ajenos muy lejos de su tierra. Gracias por su apoyo, su papel no lo paso de soslayo, me enseñaron convicción y determinación.

MIS ABUELOS:

Por enseñarme el valor de la unidad, la perseverancia y el amor a la familia. Abue Nela y Abue Celso, los llevo hasta en los huesos.

A MIS ASESORES:

Ing. en AT. Freddy Díaz y Ing. Agr. Sergio Albizurez, por el tiempo dedicado, su compromiso y sus aportes de experiencia en la consecución del trabajo.

A MIS DOCENTES:

Por los conocimientos ofrecidos y el esmero en su enseñanza. Gracias por su amistad y experiencias compartidas.

A las personas que de una u otra manera son afines a mi realización personal y a este trabajo, gracias por su amistad. Si seguí adelante fue gracias a los ánimos que me disteis, si mejoré fue gracias a vuestras críticas, si no los menciono a todos, perdón:

KEVIN ROMEO LÓPEZ, JORGE SANCÉ, CRISTIAN SANDOVAL, KEVIN RAMÍREZ, JUNIOR GALICIA, ZULMY MANCHAMÉ, MILENA MÉNDEZ, ROGER SARCEÑO, ALCIDES CABRERA, FLORY LEE, SUSY ARRAZOLA, JOHN LABOR, JEOVANI ROSA, CÉSAR FLORES, CARLOS GUANCÍN.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO CONCEPTUAL	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Definición del problema	6
2.3. Justificación	7
III. MARCO CONCEPTUAL	9
3.1. Términos asociados a la investigación	9
3.1.1. Precisión	9
3.1.2. Exactitud	9
3.1.3. Precisión relativa	9
3.1.5. Precisión absoluta	9
3.1.6. Fotointerpretación	9
3.1.7. Ground Sampling Distance (GSD)	9
3.1.9. Traslape longitudinal y transversal	10
3.1.10. Modelo Digital de Superficie (MDS)	11
3.1.11. Modelo Digital del Terreno (MDT)	11
3.1.12. Ortofoto	11
3.2. Topografía	11
3.2.1. Importancia de la topografía	12
3.3. Divisiones de la topografía	12
3.3.1. Planimetría	12
3.3.2. Altimetría	13
3.3.2.1. Cota	13

3.4. Levantamientos topográficos	13
3.4.1. Poligonales	14
3.5. Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS)	15
3.5.1. Métodos de medición con el sistema de navegación global por satélites (GNSS)	16
3.5.1.1. Método Estático	16
3.5.1.2. Método Cinemático	16
3.6. Red de apoyo catastral	17
3.7. Sistema de referencia	17
3.7.1. Sistema de referencia World Geodetic System 1984 (WGS84)	17
3.7.1.1. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)	18
3.7.1.2. Proyección Guatemala Transversal Mercator (GTM)	18
3.8. Fotogrametría	19
3.8.1. Levantamiento fotogramétrico	19
3.8.2. Imagen digital	20
3.8.3. Píxel	21
3.8.3.1. Megapíxel	22
3.8.4. Cámara digital	22
3.9. Proceso fotogramétrico	23
3.9.1. Orientación interna	23
3.9.2. Orientación relativa	23
3.9.3. Orientación absoluta	23
3.10. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs, drones)	23
3.10.1. Dron multirotor	24
3.10.2. Componentes estructurales de los drones	24
3.11. Plan de vuelo fotogramétrico con dron	27

3.12. AutoCAD	27
3.13. ArcGIS	27
3.14. Pix4D Mapper	28
IV. MARCO REFERENCIAL	29
4.1. Descripción del área de estudio	29
4.2. Ubicación y localización	29
4.3. Ubicación política	31
V. MARCO METODOLÓGICO	32
5.1. Objetivos	32
5.1.1. General	32
5.1.2. Específicos	32
5.2. Metodología	32
5.2.1. Fase I: Levantamiento topográfico y geodésico	34
5.2.1.1. Vértices de inicio y final del tramo de interés	34
5.2.1.1.1. Geoposicionamiento de la red de apoyo	35
5.2.1.1.2. Pos proceso de vértices	35
5.2.1.2. Levantamiento topográfico georreferenciado	36
5.2.1.2.1. Puntos de control y/o verificación terrestre	36
5.2.1.2.2. Número y distribución	37
5.2.1.2.3. Medición topográfica	37
5.2.2. Fase II: Levantamientos fotogramétricos con dron	38
5.2.2.1. Diseño de vuelos	38
5.2.2.2. Planificación y programación de vuelos	41
5.2.2.3. Ejecución de vuelos	42
5.2.3. Fase III: Procesos fotogramétricos	43

5.2.3.1. Ejecución de procesos fotogramétricos	45
5.2.3.2. Procesamiento en Pix4D Mapper	47
5.2.4. Fase IV: Análisis de los resultados	48
VI. RESULTADOS	50
6.1. Levantamiento topográfico y geodésico	50
6.1.1. Levantamiento de la red de apoyo	50
6.1.2. Levantamiento topográfico	51
6.2. Levantamientos fotogramétricos	54
6.3. Procesos fotogramétricos	58
6.4. Análisis	63
6.4.1. Cotejo de coordenadas X y Y a 50 metros de altura	63
6.4.2. Cotejo de distancia y elevación a 50 metros de altura	66
6.4.3. Cotejo de coordenadas X y Y a 120 metros de altura	70
6.4.4. Cotejo de distancia y elevación a 120 metros de altura	71
6.4.5. Cotejo de coordenadas X y Y a 200 metros de altura	75
6.4.6. Cotejo de distancia y elevación a 200 metros de altura	76
6.4.7. Cotejo de áreas entre equipo geodésico y vuelo a 120 metros de altura con 7 puntos de control terrestre (7GCP)	79
VII. CONCLUSIONES	81
VIII. RECOMENDACIONES	83
IX. BIBLIOGRAFÍA	84
X. ANEXOS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
1. Altura y GSD proyectados en el estudio	39
2. Resumen de datos analizados	48
3. Coordenadas resultantes del pos proceso de la red de apoyo	50
4. Síntesis de vuelos fotogramétricos	54
5. Descripción de proyecto 50 metros de altura	55
6. Descripción de proyecto 120 metros de altura	56
7. Descripción de proyecto 200 metros de altura	57
8. Síntesis procesamiento 50 metros	58
9. Síntesis procesamiento 120 metros	60
10. Síntesis procesamiento 200 metros	62
11. Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 50 metros	63
12. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 50 metros de altura sin GCP y con 5 GCP	66
13. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 50 metros de altura con 7 y 8 GCP	67
14. Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 120 metros	70
15. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 120 metros de altura sin GCP y con 5 GCP	72
16. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 120 metros de altura con 7 y 9 GCP	73
17. Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 200 metros	75
18. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 200 metros de altura sin GCP y con 5 GCP	77
19. Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 200 metros de altura con 7 y 9 GCP	78
20. Cotejo de área, perímetro y vértices de vuelo a 120 metros	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1. Cronología de los nombres aplicados a los drones	3
2. Ejemplo de traslape frontal y lateral	10
3. Composición de una imagen digital.	21
4. Rotación de motores del dron	25
5. Descripción del área de estudio	29
6. Mapa de ubicación de área de estudio	30
7. Diagrama metodológico de la investigación	33
8. Superposición y trayectoria de los vuelos	40
9. Superposición entre diferentes vuelos con dron	40
10. Diana utilizada para los GCP y CP	41
11. Diagrama de procesos fotogramétricos	44
12. Proceso de control de calidad en procesos fotogramétricos	46
13. Diagrama de procesamiento en Pix4D Mapper	47
14. Diseño de la red de apoyo geodésica	51
15. Puntos de control terrestre con estación total	52
16. Puntos de verificación terrestre con estación total	53
17. Vuelos de proyecto a 50 metros	55
18. Vuelos de proyecto a 120 metros	56
19. Vuelos de proyecto a 200 metros	57
20. Error de calibración de imágenes en áreas de vegetación densa	59
21. Traslape entre imágenes de proyecto a 50 metros	59
22. Calibración de imágenes a 120 metros de altura	61
23. Traslape en proyecto a 120 metros	61
24. Diferencia de posicionamiento entre estación total y 50 metros sin GCP	64
25. Diferencia de posicionamiento entre estación total y 50 metros con 5, 7 y 8 GCP	65
26. Perfiles de estación total vs vuelo a 50 metros de altura	68
27. Clasificación de área conflictiva	69
28. Diferencia de posicionamiento entre estación total y 120 metros	71

29.	Perfiles de estación total vs vuelo a 120 metros de altura	74
30.	Diferencia de posicionamiento entre estación total y 200 metros	76
31.	Perfiles de estación total vs vuelo a 200 metros de altura	79
32.	Cotejo de áreas entre equipo geodésico y vuelo a 120 metros de altura	80

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la topografía ha tenido evoluciones significativas, con técnicas e instrumentos que permiten realizar mediciones directas o indirectas de la superficie terrestre, de una manera más rápida y obteniendo resultados cada vez más precisos y confiables. El uso de equipos topográficos como la estación total es cada vez más común en la ejecución de los levantamientos topográficos permitiendo realizar mediciones precisas, pero las jornadas de realización de los levantamientos son largas y requieren de varias personas para su ejecución. En segundo lugar, se ha popularizado el uso de los sistemas de posicionamiento por satélite (GNSS), lo cual coadyuva en que la toma de información en el campo sea cada vez más fácil, segura y genere resultados de mayor calidad en cuanto a la certidumbre de los datos recolectados.

Por otra parte, la fotogrametría y fotointerpretación son campos ya estudiados desde hace más de medio siglo. No obstante, la aplicación o implementación de aeronaves de menor envergadura como son los UAV y entre estos el uso de drones para tareas de topografía a menor escala es relativamente nuevo.

En la búsqueda de la más fiable representación del entorno se requirió aplicar metodologías que permitieran evaluar la calidad de productos cartográficos finalizados, teniendo como eje comparativo los métodos topográficos tradicionales concluyendo finalmente de qué manera estos nuevos productos pueden ser integrados en el mercado de la construcción.

En la siguiente investigación se determinó el nivel de certeza, coincidencia y confiabilidad de los datos espaciales generados mediante vuelos con dron, en comparación con la topografía convencional. Para ello, se describió una metodología para la aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos haciendo uso de fotografías obtenidas con vehículos aéreos no tripulados. Esta metodología comprendió las etapas: a) levantamiento topográfico y geodésico, b) vuelos fotogramétricos y c) procesos fotogramétricos. Además, se incluyó la etapa de presentación de resultados finales, detallando cada una de ellas con una secuencia lógica y ordenada.

Los resultados se resumen principalmente en valores X, Y y Z extraídos de Modelos Digitales de Elevación (DEM), Nubes de Puntos y Ortomosaicos; generados variando la altura de vuelo y la cantidad de puntos de control obtenidos con topografía convencional. En oficina, se realizó el procesamiento fotogramétrico utilizando el software Pix4D Mapper, dedicado al mapeo profesional de drones.

El análisis de los datos reflejó una relación directa entre la precisión y la cantidad de puntos de control terrestre utilizados, es decir, a más puntos de control mejor precisión. Aunado a esto, la altura de vuelo con mejores resultados fue la intermedia (120 metros), mejorando la posición y desplazamiento del modelo fotogramétrico por 1 píxel (3 cm, aproximadamente) para todas las posiciones: x, y y z. Con el vuelo a 200 metros se perdió resolución, por ende, calidad en los productos; el proyecto a 50 metros de altura presentó errores en los procesos fotogramétricos dada su alta resolución: las imágenes no se calibraron correctamente, por consiguiente, fue el modelo con mayores imprecisiones.

A pesar de la fiabilidad de la inclusión de la tecnología dron en el campo de la topografía, la investigación concluye que no sustituye las técnicas de medición convencionales, pero sí las innova y ofrece una manera distinta de trabajar. Sin embargo, únicamente es una herramienta de apoyo para proyectos de gran envergadura sujeta a topografía clásica.

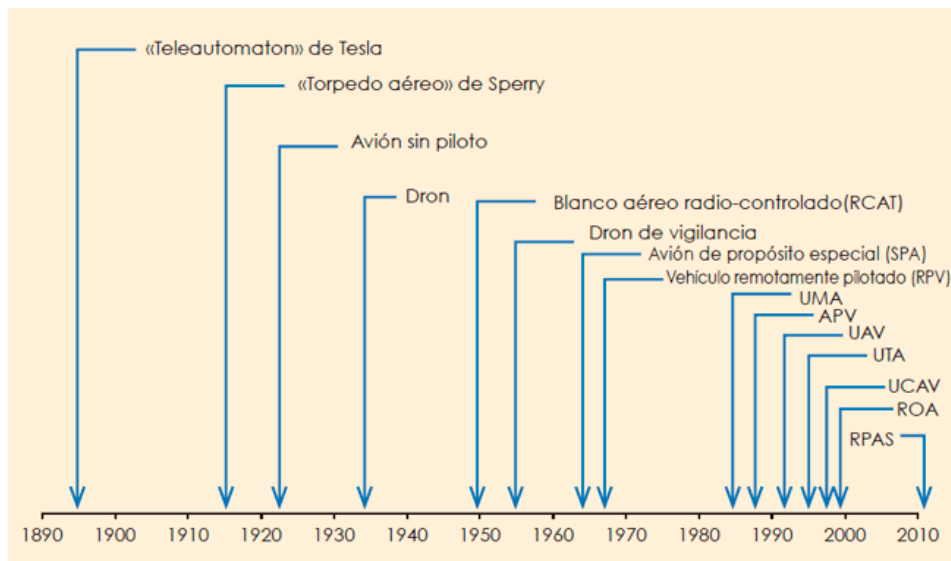
II. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Antecedentes

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) no son algo que se haya descubierto en las últimas décadas, ya que desde el siglo XIX se utilizaban con fines militares vehículos de este tipo. Por ejemplo, el 22 de agosto de 1849 se utilizó un UAV consistente en un globo no tripulado para enviar 2 bombas desde Austria a Venecia. Posteriormente llegaron los misiles crucero, controlados por un sistema de giroscopios durante la Primera Guerra Mundial y los aviones radiocontrolados utilizados para entrenar a los tiradores británicos antiaéreos durante la Segunda Guerra Mundial (Mora, 2013).

Según FENERCOM (2015), el término vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) se hizo común en los años 90 para describir las naves robóticas; reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV), el cual fue utilizado durante la guerra de Vietnam y con posterioridad.

Los términos UAV y RPV, únicamente son dos nombres entre los muchos que han recibido las aeronaves robóticas no tripuladas a lo largo de su existencia. En la siguiente figura se representa gráficamente la cronología de estos:



Fuente: FENERCOM, 2015.

Figura 1: Cronología de los nombres aplicados a los drones

Como se mencionó anteriormente, la Segunda Guerra Mundial fue precursora del desarrollo de aeronaves por la necesidad de controlar territorio aéreo. Tras su final, 52 países se reunieron con el objeto de llegar a acuerdos comunitarios e impulsar la tecnología y aplicaciones dentro de la aviación. De este encuentro surge el Convenio sobre Aviación Civil Internacional, más conocido como el Convenio de Chicago, base fundamental de regulación de la aviación civil en el mundo.

De la figura 1, es pertinente mencionar el último acrónimo (RPAS); pues en 2011, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), publicó su Circular 328, en la cual por primera vez reconoció las aeronaves no tripuladas como aeronaves. De esta manera, se acuñaron los términos que a continuación se detallan, y que hoy en día tienen validez y aplicación internacional:

- Aeronave pilotada remotamente (Remotely Piloted Aircraft, RPA): aeronave en la que el piloto no está a bordo.
- Sistema de aeronave pilotada remotamente (Remotely Piloted Aircraft System, RPAS): conjunto de elementos configurables formado por un RPA, su estación de pilotaje remoto, el sistema de enlace de mando y control (OACI, 2011).

Para Ciraiz (2001), el derecho aeronáutico guatemalteco, desde sus inicios ha sido un derecho internacional; pues Guatemala es uno de los Estados fundadores de la OACI y, su convenio internacional fue la base para el desarrollo de la aviación civil guatemalteca desde 1947 hasta 1963, año en el cual se crea la primera Ley de Aviación Civil en el país. Es en este año -1947- que el OACI exige a todos los Estado miembros, contar con una dirección de aviación civil, de esta manera se crea la Dirección General de Aeronáutica Civil, DGAC.

Se entiende que la DGAC es la entidad rectora de la aviación civil, y es quien se encarga de crear y modificar las Regulaciones de Aviación Civil (RAC) y la supervisión de los procedimientos de la aviación, además es quien aprueba o rechaza las licencias, las matrículas de las aeronaves, la inscripción de aeronaves, de las rutas a seguir y todo aquello que tenga relación con la aviación civil en Guatemala (Barrios, 2017).

Recientemente, Villalobos (2015), menciona que los drones se apoderarán del cielo dadas sus múltiples aplicaciones civiles -entretenimiento, agrícola, arquitectónico, arqueológico, infraestructura, construcción, etcétera-. De forma reciente, la Coordinadora

Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), los emplea para evaluar deslizamientos, inundaciones, posibles incendios forestales o daños en las estructuras de un sismo. De igual manera, en mayo de 2014, el Ministerio de Gobernación anunció la instalación de cámaras de seguridad de alta definición en estos vehículos; que son capaces de identificar rostros mediante un enlace con la base de datos biográfica del Registro Nacional de las Personas (RENAP) y cotejarlos con los archivos de la Policía Nacional Civil (PNC) en materia de antecedentes.

Con el objeto de unificar criterios dentro del campo aeronáutico nacional, se emitió el reglamento RAC-101, pues era necesario regular la demanda de operaciones de aeronaves no tripuladas ya utilizadas en el país. Este, entre otros temas, trata lo siguiente: restricciones de vuelo en áreas específicas, altura de vuelo de 400 pies (122 metros), licencia de operador de aeronaves, multas y sanciones, etcétera (DGAC, 2013).

En el campo de la topografía, la estación total y el GPS geodésico son las herramientas más valiosas para llevar a cabo los levantamientos, pero según Geodrones (2018), los drones son un complemento de las técnicas convencionales, sugiere que con ellos no se hace directamente topografía, sino más bien se toman fotografías superpuestas y se utiliza el principio de estereoscopía para medir distancias y elevaciones.

Para la empresa suiza Pix4D (paquete de software de fotogrametría único para el mapeo de drones) los UAV son ideales para mediciones de volumen de existencias con una diferencia media de sólo unos centímetros en comparación con la superficie obtenida con puntos de prueba terrestres o GNSS.

Si bien los métodos de topografía tradicionales siguen siendo una alternativa interesante para las superficies pequeñas, la fotogrametría UAV es inigualable en términos de eficiencia para superficies por encima de varias hectáreas, al tiempo que produce una precisión equivalente. Además, el uso del método de topografía UAV no sólo produce un DSM, sino también un ortomosaico geo-referenciado, altamente detallado, un valor añadido importante para la documentación del sitio de existencias (Draeyer, 2014).

2.2. Definición del problema

Los ingenieros, a lo largo de su carrera profesional manejan información cartográfica obtenida en gran parte por técnicas fotogramétricas. El proceso fotogramétrico comienza con la toma fotográfica de la zona y termina con la obtención de coordenadas tridimensionales. Las coordenadas obtenidas dan lugar a distintos productos como planos cartográficos, modelos digitales de elevación, ortofotos, entre otros (Quirós, 2014).

Villarreal Moncayo (2015), menciona que en la actualidad el uso de vehículos aéreos no tripulados o Unmanned Aerial Vehicle (UAV), denominados drones, se ha incrementado significativamente en diversos campos de la ciencia, debido a la evolución tecnológica de la civilización, pudiendo utilizarse en levantamientos topográficos o cartográficos. Estos vehículos cuentan con un programa de vuelo y una cámara fotográfica programada para tomar fotos desde una determinada altitud, por lo cual es recomendable disponer de un vuelo autónomo programado.

Los mapas topográficos cumplen con muchas funciones dentro de la ingeniería como por ejemplo en trabajos de replanteos, el diseño o modificación de obras civiles, los movimientos de tierra, los cálculos de volumen, uso del suelo, venta de terrenos, hidrología, gestión de cuencas hidrográficas, etc. Los estudios fotogramétricos a partir de vehículos aéreos no tripulados representan un extraordinario apoyo, debido a que disminuye considerablemente tiempo y costos en levantamientos topográficos, generando productos geoespaciales valiosos en diversas áreas de la ciencia (Corredor, 2015).

De acuerdo con Claros et al. (2016), la demanda de estos datos topográficos es grande debido a la constante ejecución de proyectos de obra civil que requieren del conocimiento de la topografía de la superficie. Comenta que hoy en día, los estudios topográficos mayoritariamente se realizan de forma convencional, sin embargo, con la llegada de los drones, se han agilizado procesos y ampliar los productos obtenidos; logrando caracterizar geoespacilamente la zona de estudio, no obstante, es imprescindible determinar qué tan eficientes son en cuanto a precisión y calidad.

Por consiguiente, la pertinencia de la tecnología dron en el campo de la topografía, aún debe vencer obstáculos estrictamente técnicos para brindar certeza en la calidad de sus productos.

Con todo lo mencionado resulta necesario investigar y analizar las técnicas y procedimientos que el uso de aeronaves implica. A consecuencia de ello, la presente investigación pretende generar credibilidad en la utilización de drones en los trabajos topográficos y así, promover la tecnología como alternativa y/o complemento a la topografía convencional. Esto, a través del empleo de técnicas fotogramétricas de adquisición de imágenes aéreas y su posterior procesamiento para la obtención de condicionantes espaciales (X, Y y Z) dentro de un área de estudio que nos permita medir el grado de certeza de la información. También, se analizarán los datos arrojados de vuelos con dron en un ambiente controlado por técnicas topográficas convencionales. De esta manera, se comparará la similitud de la información generada; consecuentemente se determinará el nivel de confiabilidad con que trabaja el modelo UAV a evaluar.

2.3. Justificación

Para Claros et al. (2016), la ingeniería civil, en su campo de aplicación (infraestructura, urbanismo, construcción, obras hidráulicas, etc.), ha tenido desde sus inicios el compromiso de proyectar, diseñar, analizar, construir y dar mantenimiento a proyectos que satisfagan en funcionalidad y confiabilidad las necesidades de una población o comunidad. Diseñar y ejecutar proyectos de obra civil requiere analizar la topografía del lugar, pues es necesario conocer la planimetría y altimetría del terreno.

En este sentido, la ejecución de cualquier obra o construcción requiere seguimiento continuo que permita la supervisión geométrica en su fase inicial y final. Esto se logra a través de mediciones empleando técnicas de topografía clásica y fotogrametría. Según las características de cada proyecto se presentan limitaciones de tiempo y recursos y la elección del equipo y metodología de trabajo son claves en el éxito del mismo (FENERCOM, 2015).

La aplicación de vehículos aéreos no tripulados (UAV, dron) en diferentes disciplinas (higrología, topografía, agricultura, comunicación, entre otros) ha permitido cubrir campos en los que la fotografía aérea es una alternativa para medición y procesamiento, en este caso mucho más económico en tiempo y costo para obtener información topográfica, mediante imágenes y aplicando técnicas fotogramétricas. Midiendo puntos de apoyo y procesando las imágenes aéreas con un software específico se pueden crear modelos

digitales de elevación -MDE-, mosaicos ortorectificados y georreferenciados, nubes de puntos de alta resolución, modelos en 3D con precisión centimétrica, cálculo de curvas de nivel, medición de áreas y volúmenes y diversos productos que muestran la apariencia real del terreno (Ferreira, 2015).

Con la intención de medir las precisiones planimétricas y altimétricas generadas con este tipo de equipo, se plantea un estudio enfocado en la aplicación de tecnología de drones en topografía y de esta manera distinguir con claridad la potencialidad que presenta en la resolución de problemas concretos, en un área de actividad específica. Lo cual, no solo permitirá aumentar la eficiencia de los proyectos, sino planificar con mejores resultados las estrategias de los mismos en el menor tiempo posible. Esto, logrado a través de la utilización de un dron de gama media en la adquisición de imágenes aéreas, datos espaciales y su posterior análisis mediante software que permita convertir información en un ambiente topográfico.

Consecuentemente, se adquirirán los conocimientos necesarios sobre la aplicación del mapeo con drones en obras civiles; permitiendo al profesional dedicado a la medición y representación de terrenos comprender las bondades de la implementación de la técnica y tener un nuevo enfoque sobre la facilidad de adquirir información de la superficie terrestre mediante un método indirecto con resultados confiables en tiempos menores que los requeridos por métodos directos de medición topográfica.

III. MARCO CONCEPTUAL

3.1. Términos asociados a la investigación

3.1.1. Precisión

Se refiere al grado de refinamiento o consistencia de un grupo de mediciones y se evalúa en base en la magnitud de las discrepancias. Si se hacen mediciones múltiples de la misma cantidad y surgen pequeñas discrepancias, esto refleja una alta precisión.

3.1.2. Exactitud

Denota una absoluta aproximación de las cantidades medidas a sus verdaderos valores (Bojorquez, 2016).

3.1.3. Precisión relativa

Describe cómo de consistente es el modelo fotogramétrico consigo mismo. Se define como el error que existe en la posición relativa entre dos puntos dentro de la zona del levantamiento y su correspondiente en la realidad.

3.1.5. Precisión absoluta

Describe cómo de bien encaja el modelo con la tierra. Se define como el error que existe entre un punto del levantamiento y ese mismo punto medido, respecto a un punto de referencia de la red geodésica nacional.

3.1.6. Fotointerpretación

Consiste en el examen de las imágenes fotográficas, con el objetivo de identificar rasgos y determinar su significado. Identificando las fotografías por medio de sus características físicas, características de rasgos y objetos, topográficas, geomorfológicas y características de la vegetación (Solis, 2016).

3.1.7. Ground Sampling Distance (GSD)

La Distancia de Muestreo en el Suelo (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Cuanto mayor sea el valor de la imagen GSD, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles menos visibles. El GSD está

relacionado con la altura del vuelo: cuanto mayor sea la altitud del vuelo, mayor será el valor GSD.

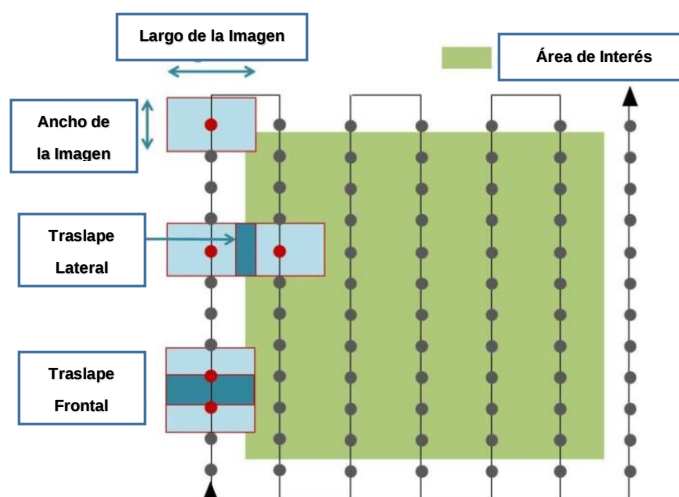
Ejemplo:

- Un GSD de 5 cm significa que un píxel en la imagen representa linealmente 5 cm en el suelo ($5 * 5 = 25$ centímetros cuadrados).
- Un GSD de 10 m significa que un píxel en la imagen representa linealmente 10 m en el suelo ($10 * 10 = 100$ metros cuadrados).

Incluso cuando se vuela a una altura constante, las imágenes de un proyecto pueden no tener el mismo GSD. Esto se debe a las diferencias de elevación del terreno y los cambios en el ángulo de la cámara durante el disparo. Dado que el ortomosaico se crea utilizando la nube de puntos 3D y las posiciones de la cámara, se calculará y utilizará un GSD promedio (Pix4D, 2011).

3.1.9. Traslape longitudinal y transversal

El objeto de los recubrimientos fotográficos es el de poder aplicar el principio de la visión estereoscópica a los fotogramas aéreos. Se denomina traslape, a la superposición parcial de las fotografías tomadas por el dron, en la realización de un levantamiento fotogramétrico. El mismo que debe ser de manera frontal y lateral, quiere decir entre foto y foto y entre pasada y pasada, de acuerdo a las líneas de vuelo. Ejemplificado en la siguiente figura (Claros et al., 2016).



Fuente: Pix4D, 2011.

Figura 2: Ejemplo de traslape frontal y lateral

3.1.10. Modelo Digital de Superficie (MDS)

Modelo continuo que refleja la superficie del terreno teniendo en cuenta la altura de la infraestructura y de los árboles.

3.1.11. Modelo Digital del Terreno (MDT)

Superficie continua que refleja el terreno topográfico o altura del terreno mismo, donde desarrollan sus actividades los humanos, este queda limpio de infraestructura y de árboles.

3.1.12. Ortofoto

Imagen obtenida de manera ortogonal al terreno, sin distorsión que le permite al usuario medir longitudes y áreas con muy poco error. Su resolución se mide en cm/píxel.

3.2. Topografía

Se define la topografía (del griego: topos, lugar y graphein, describir) como la ciencia que trata de los principios y métodos empleados para determinar las posiciones relativas de los puntos de la superficie terrestre, por medio de medidas, y usando los tres elementos del espacio. Estos elementos pueden ser: dos distancias y una elevación, o una distancia, una dirección y una elevación. En general, es una aplicación de la geometría y, por tanto, sin el conocimiento de esta ciencia, sería imposible que aquella llenara el cometido que tiene asignado. (Claros et al., 2016).

Farjas (2009), entiende la topografía como el conjunto de principios, métodos, instrumentos y procedimientos utilizados para la determinación del entorno, dimensiones y posición relativa de una porción limitada de la superficie terrestre, del fondo de los mares y del interior de las minas. También compete a la topografía el replanteo de proyectos.

Las definiciones anteriormente reseñadas, extraídas de textos fundamentales, nos permiten estudiar las características de la disciplina. De ambas podemos constatar la coincidencia en cuanto a la fuente de datos (la superficie de la tierra) a la forma de adquirir la información (realizando medidas según métodos determinados) y en cuanto al objetivo a conseguir (representar las características y la geometría del terreno).

3.2.1. Importancia de la topografía

Claros et al. (2016), menciona que la topografía es una de las artes más antiguas e importantes porque, como se ha observado, desde los tiempos más remotos ha sido necesario marcar límites y dividir terrenos. En la era moderna, la topografía se ha vuelto indispensable. Los resultados de los levantamientos topográficos de nuestros días se emplean para:

- Elaborar mapas de superficies terrestres, arriba y abajo del nivel del mar.
- Trazar cartas de navegación aérea, terrestre y marítima.
- Deslindar propiedades privadas y públicas.
- Crear bancos de datos con información de recursos naturales y utilización de la tierra, para ayudar a la mejor administración y aprovechamiento de nuestro ambiente físico.

Se entiende que desarrolla un papel sumamente importante en muchas ramas de la ingeniería, por ejemplo, los levantamientos topográficos son indispensables para planear, construir y mantener carreteras, sistemas viales de tránsito, edificios, puentes, base de lanzamiento de cohetes y estaciones astronáuticas, estaciones de rastreo, túneles, etc.

3.3. Divisiones de la topografía

Para que sea completa la representación gráfica de una porción de la superficie terrestre deberá contener:

- La forma general del terreno, o sea, su contorno o perímetro y los detalles interiores (construcciones, caminos, puentes, ríos, etc.).
- La diferencia de altura que guardan los puntos del terreno, unos respecto a otros.
- La superficie del terreno.

Jiménez (2007), establece que según las operaciones que se ejecutan para representar el terreno, se divide la topografía en:

3.3.1. Planimetría

Se refiere a la posición de puntos y su proyección sobre un plano horizontal. Se llama planimetría a la parte del trabajo topográfico que consiste en determinar la situación de los puntos del terreno en el plano XY.

La planimetría estudia los puntos de la superficie terrestre para proyectarlos sobre un plano horizontal, llamado plano de referencia. Para representar un punto en un plano, es decir, en un espacio bidimensional, es necesario establecer un sistema de referencias que nos sitúe los puntos medidos respecto a un origen común.

3.3.2. Altimetría

La altimetría considera las diferencias de nivel existentes entre puntos de un terreno o una construcción. Para poder conocer estas diferencias de nivel hay que medir distancias verticales, directa o indirectamente, operación que se denomina nivelación.

Todas las alturas de un trabajo de topografía, están referidas a un plano común de referencia. Este plano llamado de comparación es una superficie plana imaginaria, cuyos puntos se asumen con una elevación o altura de cero.

3.3.2.1. Cota

Se denomina cota, elevación o altura de un punto determinado de la superficie terrestre a la distancia vertical que existe desde el plano de comparación a dicho punto.

Comúnmente se usa como plano de comparación el del nivel medio del mar, que se establece por medio de un gran número de observaciones en un aparato llamado mareógrafo a través de un largo período de años. En los trabajos topográficos, dada su limitada extensión superficial, el plano de comparación no es necesariamente el nivel medio del mar, sino que el operador lo elige a su arbitrio, procurando que todas las cotas resulten positivas para comodidad del cálculo.

3.4. Levantamientos topográficos

De acuerdo con Claros et al. (2016), son el conjunto de operaciones necesarias para determinar posiciones sobre la superficie de la Tierra, de las características naturales y/o artificiales de una zona determinada y establecer la configuración del terreno. El procedimiento a seguir en los levantamientos topográficos comprende dos etapas fundamentales:

- ❖ El trabajo de campo, que es la recopilación de los datos. Esta recopilación fundamentalmente consiste en medir ángulos horizontales y/o verticales y distancias horizontales o verticales.

- ❖ El trabajo de gabinete o de oficina, que consiste en el cálculo de las posiciones de los puntos medidos y el dibujo de los mismos sobre un plano. La mayor parte de los levantamientos, tienen como objeto el cálculo de superficies y volúmenes, y la representación de las medidas tomadas en el campo mediante perfiles y planos.

Para llevarlos a cabo, se necesita de:

3.4.1. Poligonales

Consiste en la determinación de la posición de puntos topográficos o geodésicos mediante el trazado de líneas quebradas, sobre un lugar determinado (Jiménez, 2007).

Para Farjas (2009), una poligonal es una sucesión encadenada de radiaciones, donde se debe obtener como resultado final las coordenadas (X, Y, Z) de los puntos de estación. Se parte de un punto de coordenadas conocidas y se llega a otro también de coordenadas conocidas. Desde el punto inicial y final se visará a una referencia, también de coordenadas conocidas, como mínimo. Las estaciones de la poligonal tendrán que:

- Estar relacionadas entre sí (acimutes y distancias).
- tener intervisibilidad entre ellas.
- poder desempeñar el trabajo para el que se ha diseñado la poligonal, desde los puntos de estación.

Según Jiménez (2007), una poligonal es una sucesión de líneas quebradas, conectadas entre sí en los vértices. Para determinar la posición de los vértices de una poligonal en un sistema de coordenadas rectangulares planas, es necesario medir el ángulo horizontal en cada uno de los vértices y la distancia horizontal entre vértices consecutivos.

En forma general, las poligonales se clasifican en:

- Poligonales Cerradas: En las cuales el punto de inicio es el mismo punto de cierre, proporcionando por lo tanto control de cierre angular y lineal.
- Poligonales Abiertas: De enlace con control de cierre en las que se conocen las coordenadas de los puntos inicial y final, y la orientación de las alineaciones inicial y final, siendo también posible efectuar los controles de cierre angular y lineal.

- **Poligonales Abiertas Sin Control:** En las cuales no es posible establecer los controles de cierre, ya que no se conocen las coordenadas del punto inicial y/o final, o no se conoce la orientación de la alineación inicial y/o final.

Productos generados por los levantamientos

Los productos finales de la topografía son, en su gran mayoría, de carácter gráfico, es decir, dibujos a escala de los detalles resaltantes del levantamiento, sobre un determinado tipo de papel, o bien dibujos realizados mediante un programa adecuado, generalmente un CADD (de las siglas en inglés ComputerAided Design and Drafting). Dentro de ellos podemos encontrar:

- **Mapas base y topográficos:** El mapa es una representación convencional, generalmente plana, de fenómenos concretos o abstractos localizables en el espacio (Charfen, 2015)
- **Curvas de nivel:** Se llama curvas de nivel a una línea imaginaria cuyos puntos están todos a la misma altura sobre un plano de referencia, pudiendo considerarse como la intersección de una superficie de nivel con el terreno.
- **Modelos digitales:** Es la representación numérica (el computador la presenta como gráfica) de la superficie del terreno. La representación más corriente es la que se genera por medio de un conjunto seleccionado de puntos (x, y, z) pertenecientes a la superficie considerada y por los algoritmos de interpolación que permiten la recreación de su forma en una determinada zona.
- **Perfiles longitudinales y transversales:** Los perfiles longitudinales y transversales constituyen el punto de partida para la planeación detallada y el replanteo de vías de comunicación (caminos), así como para el cálculo de rellenos y un trazo óptimo de las rutas con respecto a la topografía (Farjas, 2009).

3.5. Sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS)

España (2013), comenta que el sistema de navegación global por satélite es el acrónimo que se refiere al conjunto de tecnologías de sistemas de navegación por satélite que proveen de posicionamiento geoespacial con cobertura global de manera autónoma. Los sistemas -GNSS- existentes son el GPS, GLONASS y el reciente Galileo. Es decir, los

sistemas que son capaces de dotar en cualquier punto y momento de posicionamiento espacial y temporal.

Los GNSS tienen una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos:

- Segmento espacial: compuesto por los satélites que forman el sistema, tanto de navegación como de comunicación. Mientras que los primeros orbitan alrededor de la Tierra, repartiéndose en distintos planos orbitales, los segundos son los que forman los llamados sistemas de aumento que sirven para la corrección de errores de posicionamiento.
- Segmento de control: formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites. Este segmento es complejo en su definición, siendo propio de cada país o coalición de países, y estructurándolos en función de distintos criterios como más convenga.
- Segmento de Usuario: Formado por los equipos GNSS que reciben las señales que proceden del segmento espacial (García, 2008).

3.5.1. Métodos de medición con el sistema de navegación global por satélites (GNSS)

Debido a sus numerosas ventajas en materia de precisión, rapidez, versatilidad y productividad, los sistemas de medición GPS se han vuelto muy populares en el sector de la topografía. No obstante, debe tenerse en cuenta que las técnicas empleadas son muy diferentes a las de los procesos clásicos.

3.5.1.1. Método Estático

Utilizado para líneas base largas, redes geodésicas, estudios de tectónicas de placas y otros. Ofrece precisión alta en distancias largas, pero es comparativamente lento (Leica, 2003).

3.5.1.2. Método Cinemático

Empleado para levantamiento de detalles y para la medición de muchos puntos en sucesión corta (caminos). Es una técnica muy eficiente para medir muchos puntos que están muy cerca uno del otro (García, 2008).

3.6. Red de apoyo catastral

Consiste en una red geoméricamente triangular de puntos georeferenciados por el Registro de Información Catastral -RIC- en común acuerdo y enlazados con la red geodésica nacional establecida por el Instituto Geográfico Nacional -IGN-.

Esta red cuenta con una clasificación de tres tipos de acuerdo a la precisión y distancia entre vértices que la conforman. A continuación, se detallan las características de los tres tipos de red de ajuste catastral:

- Red de apoyo catastral tipo 1 (RAC 1): establecidas por el RIC y referenciadas a la red geodésica nacional. Las mismas presentan una distancia entre sí de 7 a 15 kilómetros y una precisión de 5mm.
- Red de apoyo catastral Tipo 2 (RAC 2): establecidas por el RIC y referenciadas a la RAC1. Las mismas tendrán una distancia entre sí de 0.5 a 7 kilómetros y precisión de 10 mm.
- Redes de apoyo catastral Tipo 3 (RAC 3): usualmente poligonales referenciadas a la RAC2, materializadas en el campo como poligonales de apoyo para el levantamiento de áreas urbanas, centros poblados o áreas de alta densidad predial. La tolerancia de cierre unitario de la poligonal de 0.001, es decir, 1 milímetro (RIC, 2008).

3.7. Sistema de referencia

Un sistema de referencia es un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre. Son utilizados en geodesia, navegación, cartografía y sistemas globales de navegación por satélite para la correcta georreferenciación de elementos en la superficie terrestre. Estos sistemas son necesarios dado que la Tierra no es una esfera perfecta (Quirós, 2014).

3.7.1. Sistema de referencia World Geodetic System 1984 (WGS84)

Es un sistema de referencia Terrestre Global, que tiene un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coinciden con los del sistema ETRS89 es decir, su origen es el centro de

masas de la tierra, el eje Z es la dirección del polo en 1984, el eje X es la dirección de la intersección del plano del ecuador con el meridiano de Greenwich.

3.7.1.1. Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)

Sistema desarrollado por el geógrafo flamenco Gerardus Mercator en 1659 que está dentro de las llamadas proyecciones cilíndricas, por emplear un cilindro situado en una determinada posición espacial de coordenadas, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano. A diferencia del sistema de coordenadas tradicional, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros.

La Tierra en franjas de un ancho de 6° de longitud, o sea, tres grados a cada lado del meridiano central, obteniéndose un total de 60 franjas que se denominan Husos. Estos se numeran hacia el Este, consecutivamente del 1 al 60, partiendo del meridiano 180°. Nuestro país se encuentra dentro de los husos 15 y 16.

3.7.1.2. Proyección Guatemala Transversal Mercator (GTM)

El territorio de Guatemala se encuentra partido en dos Zonas UTM (Universal Transverse Mercator), la 15 y la 16. Para facilitar el manejo de data geográfica dentro de la república y estandarizar las proyecciones, se decidió (Resolución Normativa IGN-01/99) crear una nueva proyección que permite cubrir todo el territorio en una única zona, la GTM (Guatemala Transverse Mercator). Esta proyección se usa hoy en las instituciones afines al manejo de información geográfica. Los parámetros se detallan a continuación:

- 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: se le puede llamar zona 15.5 (IGN, 2013).

3.8. Fotogrametría

Etimológicamente, la palabra fotogrametría se deriva de las palabras griegas $\phi\omega\tau\omicron\varsigma$ photos, que significa luz; $\gamma\rho\alpha\mu\alpha$, gramma, que significa lo que está dibujado o escrito, y $\mu\epsilon\tau\rho\upsilon\nu$, metrón, que significa medir. Usando en conjunto esas palabras fotogrametría significa medir gráficamente por medio de la luz (Tacca, 2015).

Corredor Daza (2015), asegura que la fotogrametría es la técnica que permite establecer las dimensiones y posición de objetos en el espacio a partir de fotografías aéreas, lográndolo a partir de la intersección de dos o más fotos, obteniendo así modelos digitales de terreno que sirven para múltiples usos en la rama de la ingeniería.

Es entonces la fotogrametría: el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo.

3.8.1. Levantamiento fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía. Pese a que la fotogrametría no es una ciencia nueva (sus inicios se estiman a mediados del siglo XIX) sus aplicaciones en topografía son mucho más recientes.

Si se trabaja con una foto se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos fotos, en la zona común a estas (zona de solape), se podrá tener visión estereoscópica, o dicho de otro modo, información tridimensional. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza fotografías u otros sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición.

Percepción remota

Percepción remota, es la medida de algunas propiedades de un objeto, sin que el elemento de medición se encuentre en contacto físico con el mismo.

De acuerdo a Tacca (2015), para que sea posible la percepción remota se requiere que el objeto irradie algún tipo de energía y que un dispositivo sensible la registre.

Fotogrametría aérea

Es la que utiliza fotografías aéreas obtenidas desde una cámara de toma de vistas, ubicada en una plataforma especial (vehículo aéreo), donde el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre (Tacca, 2015).

Fotogrametría digital

Finalmente, el avance tecnológico hizo posible llegar a la fotogrametría digital. El uso de las computadoras y los programas aplicados dan origen a los modelos digitales del terreno 3D.

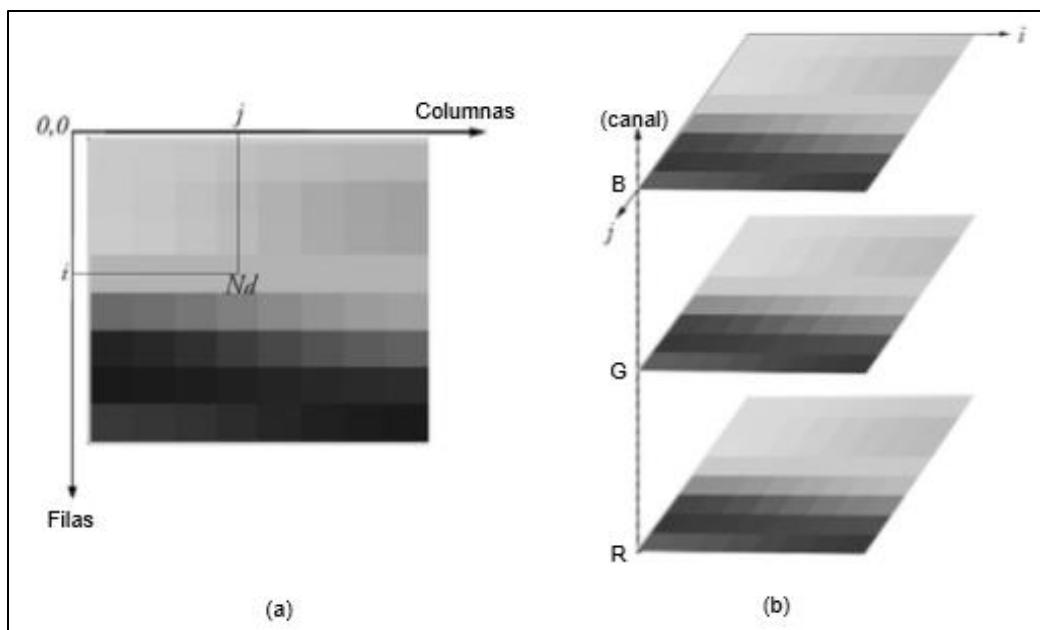
Las imágenes digitales son ingresadas a la computadora y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien la computadora realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato raster o vectorial. Esta salida (digital) puede ser utilizada como información de base para la generación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Claros et al., 2016).

Fotografía digital

En la fotografía digital las imágenes son capturadas por un sensor electrónico que dispone de múltiples unidades fotosensibles, las cuales aprovechan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz en una señal eléctrica, la cual es digitalizada y almacenada en una memoria.

3.8.2. Imagen digital

Una imagen digital es una matriz bidimensional en la que cada unidad mínima de información es un píxel con coordenadas fila, columna (i,j). Cada píxel, tendrá un valor denominado Nivel Digital (Nd) que estará representado por un nivel de gris en pantalla (Figura 2a). Esta composición de la imagen digital es la que corresponde con una imagen monobanda, o lo que es lo mismo: compuesta por sólo una matriz, y que se visualizaría en niveles de gris. Sin embargo, las imágenes a color (RGB), tal y como se puede apreciar en la figura 2b, están compuestas por tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el verde (Green) y otra para el azul (Blue).



Fuente: Quirós Rosado, 2014.

Figura 3: Composición de una imagen digital.

Resolución de una imagen digital

La resolución, define la calidad de una imagen digital, la cual depende del tamaño del píxel. Si es demasiado grande, la imagen pierde información, pero, si por el contrario es demasiado pequeño, la imagen tendría mucha calidad, con el inconveniente de que también necesitaría mucho espacio de almacenamiento. La unidad en la que se expresa la resolución es ppp (píxeles por pulgada) (Claros et al., 2016).

3.8.3. Píxel

Un píxel o pixel, plural píxeles (acrónimo del inglés picture element), es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

Es la unidad más pequeña y diminuta de una imagen digital y está presente en un inmensurable número para formar una imagen completa. Cada píxel es una unidad homogénea de color que en suma y con una importante variación de colores dan como resultado una imagen más o menos compleja. Pueden contar con tres o cuatro elementos de color a elegir: rojo, verde y azul o magenta, amarillo y cian (Claros et al., 2016).

3.8.3.1. Megapíxel

Un megapíxel o megapixel (Mpx) equivale a 1 millón de píxeles. Usualmente se utiliza esta unidad para expresar la resolución de imagen de cámaras digitales; por ejemplo, una cámara que puede tomar fotografías con una resolución de 2048×1536 píxeles se dice que tiene 3.1 megapíxeles ($2048 \times 1536 = 3,145,728$) (Tacca, 2015).

Almacenamiento de metadatos

Una de las ventajas del uso de fotografías digitales es la información que se genera al momento de tomar la fotografía y que se almacena en la imagen, en un archivo de metadatos conocido Exif, la cual puede ser muy completa (Quirós, 2014).

Las etiquetas de metadatos definidas en el estándar Exif cubren un amplio espectro incluido:

- Información de fecha y hora. Las cámaras digitales registran la fecha y la hora actual y la almacenan en los metadatos.
- Configuración de la cámara. Esta incluye información estática como el modelo de cámara y el fabricante, e información que varía con cada imagen como la orientación, apertura, velocidad del obturador, distancia focal, medidor de exposición y la velocidad de la película.
- Información sobre localización, la cual podría provenir de un GPS conectado a la cámara.
- Descripción e información sobre copyright.

3.8.4. Cámara digital

Es uno de los dispositivos electrónicos más populares y exitosos de los últimos años ya que nos permite a cualquiera poder tomar fotografías de muy diverso tipo teniendo el resultado de cómo sería la imagen en el instante en que se saca, sin necesidad de esperar al revelado. Las cámaras digitales no funcionan sobre la base de una película fílmica como las cámaras de fotografía tradicionales, sino sobre la base de un sensor electrónico interno que hace las veces de la película fílmica donde se graba o imprime la imagen captada para luego ser almacenada en una memoria interna para que el usuario pueda disponer de ellas cuándo y cómo quiera (Tacca, 2015).

3.9. Proceso fotogramétrico

Se entiende por proceso fotogramétrico a todas las fases consecutivas que conllevan la producción cartográfica a partir de fotografías, generalmente aéreas. El proceso empieza con la toma de imágenes de la zona y culmina con la obtención de coordenadas tridimensionales de dicha zona. Dichas coordenadas, dan lugar a distintos productos tales como planos cartográficos, modelos digitales de elevaciones y ortofotos (Quirós, 2014).

3.9.1. Orientación interna

La orientación interna de las imágenes adquiridas con cámara digital consiste únicamente en la determinación de la posición del punto principal de la foto, con respecto al centro de la imagen digital (fila, columna) (Claros et al., 2016).

3.9.2. Orientación relativa

La orientación relativa es la fase del proceso en la que se relacionan geométricamente las imágenes estereoscópicas, formándose el modelo. Esta fase consiste en identificar puntos homólogos en cada fotografía, para posteriormente reconstruir los haces y generar los productos (Claros et al., 2016).

3.9.3. Orientación absoluta

La orientación absoluta consiste en nivelar el modelo, escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio. Se resuelve con la ayuda de puntos de control o apoyo medidos en el terreno e identificables en los fotogramas.

3.10. Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs, drones)

Un dron es una aeronave que vuela sin tripulación, es reutilizable, es capaz de sostener un nivel de vuelo controlado y es propulsado por uno o varios motores. Aunque hay una amplia variedad de formas, tamaños y características, se identifican dos variantes, en primer lugar, los que son controlados de manera remota y, en segundo lugar, los que vuelan de forma autónoma sobre un plan de vuelo programado previamente (Vásquez, 2017).

Los UAV actualmente se reducen a dos categorías, de ala fija y multirotor (ala rotatoria):

3.10.1. Dron multirotor

Un UAV de ala rotatoria consiste en 2 o 3 palas de rotor que giran en torno a un mástil fijo, esto se conoce como un rotor. Estos vienen en una amplia gama de configuraciones que constan de un mínimo de un rotor (HELICÓPTERO), 3 rotores (TRICOPTER), 4 rotores (QUADCOPTER), 6 rotores (HEXACOPTER), 8 rotores (OCTOCOPTER), así como configuraciones más inusuales como 12 y 16 rotores.

Dos hélices giran en el sentido de las agujas del reloj y las otras dos en el otro sentido, creando así la fuerza de empuje necesario para llevar al dron hacia arriba. Se pueden mantener en el mismo sitio sin variar la posición, gracias a sus giroscopios y estabilizadores (Vásquez, 2017).

3.10.2. Componentes estructurales de los drones

Independientemente de la tecnología y el diseño de dron frente al que nos encontremos, se identifican las siguientes partes habituales por las que está formado:

Fuselaje

Es la estructura principal del dron. Corresponde al cuerpo o armazón central del dispositivo y sobre el que se anclan y articulan el resto de componentes. Entre los aspectos más importantes del fuselaje encontramos la morfología, responsable de generar mayor o menor resistencia del dispositivo en vuelo. De esta forma los desplazamientos son más suaves y el consumo es menor (mayor autonomía).

Baterías

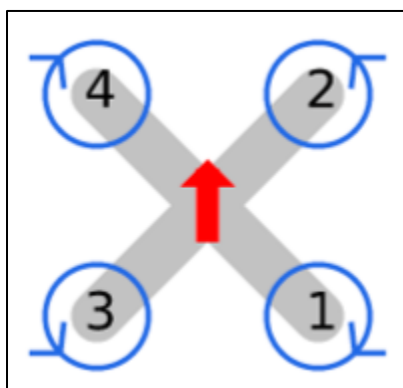
Encargadas del aporte energético del dispositivo. Desde el avance tecnológico con las baterías inteligentes, se pueden realizar vuelos con largas jornadas de trabajo.

Motores

Permiten el impulso del dron alimentándose de las baterías. Los motores eléctricos y su funcionamiento se basan en una rotación por medio de una bobina sobre la que circula una corriente eléctrica.

Los motores quedan anclados al fuselaje del dron de una manera estratégica, incorporando siempre un número de motores pares y con rotación contraria entre ellos con el fin de generar un efecto anti par. Así, la inercia de uno de ellos, es contrarrestada con la inercia del siguiente, permitiendo equilibrios y desequilibrios que permitirán la movilización estratégica por el aire.

En la siguiente imagen (figura 3) se advierte que el motor 1 rota en sentido de las agujas del reloj. Este movimiento de forma aislada generaría la rotación del dron sobre su propio eje. La existencia del motor 2 rotando en sentido contrario a las agujas del reloj compensa el giro producido por el motor 1. Caso similar con los motores 3 y 4. La totalidad de la rotación genera la estabilidad del dron.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Rotación de motores del dron

Hélices

Elemento clave que permite la sustentación en el aire movilizand o el máximo volumen de él para poder elevarse y movilizarse. Corresponden a todas aquellas estructuras a modo de palas, que se incorporan en los motores a través de un soporte. Durante el movimiento de rotación de la hélice, el viento es movilizado gracias al perfil aerodinámico de la pala. Este movimiento hará que el dron haga frente a la gravedad. Sin embargo, esta dinámica hará que el dispositivo comience a girar debido a la energía cinética generada por el motor. No obstante, para compensar el giro, otra hélice con igual perfil, pero con giro distinto actuará permitiendo equilibrio.

Tren de aterrizaje

Es un soporte que permite amortiguar el peso del dron sobre la superficie en la que se realizan los ascensos y descensos. Así, la aeronave no sufrirá daños y otros elementos, como la cámara no chocará contra la superficie.

Dispositivo óptico

Es el sensor (cámara) incorporada en el dispositivo que permite capturar información específica. De igual manera, ver en tiempo real el entorno en el que se encuentra el dron y no perder la referencia espacial del mismo.

Gimbal

Corresponde al sistema de suspensión sobre el que va asentado el dispositivo óptico. Evita obtener imágenes borrosas y en movimiento aportando estabilidad constante de los fotogramas adaptándose a los movimientos del dron (Vásquez, 2017).

Equipo de control remoto

Sirve para controlar a distancia el dispositivo. Compuesto por la emisora y el software necesario para interactuar con el dron y gestionar acciones concretas. Con la emisora se controlan los movimientos (ascensos, descensos, rotaciones, ...) mediante botones y palancas.

Para que exista correcta comunicación emisor – receptor, se dispone de antenas y serán las encargadas de emitir y recibir las ondas en el espacio.

Sistema de iluminación

Permite comprender la situación técnica y espacial en la que se encuentra el dron. Durante el vuelo se pueden generar problemas y este sistema permite advertirlos, gracias a leds dispuestos estratégicamente en la estructura. Habitualmente, se rige bajo tres colores: amarillo, verde y rojo. En condiciones de vuelo normal, se encontrarán luces rojas en la zona frontal del dron y luces verdes en la zona trasera del mismo. La zona frontal mostrará siempre una iluminación fija (roja), mientras que la trasera se mostrará variable (en función de los problemas y situaciones técnicas de la aeronave). Es decir, cambiarán de estado pudiendo pasar a colores como el rojo o el amarillo (Vásquez, 2017).

Electrónica

Todo dispositivo tecnológico lleva implícito un conjunto de componentes electrónicos que permiten su correcto funcionamiento. El principal es el IMU, también conocida como Unidad de Medición Inercial. Ayuda a obtener información precisa sobre orientación y velocidad gracias a la combinación de acelerómetros y giróscopos. Por tanto será la IMU, la que posicione y aporte información del estado del dron en la atmósfera, gestionar esta información gracias a la telemetría, entre otras.

3.11. Plan de vuelo fotogramétrico con dron

Ruales (2018), comenta que los drones en la actualidad son dispositivos aeronáuticos que pueden ejecutar sobrevuelos de forma totalmente autónoma, gracias a la función de piloto automático que poseen, el cual se encarga de los diferentes mecanismos que rigen el funcionamiento correcto y permiten realizar los sobrevuelos de forma autónoma. El plan de vuelo se tiene que realizar con aplicaciones encargadas de la comunicación con el piloto automático, este se compone de una serie de Way Points por los que debe sobrevolar el dron, teniendo coordenadas en latitud, longitud y altura, además velocidad.

3.12. AutoCAD

Actualmente AutoCAD es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. El nombre AutoCAD surge como creación de la compañía Autodesk, en que Auto hace referencia a la empresa creadora del software y CAD a Diseño Asistido por Computadora (por sus siglas en inglés "Computer Aided Design"), teniendo su primera aparición en 1982. AutoCAD es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros (Villarreal, 2015).

3.13. ArcGIS

Es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG, producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica (España, 2013).

3.14. Pix4D Mapper

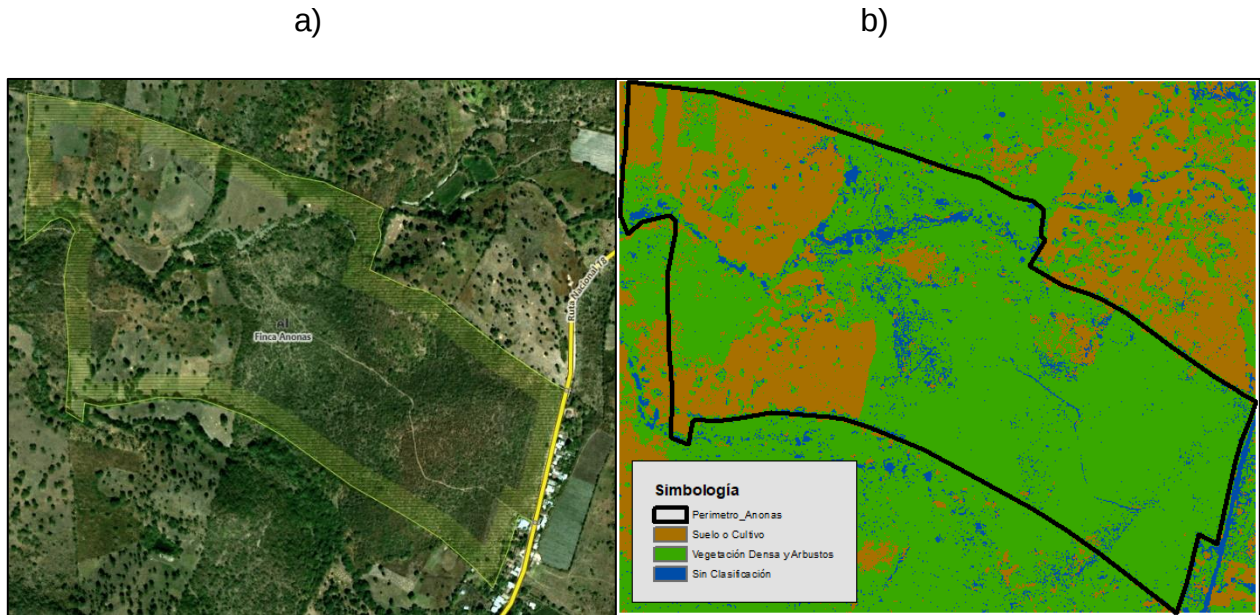
Pix4D Mapper es un software que permite convertir miles de imágenes aéreas oblicuas tomadas por UAV ligero o aeronave en ortomosaicos georeferenciados, modelos 3D de superficie y nubes de puntos.

Con su avanzada tecnología de triangulación aérea automática basada únicamente en el contenido de la imagen, Pix4D permite convertir la cámara del UAV en una herramienta de medición.

IV. MARCO REFERENCIAL

4.1. Descripción del área de estudio

El terreno donde se desarrolló el presente estudio responde a un plan de adquisición de imágenes de caso general, es decir, no incluye bosques o lagos. Sin embargo, el terreno contiene campos agrícolas y vegetación densa, apreciables en la figura 5.



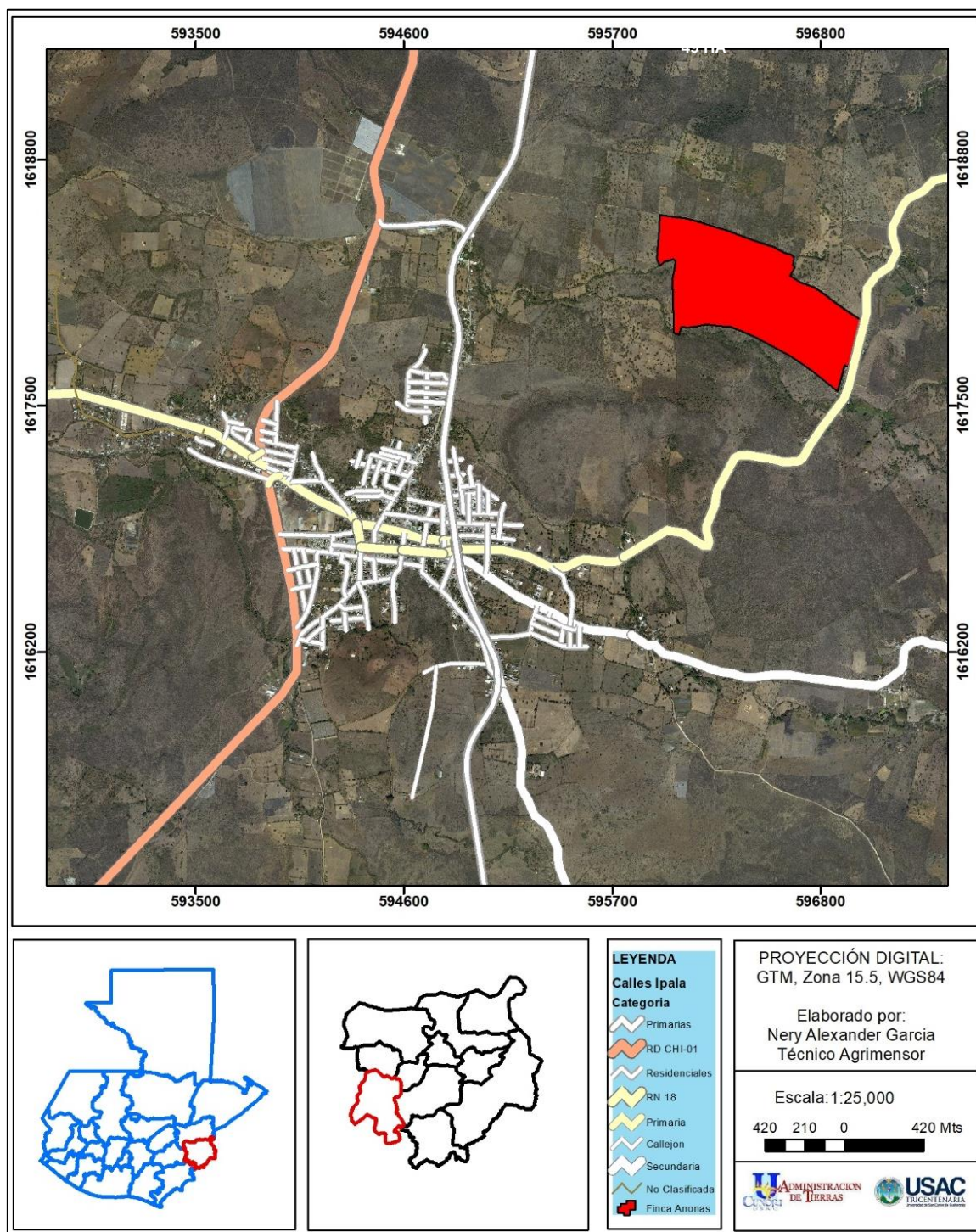
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Descripción del área de estudio

a) Imagen satelital del área de estudio y b) clasificación de superficie del área de estudio

4.2. Ubicación y localización

El área de estudio es de propiedad privada y se denomina finca “anonas”. Pertenece al municipio de Ipala, departamento de Chiquimula. Se ubica sobre la Ruta Nacional 18 (RN18) aproximadamente a 4 kilómetros de distancia de la entrada principal del casco urbano.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6: Área de estudio en finca “anonas”

4.3. Ubicación política

Ipala es uno de los once (11), municipios del departamento de Chiquimula, se encuentra en la parte oeste del departamento en la Región III o Región Nor- Oriental. La distancia entre Ipala y la cabecera departamental, Chiquimula es de 34 kilómetros (kms). Sus colindancias son las siguientes:

- ✓ Norte: Con el municipio de San José La Arada del departamento de Chiquimula.
- ✓ Sur: Con el municipio de Agua Blanca del departamento de Jutiapa.
- ✓ Este: Con los municipios de San Jacinto, Quezaltepeque y Concepción Las Minas del departamento de Chiquimula.
- ✓ Oeste: Con los municipios de San Luis Jilotepeque y San Manuel Chaparrón, del departamento de Jalapa.

Su localización, según el Instituto Geográfico Nacional (IGN), se encuentra en el mapa de Ipala 2259-I, escala 1:50,000, con las coordenadas latitudinales 14° 37' 10" y longitudinales 89° 37' 06". El banco de marca (MB) del IGN en la estación de ferrocarril se encuentra a una altura de 822.76 metros sobre el nivel del mar (msnm), por lo que generalmente su clima es templado.

V. MARCO METODOLÓGICO

5.1. Objetivos

5.1.1. General

- Contribuir al conocimiento del empleo de aeronaves no tripuladas (UAV) para aplicaciones topográficas a través de técnicas de fotogrametría, determinando su precisión comparada con la topografía convencional.

5.1.2. Específicos

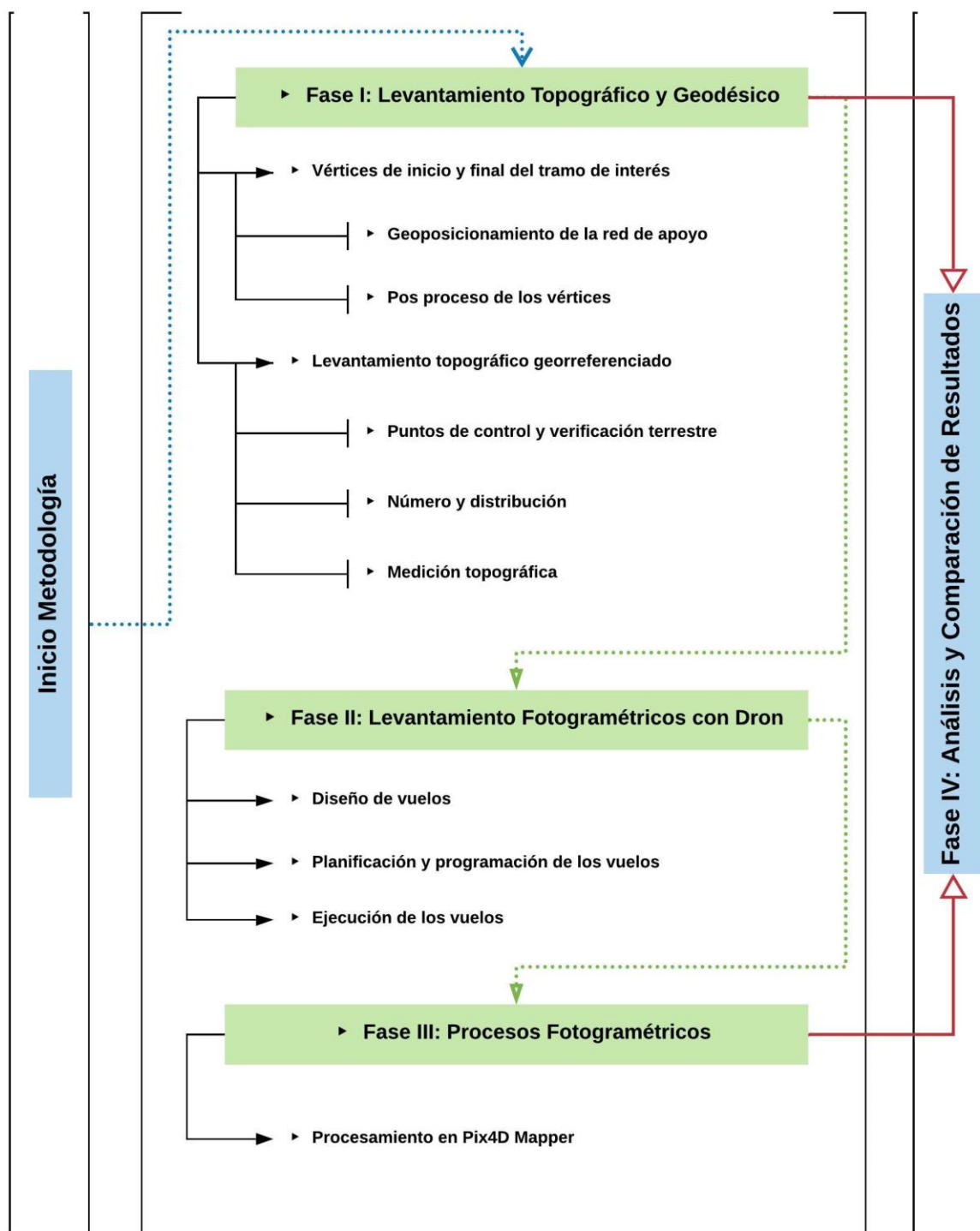
- Generar información topográfica por medio de técnicas que permitan obtener levantamientos de primer orden, utilizando equipo geodésico y estación total.
- Ejecutar planes de vuelo con el cuadricoptero DJI Phantom 4 Pro, para la adquisición de imágenes aéreas de alta resolución espacial y la generación de información topográfica.
- Evaluar el grado de precisión entre la información generada por equipo topográfico convencional y la generada con el cuadricoptero DJI Phantom 4 Pro.

5.2. Metodología

La metodología con la que se llevó a cabo este estudio comprende diferentes actividades pertinentes a levantamientos topográficos de alta precisión; geoposicionamiento mediante sistema de navegación global por satélite -GNSS- y vuelos con sistema de vuelo remotamente pilotados -SARP-.

Dado que la investigación se basará en drones, fue necesaria la utilización de los rayos de la luz del sol reflejados por los objetos de la superficie de la tierra, esto ocurre en la porción visible (RGB) del espectro electromagnético. Estos rayos, también llamados de reflectancia, fueron capturados en fotografías aéreas fruto del combo cámara-GPS

instalado en el dron. Las medidas de los objetos, incluyendo la altura del terreno se calcularon a partir de la fotogrametría.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7: Diagrama metodológico de la investigación

5.2.1. Fase I: Levantamiento topográfico y geodésico

En esta primera fase se desarrollaron actividades de tipo analítico – técnico referentes al establecimiento de una red de apoyo, geoposicionamiento, pos proceso de vértices y levantamiento topográfico de puntos de control y verificación terrestre del tramo de interés.

5.2.1.1. Vértices de inicio y final del tramo de interés

Se diseñó (en gabinete) la estructura de los vértices: forma triangular, distancia entre puntos, estaciones de referencia, accesibilidad, ubicación sin construcciones, cielo despejado, entre otros. Esto, consistió en el estudio de puntos geodésicos de referencia y la planificación sobre cartografía digital.

Se utilizaron softwares de manipulación de información geográfica: ArcGis de Esri™ (completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica) y Google Earth Pro (potente herramienta utilizada para analizar terrenos, diseñar rutas o planear construcciones).

La cartografía base comprendió: levantamiento topográfico georreferenciado de la zona de estudio (áreas, polígonos, ubicación de mojones, etc); ortofotos generadas en el proyecto de 2006: Obtención de imágenes a escala de detalle de la República de Guatemala; y la colección de imágenes de Google Earth, por ejemplo, imágenes de satélite, en 3D y de Street View (recopiladas a lo largo del tiempo procedentes de plataformas y proveedores afines a Google).

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

1. Ubicación geográfica de los vértices de referencia (x, y y z).
2. Ubicación geográfica de los puntos que conformarán la red de apoyo (x, y y z).
3. Distancias entre puntos.
4. Distribución geométrica de la red en el lugar de estudio.

5.2.1.1.1. Geoposicionamiento de la red de apoyo

Se tomaron criterios y requisitos del proceso estandarizado de las monumentaciones y geoposicionamientos de las redes de apoyo catastral utilizados por el Registro de Información Catastral -RIC- y expuestos en su normativo de operación. En otras palabras, el grado de la red de apoyo fue arbitrario, pero con criterios y normas propias del RIC: enumerados a continuación:

1. Vértices referenciados a red geodésica nacional.
2. Precisión de 10 milímetros (mm) + 2 partes por millón (ppm).
3. Mínimo 2 estaciones de referencia.
4. Bases Cimentadas.
5. Tiempo de grabación de 2 horas por punto.
6. Equipo GPS de doble frecuencia (L1 y L2). (RIC 2008).

Para lograr esto, se utilizaron equipos receptores geodésicos marca Topcon, modelo Hiper plus (+), con las siguientes especificaciones:

- Señales rastreadas: L1 / L2/ C/A y Código P.
- Precisión horizontal en modo estático 3 mm + 0.5 ppm.
- Precisión vertical en modo estático 5 mm + 0.5 ppm.
- Peso de 3.64 libras.

5.2.1.1.2. Pos proceso de vértices

El pos proceso (corrección diferencial de coordenadas) se depuraron y optimizaron los datos transmitidos por los satélites durante las sesiones de grabación. Se trabajó con el sistema de referencia propio de la República de Guatemala, descrito a continuación:

- Proyección Guatemala Transverse Mercator – GTM o GTM Zona 15.5: sistema nacional de referencia para la República de Guatemala, adoptado por el Instituto Geográfico Nacional -IGN-, el cual corresponde al dátum de carácter mundial WGS84. Sus parámetros son los siguientes:
 - Proyección: Transversal de Mercator en zona única local.
 - Esferoide: WGS84.
 - Longitud de origen: -90.30 (meridiano central de proyección).

- Latitud de origen: 0 (en el ecuador).
- Unidad de medida: metros.
- Falso Norte: 0 metros.
- Falso Este: 500,000 metros en el meridiano central.
- Factor de escala en el meridiano central: 0.9998.
- Zona: 15.5, por la posición especial del país entre dos zonas (15 y 16).
(IGN, 2013)

5.2.1.2. Levantamiento topográfico georreferenciado

Utilizando los vértices de apoyo en el terreno, se inició el levantamiento topográfico. Esta parte metodológica se desarrolló mediante topografía digital, utilizando una estación total marca Sokkia, modelo SET-500 con dos prismas de espejos. Las características de la estación total, son las siguientes:

- Precisión angular de 5" (1.5 mgon).
- Precisión en distancia modo estándar 3 + 2 ppm.
- Precisión en distancia modo rápido 5 + 5 ppm.

5.2.1.2.1. Puntos de control y/o verificación terrestre (GCPs y CPs)

Antes de realizar la topografía, y en este caso los vuelos fotogramétricos, se estableció la ubicación del tramo de interés y de los puntos de control y verificación terrestre. Para ello, se colocaron estacas de madera en cada punto a levantar. La importancia radicó en materializarlos permanentemente y sea innecesario un replanteo a posteriori.

El presente estudio se referió a los puntos de apoyo y control terrestre (GCP, siglas en inglés, Ground Control Point) como aquellos utilizados para ajustar la precisión y orientación del modelo de la superficie y que son identificables en las fotografías; y a puntos de verificación (Check Points, CP) como aquellos puntos con coordenadas que se utilizaron para comprobar la precisión del levantamiento.

Los puntos fueron identificables en las fotografías y se ubicaron en zonas descubiertas. Se les adjudicó posición planimétrica y altimétrica para poder usarse en la elaboración del modelo digital del terreno (MDT). En los GCP y CP, se consideró lo siguiente:

5.2.1.2.2. Número y distribución

Para Pix4D (2017), los GCP deberán colocarse de manera homogénea en el área de interés. Además, se colocará al menos un punto en el centro del área para aumentar aún más la calidad de la reconstrucción.

De igual manera Villarreal Moncayo (2015) concluye Además, la distribución de GCPs que mejores resultados ofrece es la rectangular (formando una cruz dependiendo la perspectiva) con un punto en el centro que sostenga las esquinas.

Tomando en cuenta lo anterior, los GCP se rigieron de la siguiente manera:

- Se levantó un mínimo de 5 GCP y un máximo de 9 GCP.
- Se colocaron uniformemente en el paisaje para minimizar el error de escala y orientación.
 - Zonas deprimidas y elevaciones.
- No se colocaron GCP exactamente en los bordes del área.
- Se distribuyeron de forma homogénea y equidistante con un GCP en el eje central.
- Se materializaron en el terreno utilizando estacas de madera con clavos de lámina.

5.2.1.2.3. Medición topográfica

Se llevó a cabo mediante un levantamiento topográfico levantando los GCP y los CP distribuidos en el área. Para la orientación del equipo se utilizó el método de orientación de dos puntos conocidos a través de coordenadas y cerrando en un tercer punto conocido; establecidos en la red de apoyo.

Nota: para la precisión en altura se tomará como referencia la cota correspondiente a los puntos de amarre de la red geodésica. Esto garantizará alturas constantes en el área de estudio.

5.2.2. Fase II: Levantamientos fotogramétricos con dron

Con el fin de garantizar resultados en cuanto a rendimiento, desempeño y desde luego, precisión, se utilizó equipo dron de última tecnología: DJI Phantom 4 Pro, arquetipo de 4 hélices, cuyas principales características se detallan a continuación:

- **Aeronave**
 - Peso (batería y hélices incluidas): 1388 gramos.
 - Tamaño diagonal (hélices excluidas): 350 milímetros.
 - Velocidad máxima en ascenso: 6 m/s (modo Sport).
 - Velocidad máxima en descenso: 4 m/s (modo Sport).
 - Velocidad máxima: 72 m/s (modo Sport).
 - Máxima duración de vuelo: Aproximadamente 30 minutos.
 - Modo GPS: GPS / GLONASS.
- **Cámara**
 - Sensor: 1" píxeles efectivos de 20 M.
 - Objetivo: FOV 94° 20mm f/2.8
 - Rango ISO: 100-1600 (foto).
 - Velocidad de obturador: 8s – 1/8000s.
 - Tamaño máximo de imagen: 4000 * 3000 (12MP).
- **Rótula de estabilización y control remoto**
 - Grado de inclinación de -90° a +30°.
 - Estabilización de 3 ejes (horizontal, vertical y rotación).
 - Distancia máxima del mando de control de 5 kilómetros. (DJI 2017).

De manera resumida, se mencionan los siguientes aspectos y factores tenidos en cuenta para obtener productos adecuados y que directamente afectaron los resultados finales del estudio:

5.2.2.1. Diseño de vuelos

El diseño permitió obtener información completa de la zona. Los elementos clave que se fotointerpretaron resultaron fácilmente visibles y reconocibles a través de las resoluciones de píxel (Ground Sample Distance -GSD-) determinadas por los siguientes aspectos:

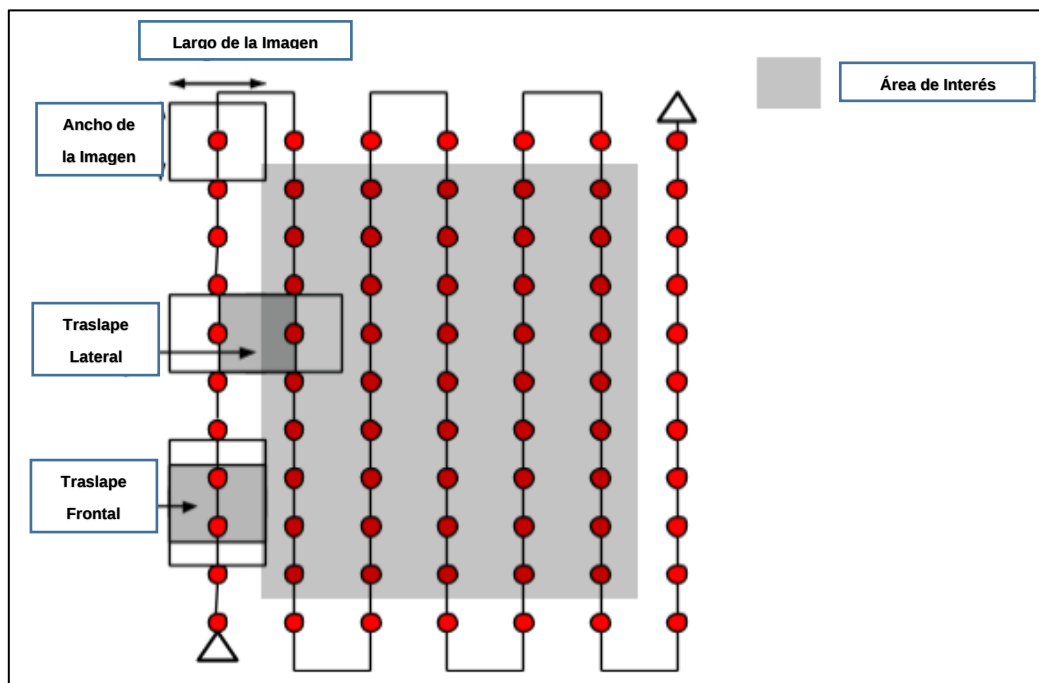
- **Resolución y precisión:** por resolución se entendió el grado de detalle de las fotografías tomadas por el dron y está directamente relacionada con la calidad del sensor que transporta. En este caso, la cámara contó con 20 millones de píxeles (20MP).
- **Altitud:** relacionada con la resolución y/o precisión de las imágenes. En esta investigación, se trabajaron tres (3) alturas: vuelo a 50 metros correspondiente a una alta resolución, 120 metros según lo permitido por el reglamento RAC-101; y por último, vuelo a 200 metros. La siguiente tabla muestra el número de vuelos, las alturas y el GSD obtenido en los mismos:

Tabla 1: Altura y GSD proyectados en el estudio

Tipo de Vuelo	Número de Vuelo (en caso de vuelos múltiples)	Código de Vuelo	Fecha	Altura	GSD
A	1	A1		50 m	1.36 cm/px
B	1	B1		120 m	3.27 cm/px
C	1	C1		200 m	5.45 cm/px

Fuente: Elaboración propia.

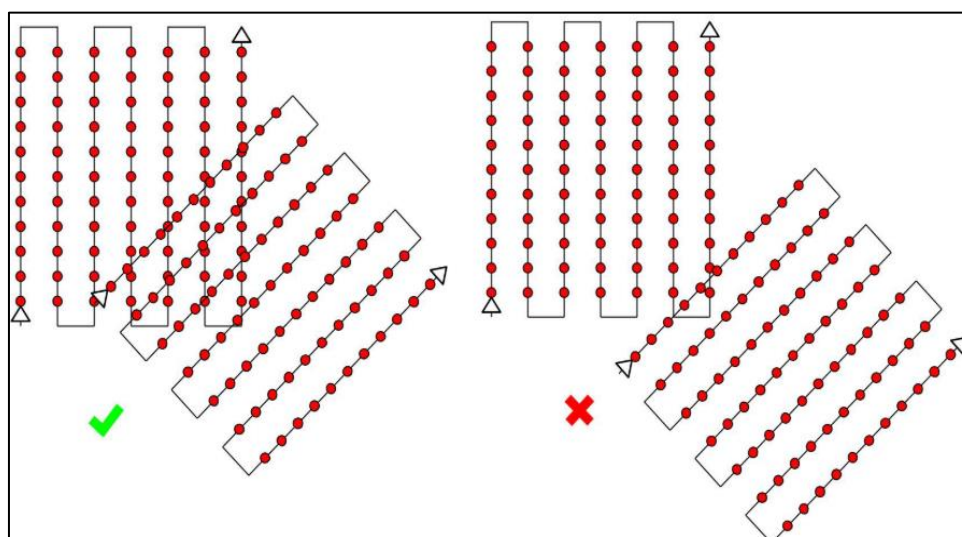
- **Posición de la cámara:** Por norma general, la fotografía aérea se llevó a cabo de forma vertical, es decir, el sistema óptico de la cámara coincidió con la dirección de gravedad o plano vertical.
- **Superficie:** la cobertura abarcada por el dron estuvo condicionada por el perímetro de la zona de estudio, aproximadamente es de 49 hectáreas (ha). Sin embargo, a la hora de realizar los vuelos, esta superficie se amplió para que el perímetro quedara inserto en el mosaico, es decir, se tomaron fotografías fuera del mismo, evitando información sesgada o incompleta.
- **Superposición:** El estudio se basó en un área geográfica constituida por vegetación densa, suelo desnudo y topografía regular. Según Pix4D (2011), en estos casos, la superposición frontal será de 85 % y la superposición lateral de 75 %. Además, la toma de imágenes seguirá un patrón de cuadrícula regular. Ejemplificado en la siguiente figura:



Fuente: Pix4D, 2011.

Figura 8: Superposición y trayectoria de los vuelos

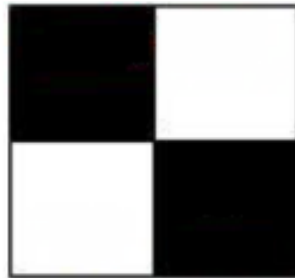
Aunado a esto, fue necesario realizar varios vuelos para cubrir la superficie total del terreno. Por lo tanto, los distintos vuelos mantuvieron su superposición planteada y existió correlación física en cada uno de ellos (figura 9), es decir, zonas comunes en las fotografías para relacionarlas en gabinete. Los planes se tomaron bajo las mismas condiciones (dirección del sol, condiciones climáticas, altura, entre otras).



Fuente: Pix4D, 2011.

Figura 9: Planificación de traslape entre diferentes vuelos

- **Puntos de control (GCP) y puntos de verificación (CP):** se utilizaron dianas (sencillos paneles cuadrados) identificables a través de imágenes aéreas (figura 13). Constaron con las siguientes características:
 - Sobrepuestas en los puntos levantados con estación total y receptor GPS en fases anteriores.
 - Visibles en las imágenes, Pix4D (2011) especifica que el objetivo fotogramétrico (diana) deberá tener entre 5 y 10 veces las dimensiones del GSD. En este caso sus dimensiones se estandarizaron en 50 centímetros (0.5 metros) cuadrados.
 - Hechas de material que no reflejen luz para evitar destellos.
 - Hechas con diferentes tonalidades cromáticas para generar contraste con la superficie levantada (blanco-negro y blanco-amarillo).
 - Aseguradas con clavos garantizando su inamovilidad durante azotes de viento.



Fuente: Pix4D, 2011.

Figura 10: Diana utilizada para los GCP y CP

5.2.2.2. Planificación y programación de vuelos

Se utilizó el software ArcGis y su paquete ArcMap. Se importó el shapefile (formato sencillo que se utiliza para almacenar la ubicación espacial e información de atributos de entidades geográficas) que contenía la superficie a levantar, el perímetro y su ubicación geográfica. Luego, se expandió el área de cobertura en 25 metros a partir del perímetro de la finca, esto con el fin de levantar más datos del terreno.

Se programaron vuelos con ayuda de software que gestionó los parámetros y planificó los vuelos automáticamente. Por su versatilidad y operatividad con el software de pos

procesado fotogramétrico en fases siguientes, se trabajó con **Pix4D Capture** en su versión Android.

Para la programación de los vuelos, se descargó la aplicación en el dispositivo móvil, dentro, se procedió a:

- En la pantalla **inicio**, se seleccionó la opción “polígono” (hace alusión a polígonos irregulares).
- En la vista de **mapa**, se guardó el proyecto en la opción **save**; dentro, se importaron los archivos .kml trabajados en ArcMap.
- Una vez cargado, se trazó el polígono de cobertura de vuelo.
- Luego, se seleccionó la opción **configuration**; una vez dentro, se eligió la pestaña **advanced** que proporciona más flexibilidad y algunas opciones que en la pestaña **normal** no se pueden modificar. En ella, se programó lo siguiente:
 - **Angulo de la cámara:** el valor predeterminado fue de 90 grados.
 - **Superposición frontal:** 85 %.
 - **Superposición lateral:** 75 %.
 - **Modo de disparo de imagen:** se eligió el modo rápido.
 - **Velocidad del dron:** se seleccionó la opción normal, cuya velocidad fluctúa entre 2 y 8 m/s.
 - **Balance de blancos:** se aplicó el automático.

5.2.2.3. Ejecución de vuelos

Una vez definidas las características de los vuelos, se ejecutaron las misiones en el terreno. Para ello se eligieron días libres de nubes; viento y turbulencias mínimas; y la altura del sol adecuada. Dentro de cada vuelo, se realizó la siguiente lista de verificación (checklist):

1. Conexión entre dispositivo móvil, emisora y dron.
2. Buen estado de hélices y cámara.

3. Espacio en memoria.
4. Suficiente autonomía de batería.
5. GPS activos.
6. Punto de despegue sólido.
7. Viento y turbulencias menores.
8. Sin aves en el cielo.

Una vez ejecutada la checklist, se seleccionó la opción **Start**, y el dron comenzó los trabajos.

5.2.3. Fase III: Procesos fotogramétricos

Esta fase comprendió procesos consecutivos que conllevaron a la producción cartográfica a partir de las fotografías aéreas. Los errores y precisiones de cada una de ellas se acumularon a lo largo de todo el proceso. De manera que la calidad del resultado final dependió de la calidad de todas y cada una de las fases.

Se utilizó el paquete **Pix4D Mapper**: software exclusivo que combina miles de imágenes aéreas tomadas por vehículos aéreos no tripulados en precisos mapas profesionales en 2D y modelos 3D. Disponible tanto en servicio online y licencia de escritorio.

Una opción indispensable con que cuenta este paquete es la capacidad de configuración para los proyectos, controlando cada parte del proceso fotogramétrico a través de informes de calidad al finalizar las fases. Por lo que fue viable repetirlas en caso de ser necesario, potenciando así la fiabilidad de sus productos.

También se contó con equipo robusto de hardware que permitió aprovechar de mejor manera las herramientas del software. Las especificaciones del equipo recomendadas por el fabricante de Pix4D Mapper y las características utilizadas en la investigación se detallan a continuación:

Requerimientos recomendados por el fabricante:

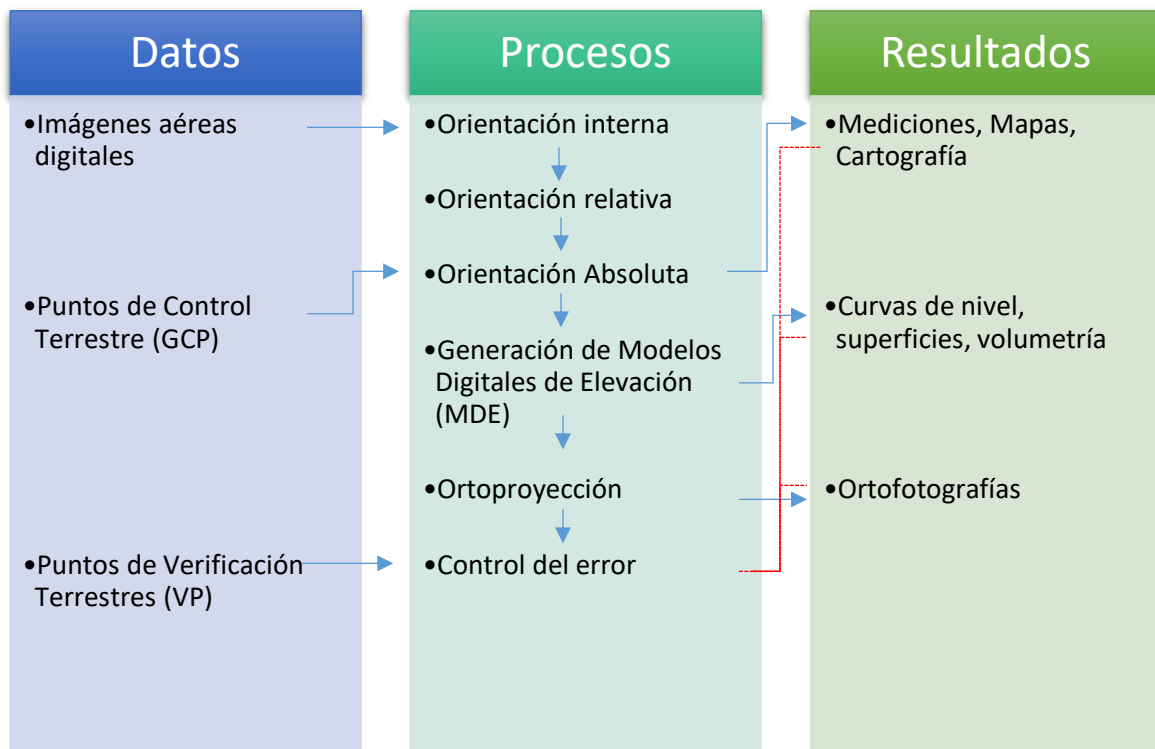
- Windows 7, 8, 10 de 64 bits
- CPU de cuatro núcleos Intel
- GPU GeForce de 2GB

- Disco duro en estado sólido (SSD)
- Proyectos pequeños (menos 100 imágenes a 14MP): 8GB de RAM
- Proyectos medianos (entre 100 y 500 imágenes a 14 MP): 16 GB de RAM
- Proyectos grandes (más de 500 imágenes a 14 MP): 32 GB de RAM
- Proyectos muy grandes (más de 2000 imágenes a 14 MP): 64 GB de RAM

Descripción del equipo utilizado en la investigación:

- Windows 10 de 64 bits
- CPU de cuatro núcleos Intel Core i9 9900k (9na generación)
- GPU GeForce RTX 2080 de 8GB
- Disco duro en estado sólido (SSD) de 500 GB
- 32 GB de RAM

En principio, los datos de partida fueron los fotogramas capturados con la aeronave en formato digital y los puntos de control y verificación para orientar el trabajo a un sistema de referencia espacial. El proceso fotogramétrico siguió el siguiente diagrama de trabajo:



Fuente: Elaboración propia.

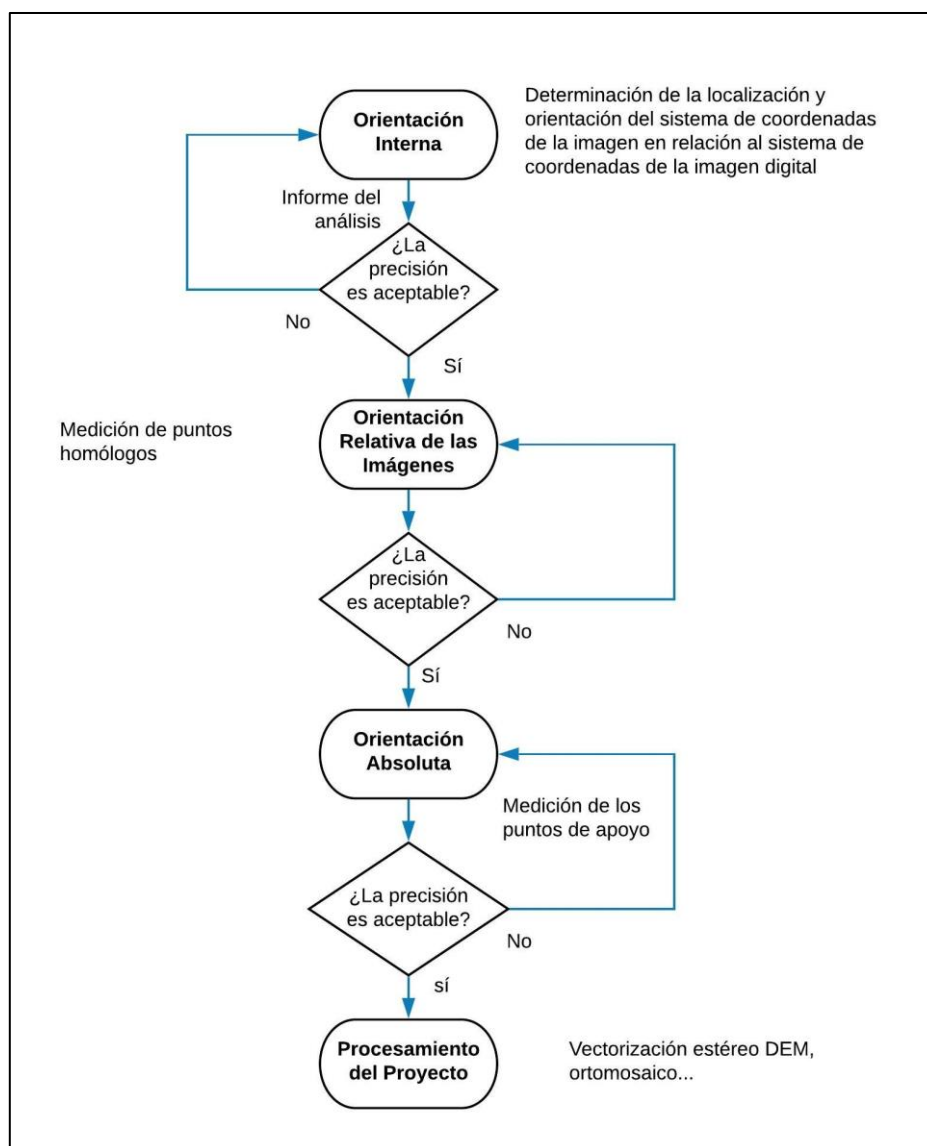
Figura 11: Diagrama de procesos fotogramétricos

5.2.3.1. Ejecución de procesos fotogramétricos

Una vez dentro del software e importadas las imágenes, el programa detectó el sensor con el que fueron capturados los fotogramas, la altura en el instante del disparo, su posicionamiento espacial inicial y final, entre otras características. También se ejecutaron los siguientes subprocesos:

- **Orientación interna:** consistió en localizar independientemente cada una de las fotografías. En otras palabras, el software determinó la posición del punto principal del fotograma. Este proceso fue completamente automático, lo único que se gestionó en esta parte fueron los parámetros de calibración de la cámara detectada por el programa.
- **Orientación relativa:** en este proceso se relacionaron geoméricamente las imágenes para formar el modelo. Es decir, el software identificó puntos homólogos en cada fotografía y los unió de tal manera que formó una nube de puntos 3D (X, Y y Z).
- **Orientación absoluta:** consistió en nivelar el modelo, escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio. Se resolvió con la ayuda de los puntos de control y apoyos terrestres, medidos en el terreno e identificables en los fotogramas. El fin de esta orientación fue hacer coincidir altiméricamente y planiméricamente el modelo con los puntos de control representados en el plano.
- **Generación de modelos digitales de elevación (MDE):** consistió en el proceso automatizado de crear el modelo digital de superficie y de terreno. Se utilizó como base la malla densa de puntos obtenida en la orientación absoluta.
- **Generación de ortofotos:** este proceso conllevó la unión de las fotografías a través de puntos homólogos y resultando en una ortofoto espacial y geoméricamente correcta.

El control de calidad y control del error de los procesos fotogramétricos, se realizó analizando los informes de calidad obtenidos del software. Los errores se fueron acumulando y se monitorearon siguiendo el siguiente diagrama:

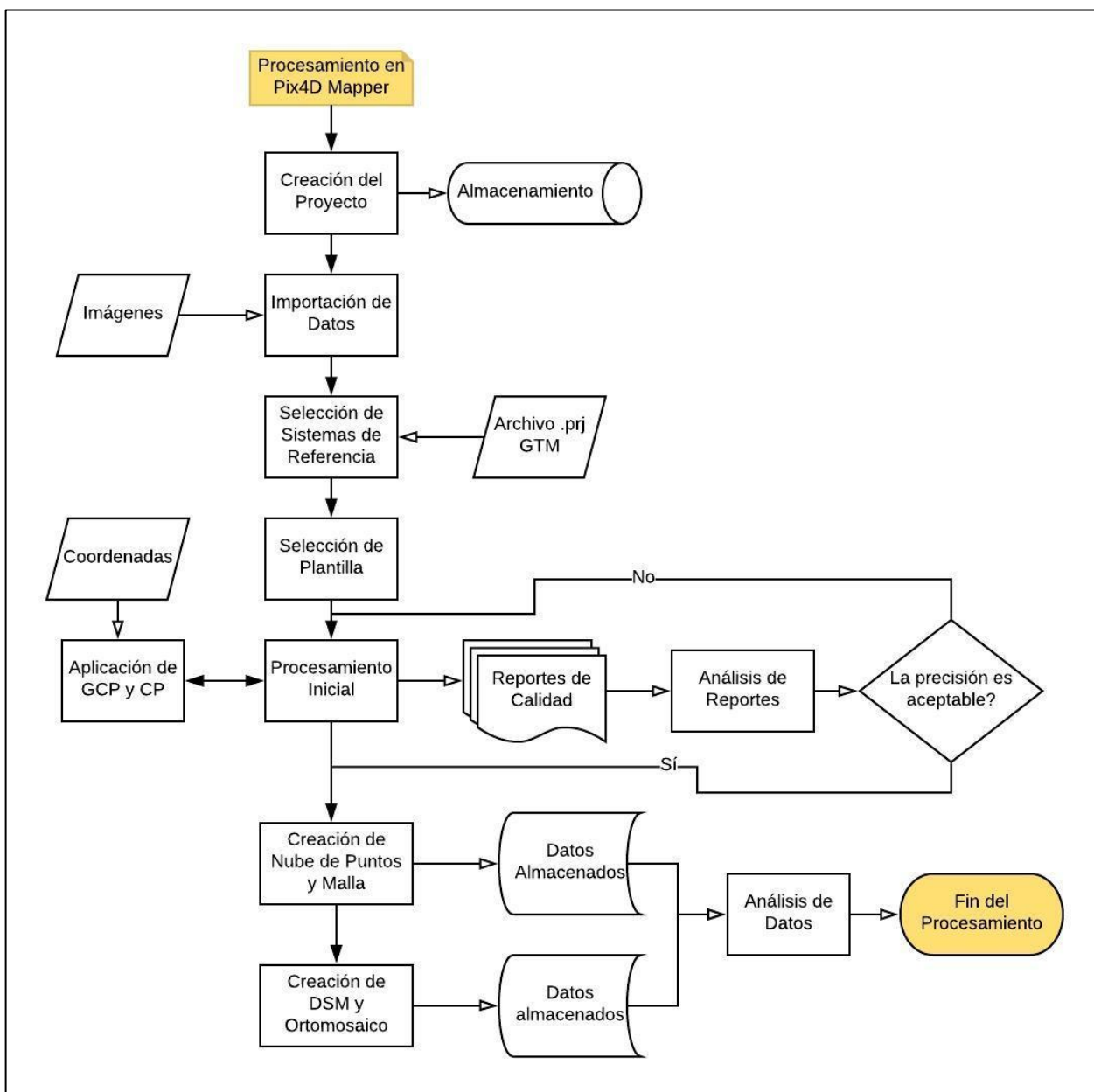


Fuente: Quirós Rosado, 2014.

Figura 12: Proceso de control de calidad en procesos fotogramétricos

5.2.3.2. Procesamiento en Pix4D Mapper

Este procedimiento se repitió para todos los vuelos realizados:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13: Diagrama de procesamiento en Pix4D Mapper

5.2.4. Fase IV: Análisis de los resultados

Una vez concluida la etapa de procesamiento digital de imágenes en Pix4D Mapper y obtenidos los productos fotogramétricos, se realizó la edición gráfica con el fin de obtener archivos adicionales que complementaron la información fotogramétrica y facilitaron su comprensión, análisis y cotejo. La siguiente tabla resume la información que se consideró en el análisis:

Tabla 2: Resumen de datos analizados

VUELO FOTOGRAMÉTRICO CON DRON						
Variables de Vuelo				Coordenadas		
Altura	Traslape Longitudinal	Traslape Transversal	Ortomosaico	X	Y	Z
50 Metros	85%	75%	0 Puntos de Control			
			5 Puntos de Control			
			7 Puntos de Control			
			9 Puntos de Control			
120 Metros	85%	75%	0 Puntos de Control			
			5 Puntos de Control			
			7 Puntos de Control			
			9 Puntos de Control			
200 Metros	85%	75%	0 Puntos de Control			
			5 Puntos de Control			
			7 Puntos de Control			
			9 Puntos de Control			

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, fueron 12 productos fotogramétricos distintos en altura y puntos de control. También se incluyeron las coordenadas X, Y y Z resultantes del levantamiento topográfico con estación total y GPS geodésico.

Para extraer los datos (x, y, z) de los puntos de verificación visibles en los mosaicos, se consideró que cada uno de ellos se ajustó de distinta manera según la cantidad de puntos de control y la altura utilizados en el proceso fotogramétrico, no obstante, el método extractivo que se utilizó será indistinto para cada uno de ellos. Detallado a continuación:

1. Se importó la nube de puntos densa de cada proyecto al software de procesamiento fotogramétrico utilizado (Pix4D Mapper).
2. Sobre cada punto de comparación identificado en la nube de puntos, se digitalizó una polilínea.
3. Se exportaron las digitalizaciones en formato shape de ESRI.
4. Se importó el mosaico y el MDT en software GIS.

5. Se digitalizó el perímetro de la finca en cada mosaico y se exportó en formato shape de ESRI.
6. Se extrajo la información de los vértices (x y y) y se tabularon en hojas de cálculo.

El primer parámetro de análisis, fueron las coordenadas de cada uno de los vuelos (diferente altura y distinto número de puntos de control utilizados en el proceso fotogramétrico), comparados con ellos mismos y con las coordenadas de la topografía convencional.

El segundo parámetro de comparación, fue el perfil del terreno que siguió el levantamiento con estación total. En otras palabras, se obtuvo un perfil de terreno por cada producto fotogramétrico (12 en total) interpolando los puntos con el modelo digital de elevaciones. Estos perfiles se cotejaron entre ellos mismos y con los perfiles obtenidos con estación total.

El tercer y último parámetro, se refirió a las áreas obtenidas del interior de la finca, para ello se foto interpretó el perímetro utilizando los mosaicos resultantes (12).

VI. RESULTADOS

6.1. Levantamiento topográfico y geodésico

Se usaron los vértices de referencia geodésicos descritos a continuación:

1. RAC_1: vértice de apoyo geodésico establecido en el Centro Universitario de Oriente -CUNORI-, por estudiantes de la carrera de Ingeniería en Administración de Tierras, año 2012.
2. Estación Ipala: vértice geodésico del Instituto Geográfico Nacional -IGN-, establecido en la entrada principal del municipio de Ipala. (Anexo 1).

6.1.1. Levantamiento de la red de apoyo

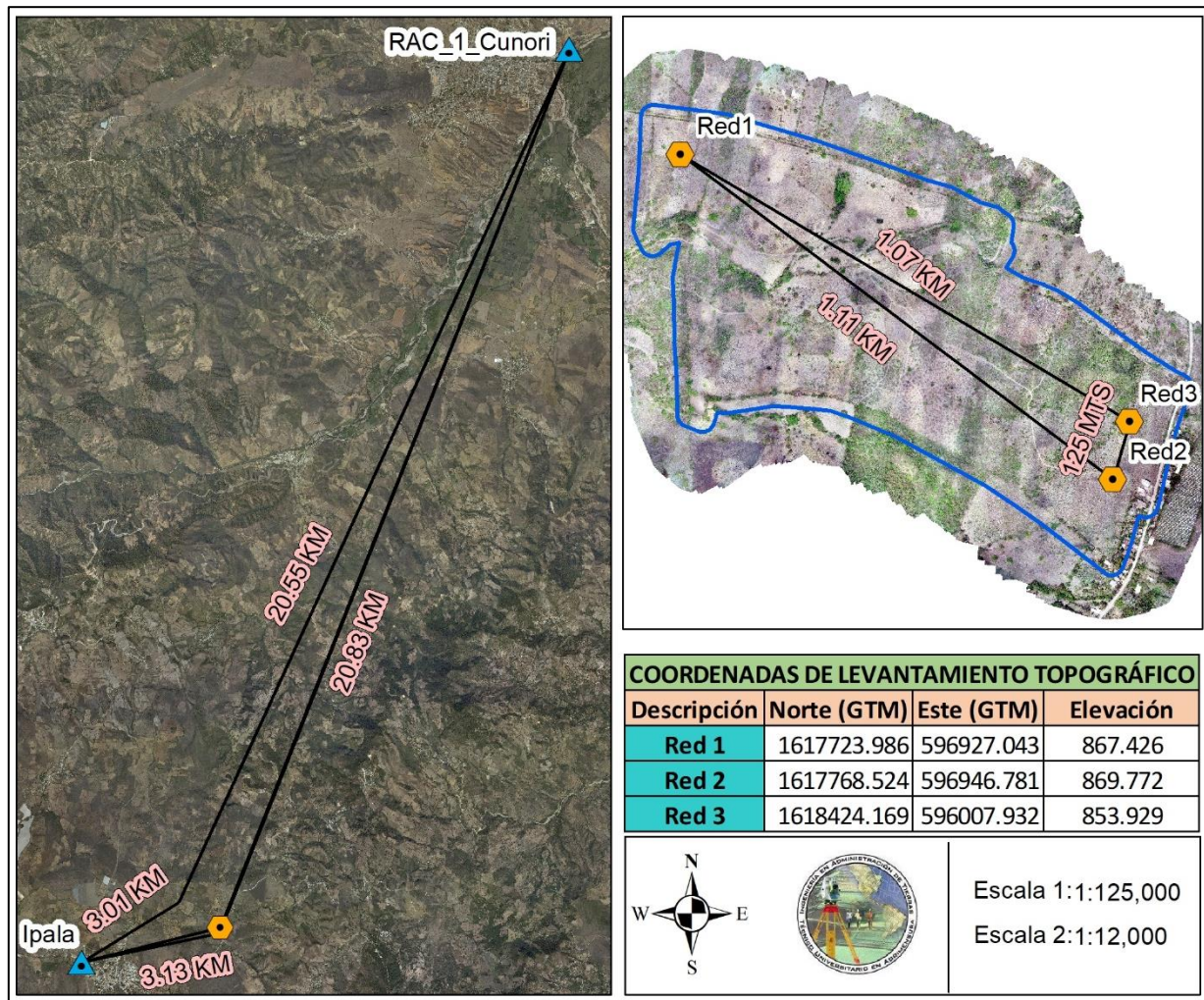
Se obtuvieron las coordenadas GTM del inicio y final del tramo de interés por medio de receptores GPS de alta precisión. La tabla 3, muestra los resultados del pos proceso de los vértices:

Tabla 3: Coordenadas resultantes del pos proceso de la red de apoyo

Descripción	X GTM	Y GTM	Altura Elipsoidal
RAC_1 CUNORI	604564.690	1637123.759	367.753
IPALA	593886.4872	1617114.3797	806.8507
Red1 Finca	596927.043	1617723.986	867.429
Red2 Finca	596946.781	1617768.524	869.772
Red3 Finca	596007.932	1618424.169	853.929

Fuente: Elaboración propia.

La forma de la red es triangular, con una distancia entre el inicio y final del tramo de interés de 1.6 kilómetros. Se aprecia mejor en la figura 14.

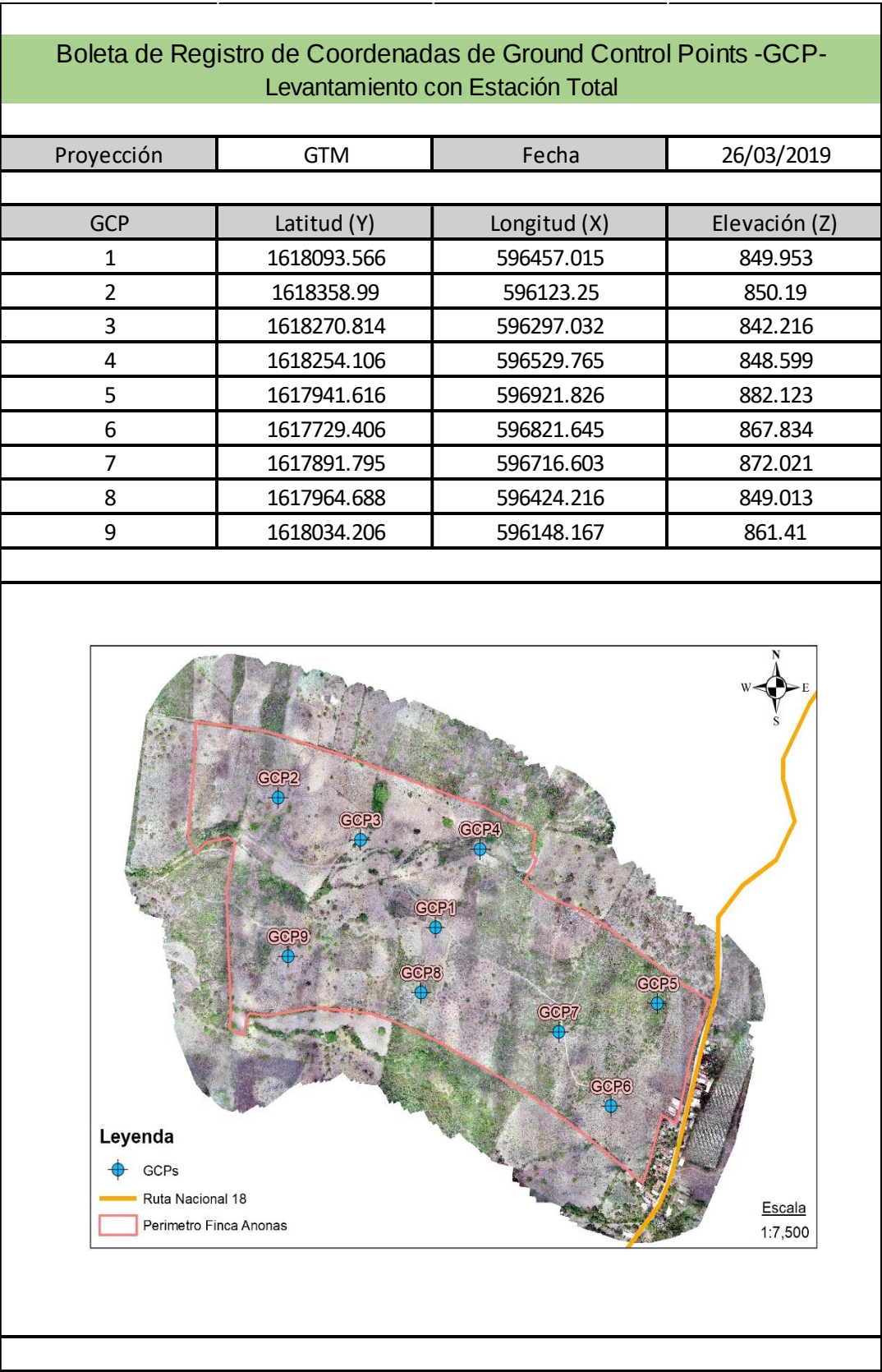


Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Diseño de la red de apoyo geodésica

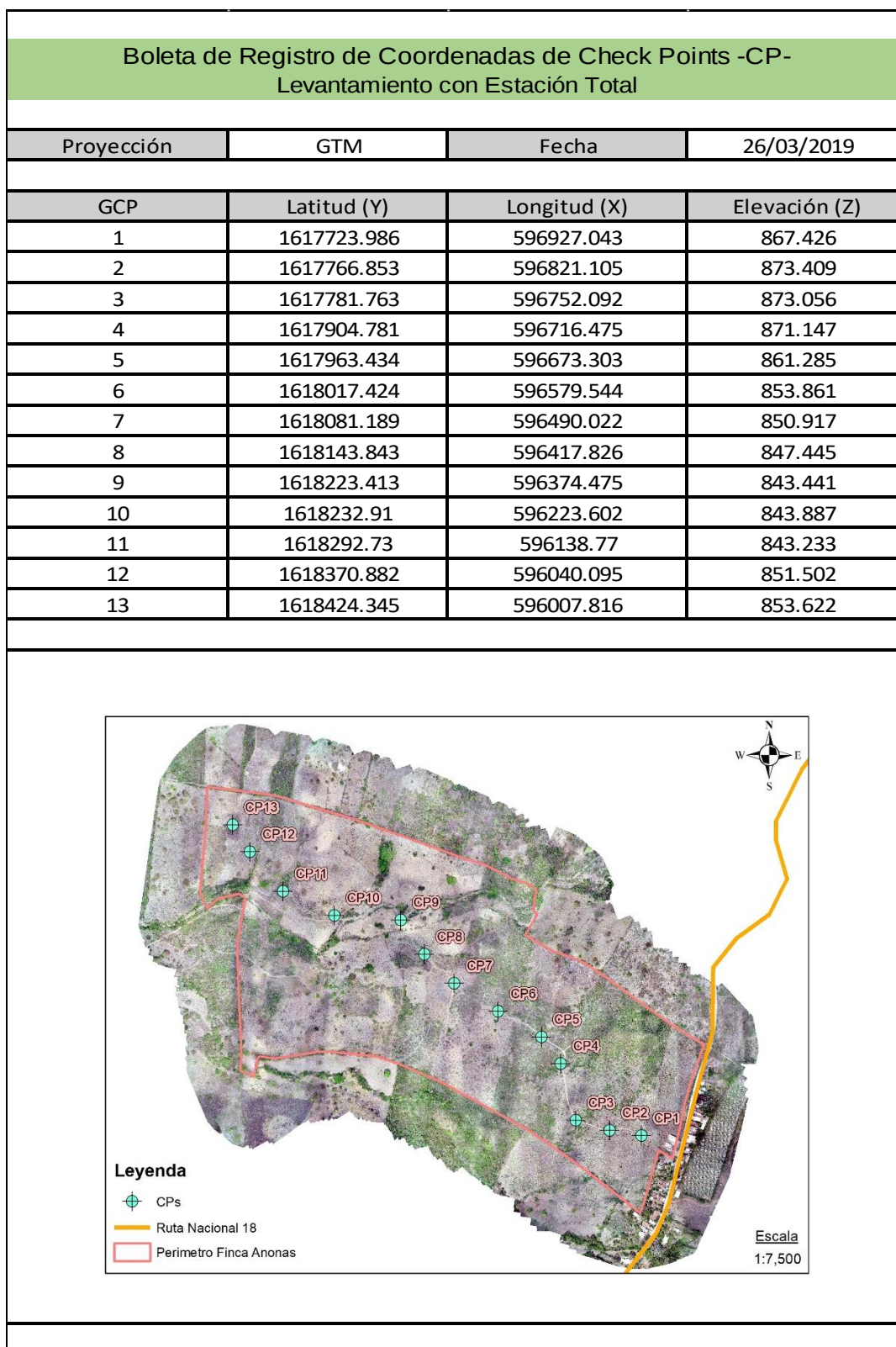
6.1.2. Levantamiento topográfico

Se inició posicionando la estación total en el vértice “Red1” y amarrándolo al vértice “Red2”. Se utilizaron 23 “Estaciones”, 3 Bancos de Marca (Red1, 2 y 3); se levantaron 9 GCP (Puntos de Control Terrestre) y 13 CP (Puntos de Verificación). Además, la diferencia de altura elipsoidal entre el punto mínimo y máximo fue de 30.18 metros. Se obtuvo una distancia de 1233.394 metros entre el inicio y el final del tramo de interés. Se comprende mejor en la figura 15.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15: Puntos de control terrestre con estación total



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16: Puntos de verificación terrestre con estación total

Es importante destacar que el vértice de la red de apoyo denominado “Red 2”, fungió como punto de inicio del levantamiento topográfico. Una vez se posicionó la estación total, se orientó hacia el vértice “Red 3”, de esta manera quedó geoposicionado con coordenadas absolutas. Así mismo, la altitud (z) se condicionó con la obtenida con el pos proceso de la red (cota correspondiente al vértice “Red 2”) y a partir de este banco de marca, se evitaron inconsistencias en altura en el resto de los puntos de interés.

6.2. Levantamientos fotogramétricos

Se ejecutaron 3 proyectos de vuelos separados siguiendo la misma configuración general: traslape, posición de captura, rejilla, entre otras; levantando el mismo conjunto de puntos de apoyo y verificación para evaluar la precisión de ambos. El siguiente cuadro muestra la síntesis de los proyectos:

Tabla 4: Síntesis de vuelos fotogramétricos

Descripción Proyecto	No. de Vuelos	GSD	Traslape Frontal	Traslape Lateral	Cobertura	Tiempo Aprox.	No. de Imágenes
Proyecto 50 metros	8	1.34 cm/px	85 %	75 %	66 ha	146 minutos	3815
Proyecto 120 metros	3	3.13 cm/px	85 %	75 %	88.88 ha	47 minutos	980
Proyecto 200 metros	2	5.47 cm /px	85 %	75 %	116.99 ha	29 minutos	482

Fuente: Elaboración propia.

Para mejor comprensión de la información, los proyectos por separado se detallan a continuación:

Tabla 5: Descripción de proyecto 50 metros de altura

Directrices	Vuelo 1	Vuelo 2	Vuelo 3	Vuelo 4	Vuelo 5	Vuelo 6	Vuelo 7	Vuelo 8
Ubicación	Ipala	Ipala	Ipala	Ipala	Ipala	Ipala	Ipala	Ipala
Dimensión Vuelo	185*698 mts	133*669 mts	139*616 mts	149*637 mts	140*654 mts	119*690 mts	139*618 mts	189*541 mts
Drone	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro
Tiempo de Vuelo	19 min	17 min	20 min	19 min	20 min	18 min	17 min	15 min
GCP	9	9	9	9	9	9	9	9
GSD	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
Fecha	4/4/19	4/4/19	4/4/19	5/4/19	5/4/19	5/4/19	5/4/19	5/4/19
Traslape Promedio	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Imágenes	507	469	511	516	483	505	419	405
Recorrido	5126 m	4729 m	5293 m	5035 m	5214 m	4519 m	3992 m	3711 m

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se aprecia el perímetro de la finca “Anonas” extendido en 25 metros, la distribución de los vuelos dentro de la misma y el recorrido (rejilla) seguido por el dron:



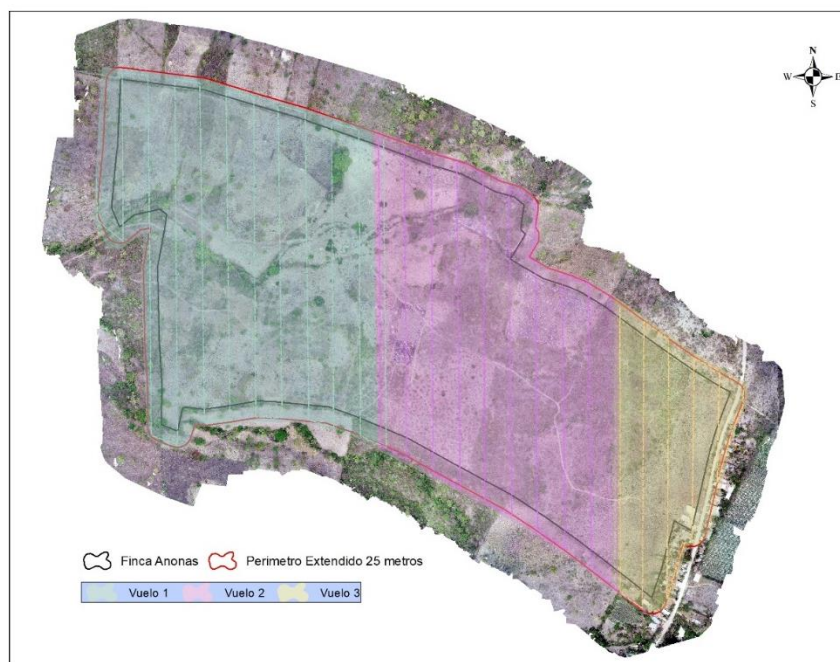
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Vuelos de proyecto a 50 metros

Tabla 6: Descripción de proyecto 120 metros de altura

Directrices	Vuelo 1	Vuelo 2	Vuelo 3
Ubicación	Ipala	Ipala	Ipala
Dimensión Vuelo	519*704 mts	471*882 mts	240*580 mts
Drone	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro
Tiempo de Vuelo	19 min	19 min	10 min
GCP	9	9	9
GSD	3.13	3.13	3.13
Fecha	3/4/19	3/4/19	3/4/19
Traslape Promedio	80 %	80 %	80 %
Imágenes	321	505	154
Recorrido	7695 m	7231 m	2826 m

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Vuelos de proyecto a 120 metros

Tabla 7: Descripción de proyecto 200 metros de altura

Directrices	Vuelo 1	Vuelo 2
Ubicación	Ipala	Ipala
Dimensión Vuelo	640*772 mts	532*857 mts
Drone	Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro
Tiempo de Vuelo	17 min	13 min
GCP	9	9
GSD	5.47	5.47
Fecha	6/4/19	6/4/19
Traslape Promedio	80 %	80 %
Imágenes	270	211
Recorrido	6819 m	4879 m

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Vuelos de proyecto a 200 metros

6.3. Procesos fotogramétricos

Siguiendo el diagrama de trabajo del procesamiento fotogramétrico, se obtuvieron salidas de productos analizables para los tres proyectos descritos, por ejemplo: ortomosaicos, nubes de puntos 3D y modelos de elevación digital (MDE). Los resultados de esta fase se detallan de la siguiente manera:

Proyecto 50 metros de altura

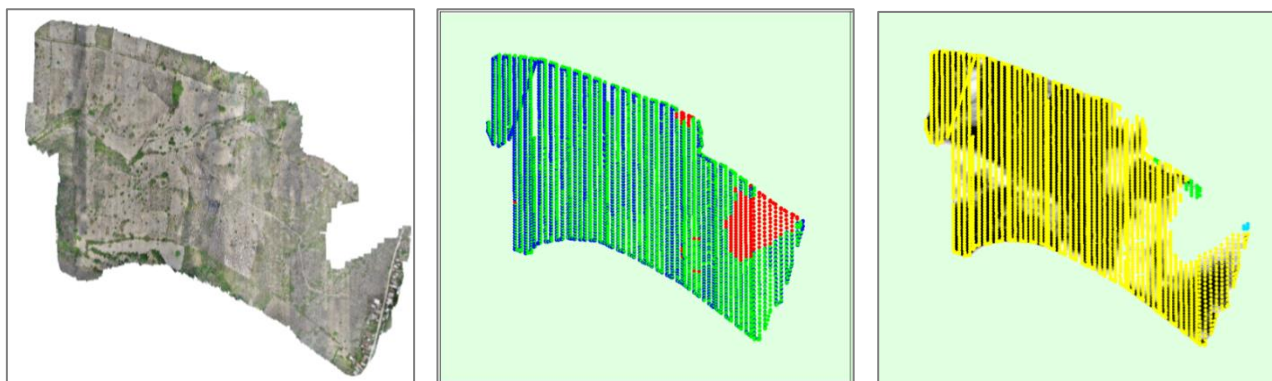
El siguiente cuadro muestra las características más importantes del procesamiento de imágenes con alta resolución y baja altura de vuelo:

Tabla 8: Síntesis procesamiento 50 metros

Parámetro	GCP Utilizados			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	8GCP
Tiempo de Procesamiento	24 – 48 horas	48 – 72 horas	48 – 72 horas	48 – 72 horas
Imágenes Calibradas	3577 de 3815 (93%)	3540 de 3815 (92%)	3543 de 3815 (92%)	3540 de 3815 (92%)
Error Promedio en X (metros)	1.288	0.121	0.000	0.000
Error Promedio en Y (metros)	1.801	0.431	0.000	0.000
Error Promedio en Z (metros)	9.653	3.501	0.001	0.000
Peso en GB del proyecto	60.7 GB	95.8 GB	94.8 GB	85.1 GB
Descripción Salidas	Peso en GB de los Productos Resultantes			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	8GCP
Ortomosaico	7.83 GB	8.01 GB	8.17 GB	8.16 GB
Nube de Puntos	10.1 GB	15.1 GB	14.46 GB	14.25 GB
DTM	374 MB	592 MB	607 MB	602 MB
DSM	4.22 GB	4.2 GB	4.41 GB	4.22 GB

Fuente: Elaboración propia.

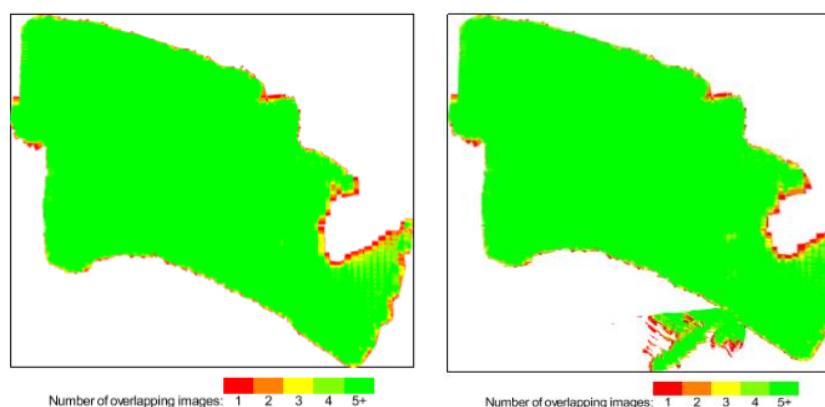
Del cuadro anterior se aprecia que no todas las imágenes se calibraron correctamente. Esto debido a una alta resolución de captura al volar con baja altura en zonas con vegetación densa. El software no identificó puntos en común entre los fotogramas y, por ende, no logró la orientación interna de esa área. Este hito se observa mejor en la siguiente figura:



Fuente: Informe Pix4d Mapper, 2019.

Figura 20: Error de calibración de imágenes en áreas de vegetación densa

Este fenómeno se repitió con los 4 procesamientos. Es importante mencionar que un punto de control terrestre (GCP) se ubicó en esa área específica, por lo tanto, no fue incluido en la orientación del proyecto, derivando en un máximo de 8 GCP para esta altura en particular. No obstante, menospreciando el área conflictiva, el resto de la finca presentó mejores características y se reflejó en la figura de cobertura mediante traslape frontal y lateral, mostrada a continuación:



Fuente: Informe Pix4d Mapper, 2019.

Figura 21: Traslape entre imágenes de proyecto a 50 metros

Otro parámetro importante en el procesamiento fue el error promedio en posicionamiento y altura del proyecto, este error sugiere que los procesos fotogramétricos se realizaron correctamente, sin embargo, no indica en ningún caso que la precisión absoluta respecto a la medición topográfica sea exactamente el mismo error.

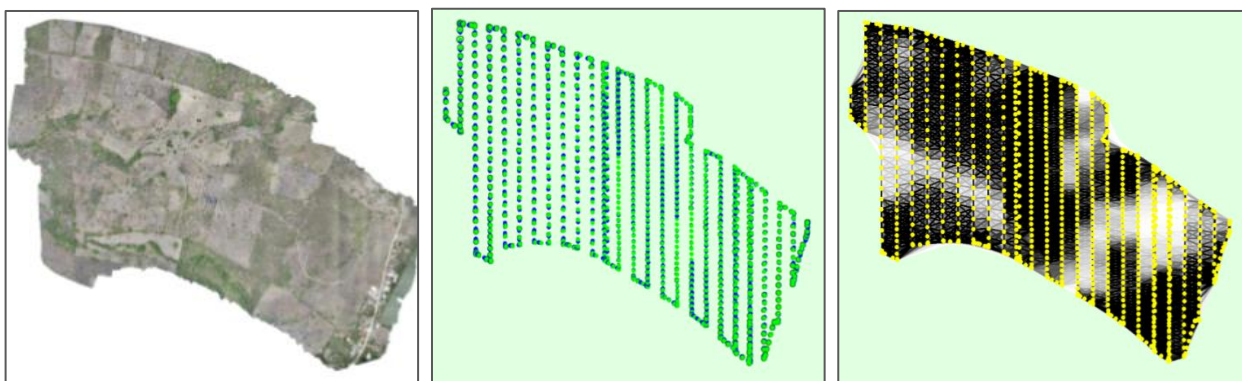
Proyecto 120 metros de altura

Tabla 9: Síntesis procesamiento 120 metros

Parámetro	GCP Utilizados			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	9GCP
Tiempo de Procesamiento	10 - 18 horas	12 - 24 horas	12 - 24 horas	12 – 24 horas
Imágenes Calibradas	980 de 980 (100%)	980 de 980 (100%)	980 de 980 (100%)	980 de 980 (100%)
Error Promedio en X (metros)	1.251	0.011	0.014	0.026
Error Promedio en Y (metros)	4.564	0.028	0.022	0.023
Error Promedio en Z (metros)	1.856	0.003	0.012	0.008
Peso en GB del proyecto	39.8 GB	31.0 GB	31.6 GB	32.5 GB
Descripción Salidas	Peso en GB de los Productos Resultantes			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	8GCP
Ortomosaico	1.6 GB	2.45 GB	2.51 GB	2.51 GB
Nube de Puntos	4.78 GB	4.59 GB	4.60 GB	4.74 GB
DTM	545 MB	803 MB	816 MB	814 MB
DSM	1.37 GB	1.20 GB	1.32 GB	1.32 GB

Fuente: Elaboración propia.

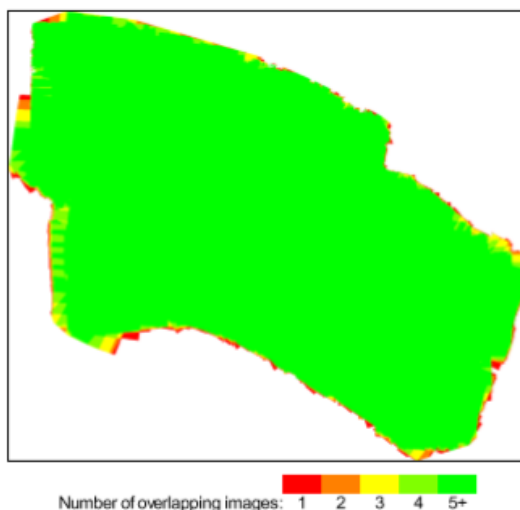
De acuerdo al cuadro anterior, el porcentaje de imágenes calibradas es del 100%, es decir, esta altura no presentó ningún inconveniente respecto al procesamiento de imágenes con vegetación densa. El software identificó correctamente los puntos que coincidían y los relacionó. Para muestra la siguiente figura:



Fuente: Informe Pix4d, 2019.

Figura 22: Calibración de imágenes a 120 metros de altura

También se aprecia una disminución considerable en el peso total de los proyectos, el tiempo de procesamiento y el peso individual de los productos respecto al proyecto de 50 metros de altura. En cuanto al traslape, se mantuvo en óptimo en toda la finca.



Fuente: Informe Pix4d, 2019.

Figura 23: Traslape en proyecto a 120 metros

Proyecto 200 metros de altura

En este proyecto, el traslape y la calibración de las imágenes se mantuvo idéntico al de 120 metros. No obstante, el peso de los productos y del procesamiento en general, se redujo drásticamente. Al mismo tiempo, el tiempo fluctuó entre 3 y 8 horas. Se resume en el cuadro siguiente:

Tabla 10: Síntesis procesamiento 200 metros

Parámetro	GCP Utilizados			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	9GCP
Tiempo de Procesamiento	3 - 6horas	6 - 8 horas	6 - 8 horas	6 - 8 horas
Imágenes Calibradas	482 de 482 (100%)	482 de 482 (100%)	482 de 482 (100%)	482 de 482 (100%)
Error Promedio en X (metros)	1.282	0.018	0.015	0.026
Error Promedio en Y (metros)	3.951	0.035	0.031	0.031
Error Promedio en Z (metros)	1.021	0.009	0.017	0.025
Peso en GB del proyecto	15.4 GB	15.4 GB	15.3 GB	15.4 GB
Descripción Salidas	Peso en GB de los Productos Resultantes			
	Sin GCP	5 GCP	7 GCP	8GCP
Ortomosaico	1.07 GB	1.07 GB	1.06 GB	1.07 GB
Nube de Puntos	1.95 GB	1.95 GB	1.95 GB	1.86 GB
DTM	275 MB	275 MB	289 MB	230 MB
DSM	604 MB	604 MB	575 MB	605 MB

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Análisis

Aquí se proporcionan comparaciones entre vuelos sin GCP, con 5, 7 y 9 GCP bien distribuidos y mediciones con estación total. Los vuelos siguieron las mismas configuraciones y se levantó el mismo conjunto de puntos de verificación para evaluar la precisión.

6.4.1. Cotejo de coordenadas X y Y a 50 metros de altura

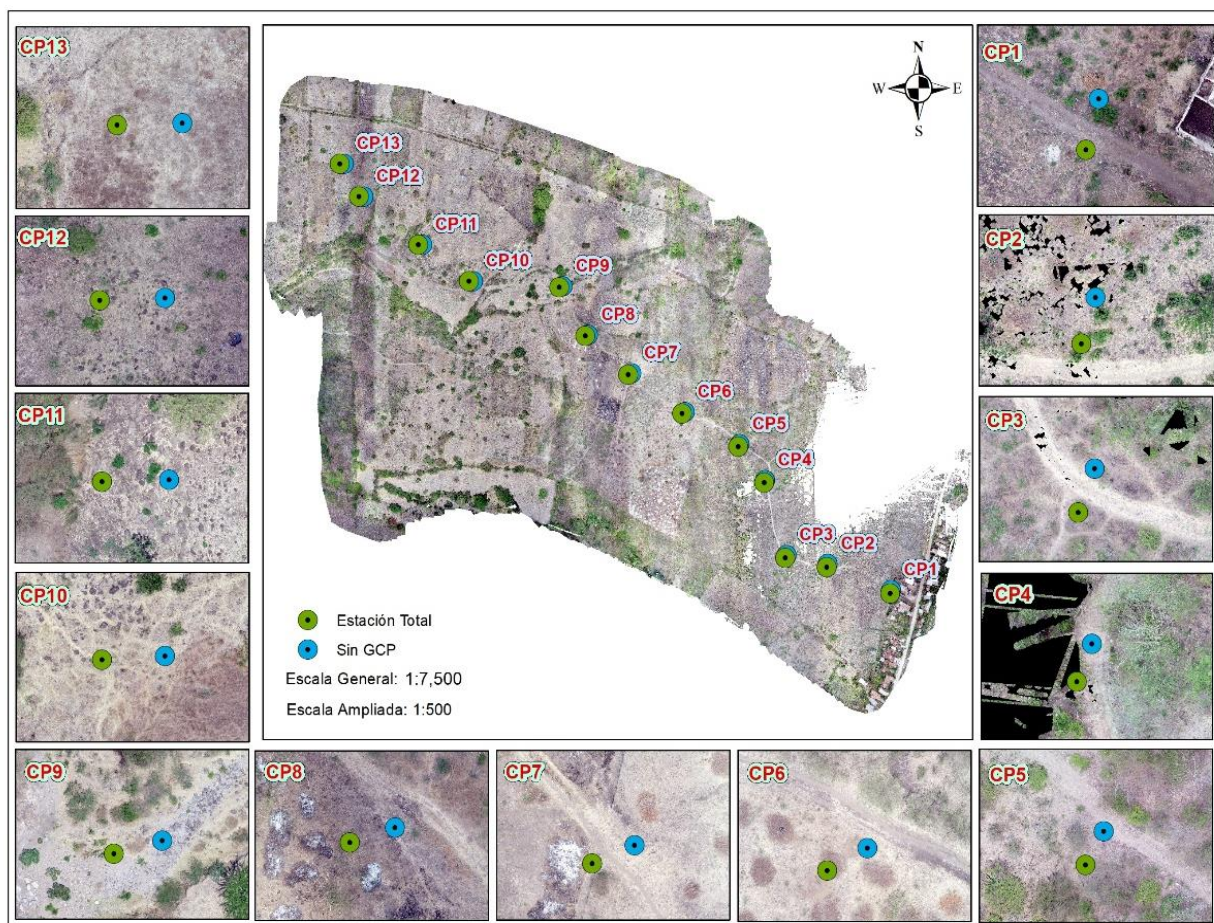
En el siguiente cuadro se comparan coordenadas obtenidas del levantamiento geo referenciado con estación total y las obtenidas con vuelos aéreos a 50 metros de altura. (Tabulación general véase en anexo 3).

Tabla 11: Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 50 metros

Punto	Est. Vs Sin GCP			Est. Vs 5 GCP			Est. Vs 7 GCP			Est. Vs 8 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	-1.419	-5.530	11.793	-0.635	-2.868	-21.935	0.010	-0.923	1.347	0.031	-0.042	1.011
CP2	-1.612	-5.035	14.667	-0.224	-2.396	-15.609	-0.717	-0.306	0.043	-0.124	-0.079	0.424
CP3	-1.862	-4.788	16.826	-0.158	-1.872	-12.549	-0.325	-0.981	-1.507	-0.087	-0.118	-0.385
CP4	-1.647	-4.109	18.489	0.497	-1.379	-6.166	-0.177	-0.719	2.976	0.017	-0.010	-0.022
CP5	-2.074	-3.641	20.535	0.510	-0.816	-3.845	0.500	-1.148	-4.903	0.086	-0.039	-0.246
CP6	-4.432	-2.418	27.176	0.017	-0.097	-1.680	0.000	0.006	-0.021	0.009	-0.014	-0.125
CP7	-4.740	-1.982	34.197	-0.005	-0.012	-0.291	0.015	0.004	-0.021	0.004	0.015	0.007
CP8	-5.036	-1.613	40.076	-0.005	0.015	0.461	0.020	-0.019	0.001	0.004	0.023	0.014
CP9	-5.380	-1.418	44.163	-0.063	-0.060	0.833	-0.056	-0.112	0.013	-0.066	-0.038	0.011
CP10	-6.969	-0.415	56.579	-0.013	0.108	0.977	-0.075	0.014	-0.396	-0.025	0.032	-0.024
CP11	-7.452	-0.194	65.780	0.016	0.012	0.478	-0.081	0.010	-0.131	-0.058	-0.002	0.043
CP12	-7.259	-0.238	76.660	-0.008	-0.025	-0.753	-0.027	0.012	0.237	-0.050	-0.020	0.035
CP13	-7.241	-0.220	81.207	0.000	-0.062	-1.495	0.031	-0.009	0.444	-0.021	-0.043	0.003
Prom.	4.394	2.431	39.088	0.165	0.748	5.159	0.156	0.328	0.926	0.045	0.037	0.181

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a posición (X y Y) de los puntos de verificación (CP), se observa que al no utilizar puntos de control terrestre (GCP), el modelo sufre imprecisiones absolutas que van desde 1.419 metros hasta los 7.452 metros en el eje X; y en el eje Y, desde 0.194 metros hasta los 5.53 metros respectivamente. Este fenómeno se aprecia mejor en la siguiente figura:

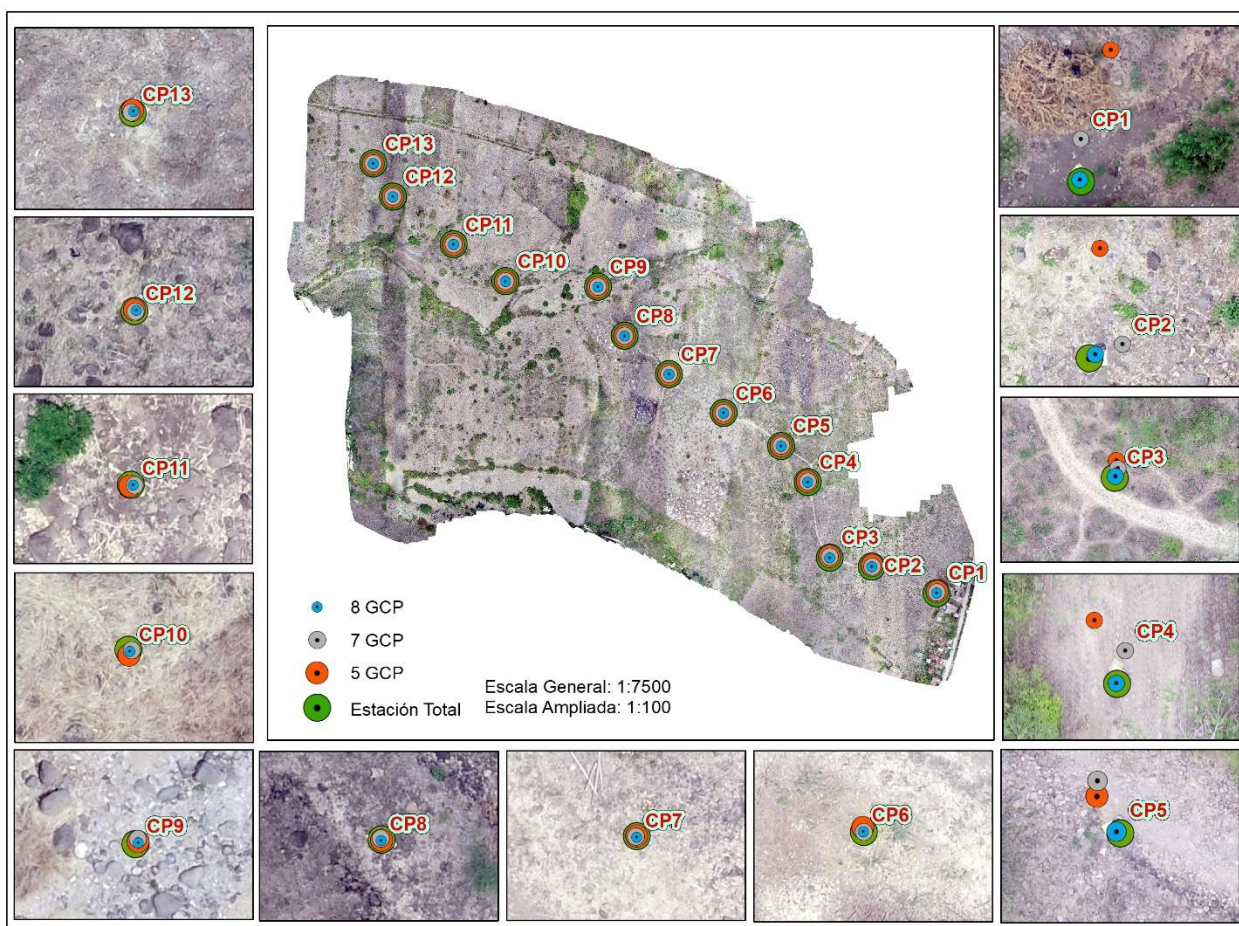


Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Diferencia de posicionamiento entre estación total y 50 metros sin GCP

Es evidente un patrón de desplazamiento hacia la derecha y hacia arriba (noreste) en el modelo final. Los productos procesados sin puntos de control terrestres muestran posición inexacta por corrimiento mayor de 4 metros. Este rango de imprecisión es propio del GPS a bordo de la aeronave, no obstante, esto no significa que el modelo sea incorrecto...

Respecto al posicionamiento en los productos con 5, 7 y 8 GCP el desplazamiento de posición del modelo es perceptible en los puntos CP1 – CP5 debido únicamente al error de calibración de las imágenes en áreas de vegetación densa y arbustos. Las distancias máximas de desplazamiento alcanzan los 2.93 en este sector. Por contraparte, los puntos CP6 – CP 13 muestran errores ínfimos, menores a 10 cm. Para atisbo del mismo, se adjunta la siguiente ilustración:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25: Diferencia de posicionamiento entre estación total y 50 metros con 5, 7 y 8 GCP

Al aplicar 8 puntos de control (8GCP) se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a posicionamiento se refiere. Con un máximo de desplazamiento en el eje X de 12.4 cm y de 11.8 cm en el eje Y respectivamente.

El procesamiento con 8 GCP representó el modelo más exacto en todos los puntos de verificación, manteniéndose constante en el 90 % de ellos. Los resultados estuvieron condicionados al error de calibración de las cámaras y, por tanto, los puntos más precisos se dan del CP6 – CP13 estando alejados del área conflictiva.

6.4.2. Cotejo de distancia y elevación a 50 metros de altura

El siguiente parámetro de comparación fue la distancia del tramo de interés levantado con estación total y la distancia medida mediante fotointerpretación (véase en anexo 4). Como resultado se obtuvieron distancias entre puntos de verificación (CPs) y distancia total del tramo. Además, se incluyó la altura (Z) de los puntos y su perfil de terreno. Los siguientes cuadros resumen la comparación de los datos:

Tabla 12: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 50 metros de altura sin GCP y con 5 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 50 mts Sin GCP			Estación Vs 50 mts 5 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	11.793	0.000	0.000	-21.935
CP2	CP1-CP2	0.364	0.364	14.667	-0.206	-0.206	-15.609
CP3	CP2-CP3	0.296	0.660	16.826	0.044	-0.162	-12.549
CP4	CP3-CP4	0.591	1.251	18.489	0.289	0.127	-6.166
CP5	CP4-CP5	0.631	1.882	20.535	0.445	0.572	-3.845
CP6	CP5-CP6	2.653	4.535	27.176	0.785	1.357	-1.680
CP7	CP6-CP7	0.504	5.039	34.197	0.067	1.424	-0.291
CP8	CP7-CP8	0.466	5.505	40.076	0.018	1.442	0.461
CP9	CP8-CP9	0.336	5.841	44.163	-0.038	1.404	0.833
CP10	CP9-CP10	1.647	7.488	56.579	-0.039	1.365	0.977
CP11	CP10-CP11	0.522	8.010	65.780	-0.079	1.286	0.478
CP12	CP11-CP12	-0.179	7.831	76.660	-0.004	1.282	-0.753
CP13	CP12-CP13	0.007	7.838	81.207	-0.036	1.246	-1.495
PROMEDIO		0.510		39.088	0.158		5.159
DIFERENCIAS				+ - 69.414			+ - 22.812

Fuente: Elaboración propia.

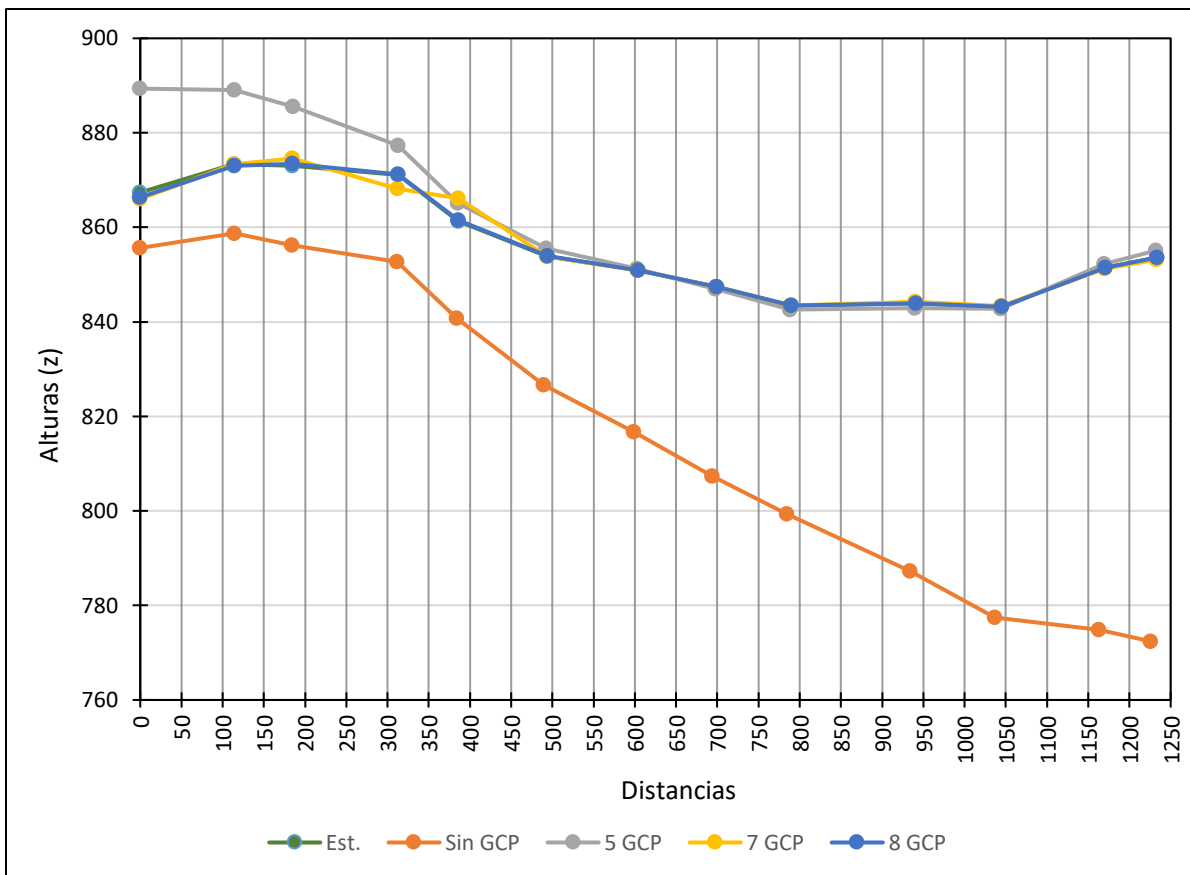
Tabla 13: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 50 metros de altura con 7 y 8 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 50 mts 7 GCP			Estación Vs 50 mts 8 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	1.347	0.000	0.000	1.011
CP2	CP1-CP2	0.904	0.904	0.043	0.129	0.129	0.424
CP3	CP2-CP3	-0.528	0.376	-1.507	-0.045	0.084	-0.385
CP4	CP3-CP4	0.210	0.586	2.976	0.074	0.158	-0.022
CP5	CP4-CP5	-0.746	-0.160	-4.903	-0.064	0.094	-0.246
CP6	CP5-CP6	1.006	0.846	-0.021	0.079	0.173	-0.125
CP7	CP6-CP7	-0.013	0.833	-0.021	0.021	0.194	0.007
CP8	CP7-CP8	-0.019	0.814	0.001	0.006	0.200	0.014
CP9	CP8-CP9	-0.044	0.770	0.013	-0.020	0.180	0.011
CP10	CP9-CP10	0.027	0.797	-0.396	-0.036	0.144	-0.024
CP11	CP10-CP11	0.003	0.800	-0.131	0.007	0.151	0.043
CP12	CP11-CP12	-0.041	0.759	0.237	-0.017	0.134	0.035
CP13	CP12-CP13	-0.047	0.712	0.444	-0.035	0.099	0.003
PROMEDIO		0.276		0.926	0.041		0.181
DIFERENCIAS				+ - 6.25			+ - 1.396

Fuente: Elaboración propia.

El tramo de interés tiene una distancia medida con estación total de 1,233.395 metros. (Véase en anexo 2 la tabulación general del tramo de interés con estación total).

La medición de la nube de puntos sin GCP arrojó una distancia de 1,225.557 metros, suponiendo una diferencia de 7.838 metros (error de 0.603 metros por punto de verificación) respecto a la estación total, lo cual, es un error significativo en distancia. Se comprende mejor en el siguiente gráfico:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Perfiles de estación total vs vuelo a 50 metros de altura

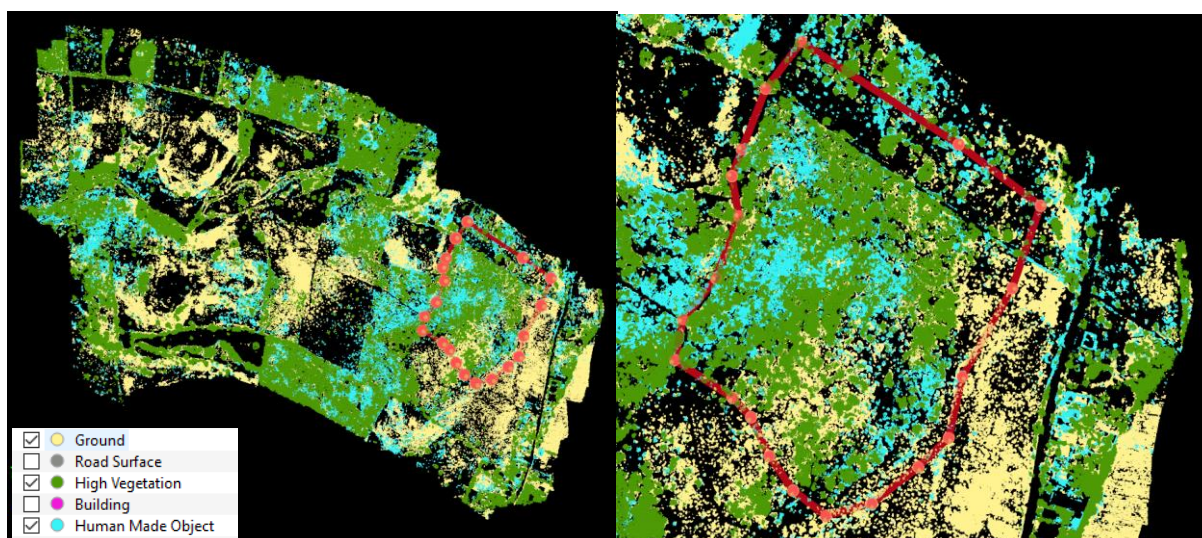
Al incluir 5 puntos de control terrestre (5GCP), la gráfica sugiere errores significativos en elevación en los puntos 1 - 6 (haciendo alusión al error de calibración de las imágenes). Contando con una diferencia mayor a metro y medio (1.5 m) en el punto 6 y progresando agresivamente hasta los 21 metros en el punto 1. Sin embargo, a partir del séptimo (7) punto el error disminuye y es menos evidente con diferencias inferiores al metro. La distancia del tramo fue de 1,232.149 metros, es decir, una diferencia de 1.246 metros respecto a la estación total (promedio de 15 cm de desplazamiento por punto).

En el caso del modelo con 7 puntos de control, el promedio de diferencias de elevación se redujo significativamente hasta los 92.6 cm, sugiriendo un apego más fiel a la realidad. No obstante, aún significa un error grande en altura, especialmente en el mismo conjunto de puntos conflictivos (1 – 6). La distancia medida en este modelo fue de 1,232.683 metros, es decir, 71 cm menos que la estación total.

Al igual que el cotejo en posicionamiento, el modelo con mejores resultados fue el procesado con 8 puntos de control terrestre (8GCP) promediando 18 cm de error en elevación. El punto más conflictivo lo representa el CP1 con error de 1 metro, sumado a los puntos 2 – 6 que afectaron negativamente el modelo. Por contraparte, el CP13 cuenta con 3 mm de error. La distancia de este modelo fue de 1,233.296 metros, respecto a la estación total supone una diferencia de 10 cm (promedio de 4 cm por punto).

Área conflictiva de calibración

En este apartado se detalla el área que por su morfología presentó errores en los procesamientos fotogramétricos y tiene una extensión aproximada de 2.27 hectáreas. Los arbustos y la vegetación densa de esta zona presentaron una apariencia muy diferente entre las imágenes superpuestas debido a su compleja geometría (miles de ramas y hojas). Por lo tanto, no fue posible extraer puntos de características comunes (puntos clave) entre ellas. El área se ilustra a continuación:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27: Clasificación de área conflictiva

Esta zona presenta únicamente el 10 % de suelo desnudo (color amarillo) y el resto se presenta como arbustos (cyan) y vegetación alta y densa (verde). No se recomienda un plan de adquisición de imágenes sobre zonas con similares características a alturas iguales o menores de 50 metros.

6.4.3. Cotejo de coordenadas X y Y a 120 metros de altura

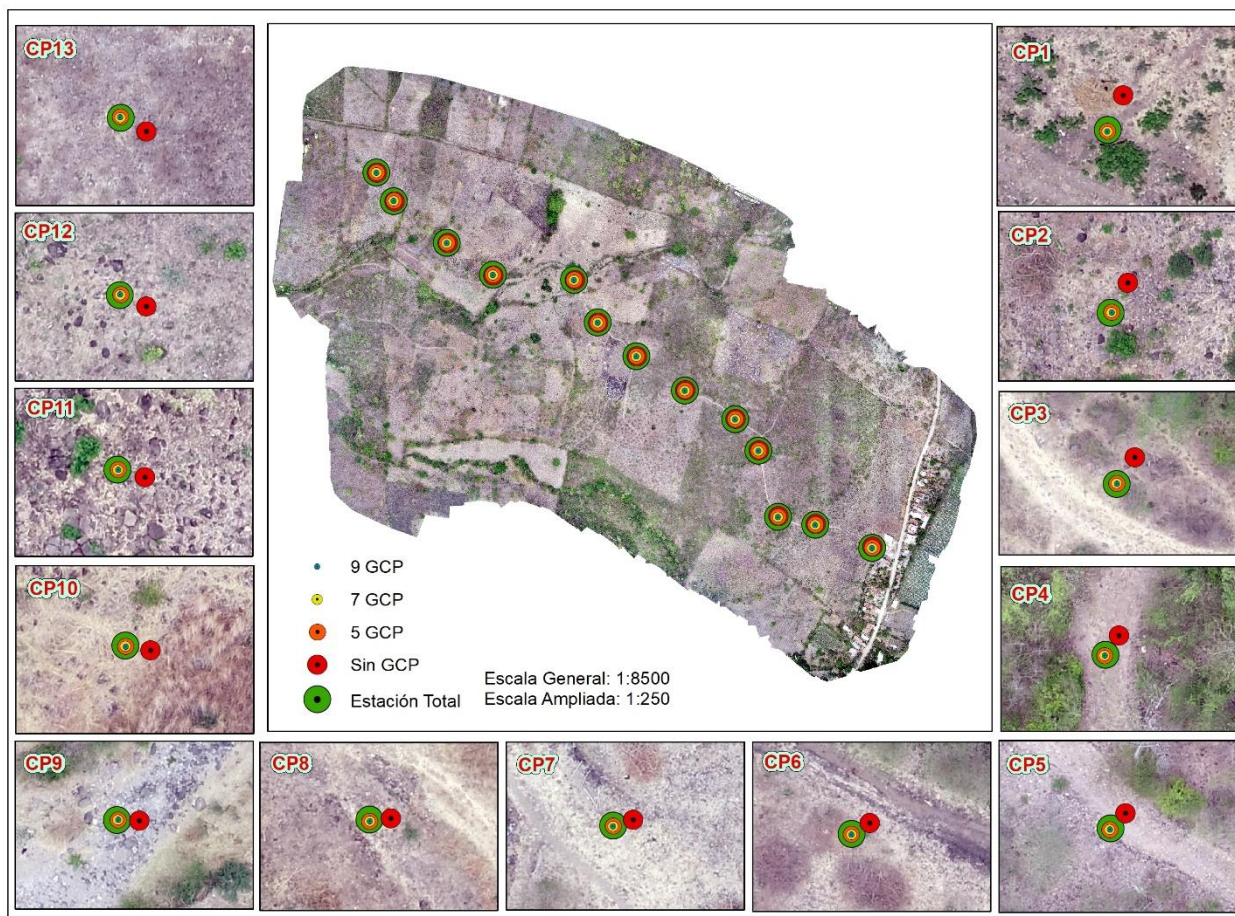
En este proyecto se redujo la resolución de las imágenes agregando altura a los vuelos, no obstante, se corrigió la calibración de las imágenes en la zona conflictiva. Las coordenadas obtenidas de la nube de puntos se adjuntan en el anexo 5. A continuación se muestran las diferencias en posicionamiento de los modelos respecto a la estación total:

Tabla 14: Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 120 metros

Punto	Est. Vs Sin GCP			Est. Vs 5 GCP			Est. Vs 7 GCP			Est. Vs 9 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	-0.835	-1.914	54.332	0.013	0.075	0.016	0.019	0.077	-0.080	0.016	0.072	0.017
CP2	-0.921	-1.644	55.596	-0.044	-0.007	0.009	-0.044	-0.013	-0.002	-0.057	-0.014	-0.049
CP3	-0.996	-1.476	56.309	-0.003	-0.027	-0.064	-0.012	-0.051	-0.056	-0.028	-0.043	-0.106
CP4	-0.744	-1.078	56.703	0.049	0.036	-0.009	0.044	0.015	0.039	0.019	0.022	-0.019
CP5	-0.793	-0.851	57.024	0.067	0.066	-0.078	0.061	0.045	-0.056	0.046	0.055	-0.119
CP6	-0.997	-0.601	57.931	0.013	0.035	-0.120	-0.002	0.024	-0.102	-0.020	0.028	-0.107
CP7	-1.073	-0.327	58.909	0.018	0.043	-0.102	0.010	0.024	-0.076	-0.002	0.021	-0.063
CP8	-1.167	-0.089	59.730	-0.013	0.089	-0.057	-0.022	0.058	-0.021	-0.040	0.065	-0.046
CP9	-1.209	0.019	59.957	-0.054	0.006	-0.157	-0.037	-0.031	-0.187	-0.065	-0.015	-0.137
CP10	-1.385	0.255	61.645	-0.004	0.047	-0.093	0.002	0.032	-0.114	-0.028	0.043	-0.105
CP11	-1.493	0.397	62.532	-0.031	-0.001	0.010	-0.033	-0.008	-0.134	-0.058	-0.004	-0.094
CP12	-1.466	0.630	63.584	-0.056	-0.015	-0.008	-0.024	-0.022	-0.058	-0.031	-0.029	0.021
CP13	-1.391	0.722	63.718	0.016	-0.057	0.003	0.031	-0.043	-0.222	0.026	-0.054	-0.126
Prom.	1.113	0.769	59.075	0.029	0.039	0.056	0.026	0.034	0.088	0.034	0.036	0.078

Fuente: Elaboración propia.

Vemos ínfimos desplazamientos de posición (X y Y), incluso sin utilizar GCP se obtuvo un promedio de 1 metro. En comparación con el conseguido a 50 metros (alta resolución), se redujeron drásticamente los errores. También se aprecia que el utilizar 5, 7 o 9 puntos de control a esta altura no es significativo y no aumenta la precisión, en otras palabras, la precisión obtenida con 5 GCP es relativamente la misma conseguida con 7 y 9 GCP respectivamente (diferencias menores a 5 mm en posicionamiento y 2.5 cm en altura); ilustrado en la siguiente figura:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28: Diferencia de posicionamiento entre estación total y 120 metros

El único desplazamiento evidente se sufrió al no incluir control terrestre y es propio del GPS a bordo del dron. En general, al utilizar GCPs se obtuvieron modelos posicionalmente exactos y altamente precisos.

6.4.4. Cotejo de distancia y elevación a 120 metros de altura

En el parámetro de distancia, la mayor discrepancia se dio en el modelo sin puntos de control terrestre con 2.20 metros menos que la medida con estación total (17 cm de desplazamiento por punto de verificación). Respecto a la medida de distancia con 5, 7 y 9 GCP, la diferencia entre tramos va desde los 3.5 hasta los 4.5 cm; es decir, 1 cm de margen entre modelos no es significativo en distancia (tabulación general en anexo 6). Se comprende mejor en los siguientes cuadros:

Tabla 15: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 120 metros de altura sin GCP y con 5 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 120 mts Sin GCP			Estación Vs 120 mts 5 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	54.332	0.000	0.000	0.016
CP2	CP1-CP2	0.180	0.180	55.596	0.022	0.022	0.009
CP3	CP2-CP3	0.108	0.288	56.309	-0.045	-0.022	-0.064
CP4	CP3-CP4	0.312	0.600	56.703	0.046	0.023	-0.009
CP5	CP4-CP5	0.212	0.812	57.024	0.014	0.037	-0.078
CP6	CP5-CP6	0.302	1.114	57.931	0.031	0.068	-0.120
CP7	CP6-CP7	0.221	1.335	58.909	0.001	0.070	-0.102
CP8	CP7-CP8	0.228	1.562	59.730	0.053	0.123	-0.057
CP9	CP8-CP9	0.114	1.677	59.957	-0.053	0.070	-0.157
CP10	CP9-CP10	0.191	1.867	61.645	-0.047	0.023	-0.093
CP11	CP10-CP11	0.170	2.037	62.532	-0.005	0.018	0.010
CP12	CP11-CP12	0.123	2.160	63.584	0.011	0.029	-0.008
CP13	CP12-CP13	0.040	2.200	63.718	-0.073	0.044	0.003
PROMEDIO		0.169		59.075	0.033		0.056
DIFERENCIAS				+ - 9.386			+ - 0.173

Fuente: Elaboración propia.

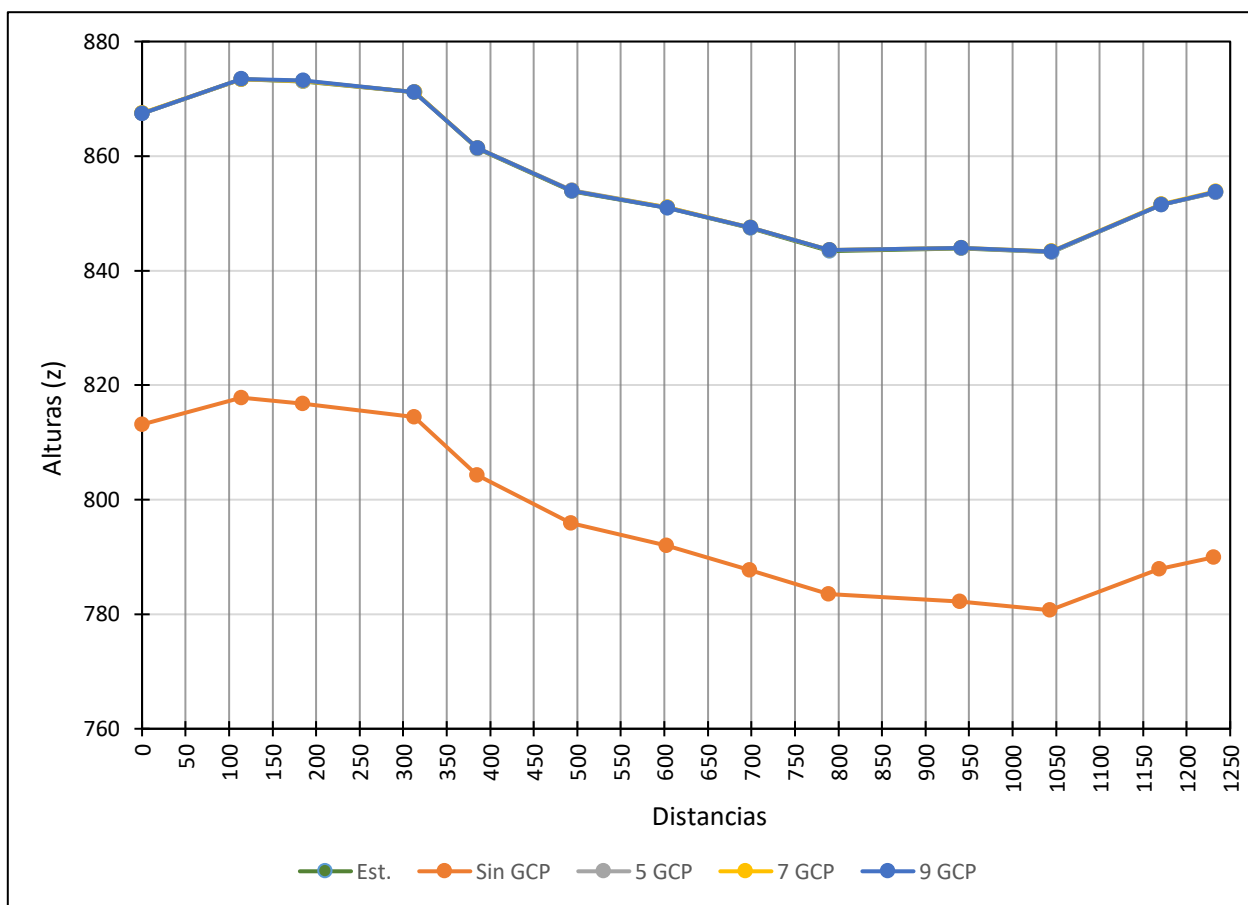
Es importante mencionar que la resolución de este proyecto está dada en 3.13 cm/píxel; por lo tanto, esto representa el error permitido en las mediciones sobre los modelos. Con esta premisa, la tabla 15 sugiere que los puntos de verificación presentan un error en distancia promedio de 3 cm (1 píxel). En elevación, las diferencias promedian 5 cm, lo cual es insignificante dada la extensión del área de estudio. Los mismo se repite para los modelos con 7 y 9 puntos de control terrestre.

Tabla 16: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 120 metros de altura con 7 y 9 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 120 mts 7 GCP			Estación Vs 120 mts 9 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	-0.080	0.000	0.000	0.017
CP2	CP1-CP2	0.024	0.024	-0.002	0.035	0.035	-0.049
CP3	CP2-CP3	-0.039	-0.016	-0.056	-0.034	0.001	-0.106
CP4	CP3-CP4	0.047	0.031	0.039	0.049	0.050	-0.019
CP5	CP4-CP5	0.015	0.046	-0.056	0.010	0.060	-0.119
CP6	CP5-CP6	0.044	0.091	-0.102	0.044	0.105	-0.107
CP7	CP6-CP7	-0.009	0.081	-0.076	-0.018	0.087	-0.063
CP8	CP7-CP8	0.047	0.128	-0.021	0.058	0.144	-0.046
CP9	CP8-CP9	-0.071	0.057	-0.187	-0.058	0.086	-0.137
CP10	CP9-CP10	-0.035	0.022	-0.114	-0.033	0.053	-0.105
CP11	CP10-CP11	0.006	0.027	-0.134	-0.003	0.050	-0.094
CP12	CP11-CP12	-0.016	0.011	-0.058	-0.036	0.014	0.021
CP13	CP12-CP13	-0.047	0.035	-0.222	-0.050	0.036	-0.126
PROMEDIO		0.031		0.088	0.033		0.078
DIFERENCIAS				+ - 0.261			+ - 0.147

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura, muestra los perfiles de los modelos procesados en este proyecto y las distancias extraídas de los mismos:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29: Perfiles de estación total vs vuelo a 120 metros de altura

6.4.5. Cotejo de coordenadas X y Y a 200 metros de altura

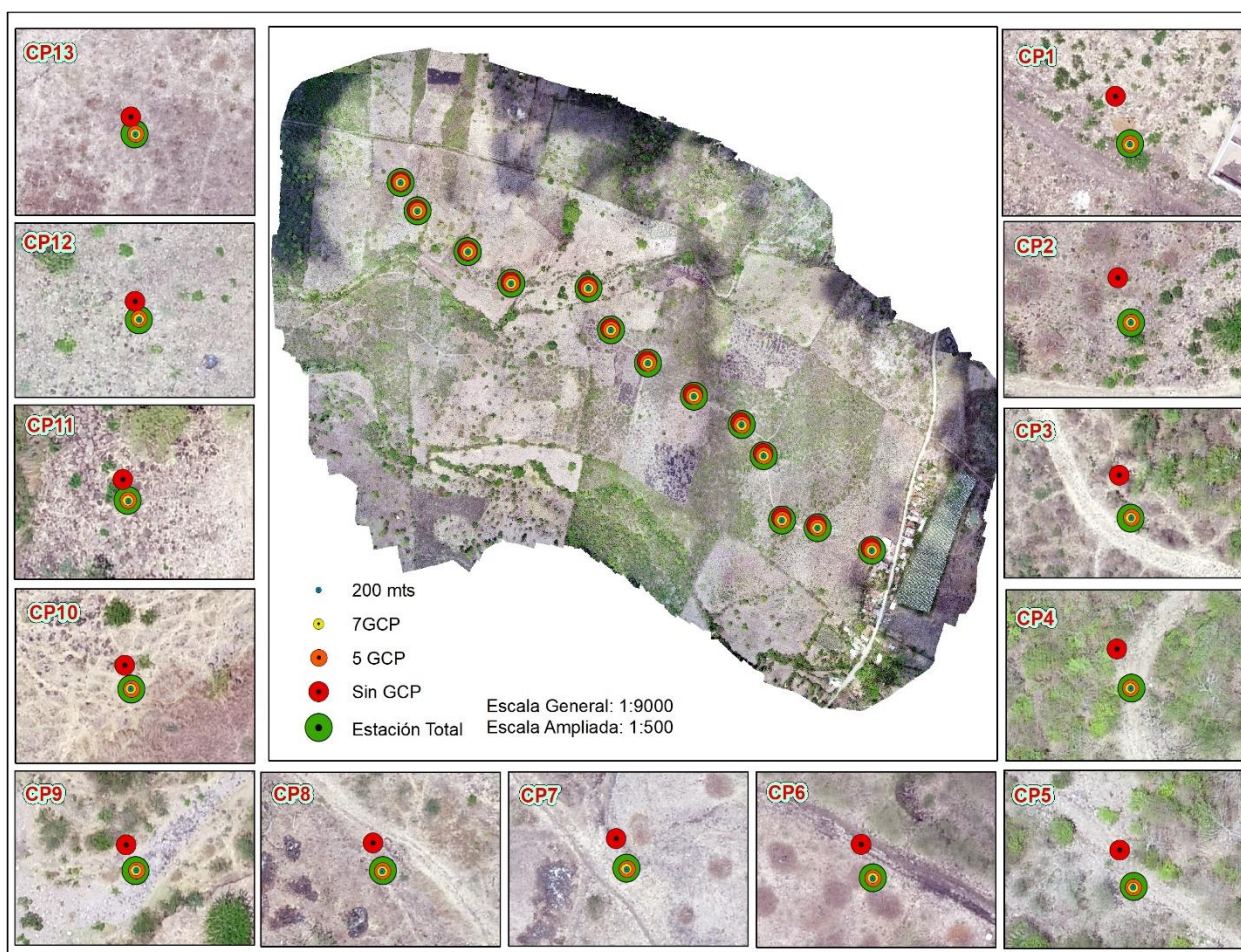
Las diferencias en posicionamiento de los modelos para esta altura resultaron similares a las del proyecto de 120 metros de altura. Las generalidades de las coordenadas se ven en el anexo 7; la síntesis se muestra a continuación:

Tabla 17: Cotejo de coordenadas de estación total vs vuelo a 200 metros

Punto	Est. Vs Sin GCP			Est. Vs 5 GCP			Est. Vs 7 GCP			Est. Vs 9 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	1.578	-5.040	16.002	-0.006	0.074	-0.166	0.005	0.100	-0.178	0.002	0.083	-0.130
CP2	1.410	-4.780	16.336	-0.021	-0.016	0.051	-0.005	-0.026	-0.029	-0.021	-0.034	0.041
CP3	1.250	-4.573	16.610	-0.056	-0.030	0.170	-0.023	-0.023	0.115	-0.075	-0.025	-0.010
CP4	1.583	-4.134	16.448	0.094	0.040	0.078	0.092	0.023	0.178	0.054	0.022	-0.060
CP5	1.537	-3.863	16.540	0.062	0.079	-0.170	0.067	0.070	-0.144	0.063	0.049	-0.004
CP6	1.312	-3.550	16.851	0.006	0.046	0.168	0.010	0.014	0.149	0.008	0.030	0.092
CP7	1.157	-3.166	16.967	-0.008	0.101	-0.083	-0.003	0.053	-0.148	-0.017	0.086	-0.029
CP8	1.050	-2.924	17.498	0.019	0.061	0.084	0.014	0.042	0.086	0.055	0.055	-0.219
CP9	1.017	-2.756	17.534	-0.061	-0.005	-0.270	-0.025	-0.049	-0.108	-0.065	-0.052	-0.165
CP10	0.725	-2.522	18.218	0.035	0.008	-0.277	0.070	-0.014	-0.089	0.046	-0.015	0.040
CP11	0.493	-2.272	19.035	-0.070	-0.010	-0.015	-0.068	-0.001	0.001	-0.091	0.022	0.025
CP12	0.424	-1.985	19.544	-0.008	-0.091	-0.234	-0.020	-0.082	-0.315	-0.044	-0.066	-0.205
CP13	0.425	-1.859	19.749	-0.074	-0.042	-0.215	-0.080	-0.032	-0.107	-0.079	0.002	0.129
Prom.	1.074	3.340	17.487	0.040	0.046	0.152	0.037	0.041	0.127	0.048	0.042	0.088

Fuente: Elaboración propia.

La reconstrucción del modelo sin incluir puntos de control aumenta en imprecisión respecto a los 120 metros del anterior proyecto, sin embargo, aún se encuentra dentro de lo permitido por la precisión de la aeronave. Los modelos con 5, 7 y 9 GCP, prácticamente presentan los mismos desplazamientos (5 mm entre ellos). Por lo tanto, es indiferente el número de ellos en los levantamientos. Se detalla de la siguiente manera:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Diferencia de posicionamiento entre estación total y 200 metros

Es lógico que al volar más alto la resolución del mosaico es menor (5.5 cm/píxel), bajo esta premisa, los procesamientos con puntos de control mostraron alta precisión y exactitud, pues los desplazamientos no superan el píxel en X y Y.

6.4.6. Cotejo de distancia y elevación a 200 metros de altura

El parámetro de elevación, sufre mejoría al incluir puntos de control, y se presenta de manera proporcional al número de GCPs utilizados (tabulación general véase en anexo 8). En lo que a distancia respecta, el error sin GCP supera los 3 metros y con GCPs se mantiene en el píxel predeterminado por los 200 metros de vuelo. Se detalla en los siguientes cuadros:

Tabla 18: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 200 metros de altura sin GCP y con 5 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 120 mts Sin GCP			Estación Vs 120 mts 5 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	16.002	0.000	0.000	-0.166
CP2	CP1-CP2	0.253	0.253	16.336	-0.021	-0.021	0.051
CP3	CP2-CP3	0.199	0.452	16.610	0.031	0.010	0.170
CP4	CP3-CP4	0.329	0.780	16.448	0.025	0.035	0.078
CP5	CP4-CP5	0.246	1.026	16.540	0.050	0.086	-0.170
CP6	CP5-CP6	0.351	1.377	16.851	0.033	0.119	0.168
CP7	CP6-CP7	0.349	1.726	16.967	0.043	0.162	-0.083
CP8	CP7-CP8	0.240	1.966	17.498	-0.047	0.116	0.084
CP9	CP8-CP9	0.163	2.129	17.534	-0.019	0.097	-0.270
CP10	CP9-CP10	0.306	2.435	18.218	-0.095	0.002	-0.277
CP11	CP10-CP11	0.333	2.768	19.035	0.075	0.076	-0.015
CP12	CP11-CP12	0.233	3.001	19.544	-0.098	-0.022	-0.234
CP13	CP12-CP13	0.107	3.109	19.749	0.076	0.054	-0.215
PROMEDIO		0.239		17.487	0.047		0.152
DIFERENCIAS				+ - 3.747			+ - 0.447

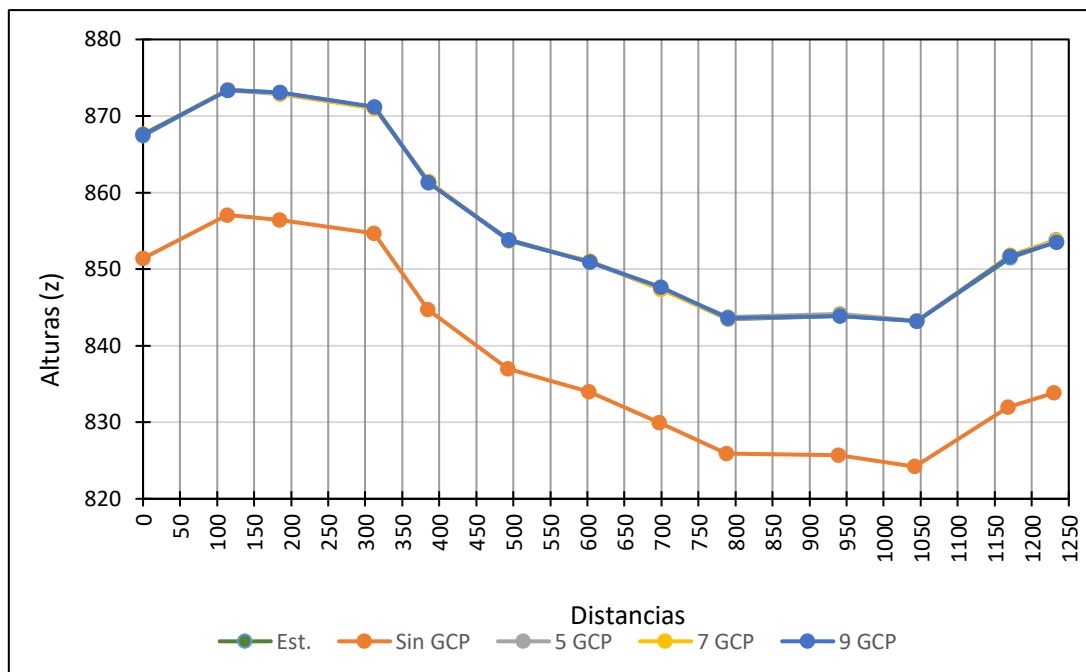
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: Comparación de distancias y alturas entre estación total vs 200 metros de altura con 7 y 9 GCP

Punto	Tramo	Estación Vs 200 mts 7 GCP			Estación Vs 200 mts 9 GCP		
		Distancia Tramo	Distancia Acumulado	Z (m)	Distancia Tramo	Distancia Acumulada	Z (m)
CP1	CP1	0.000	0.000	-0.178	0.000	0.000	-0.130
CP2	CP1-CP2	-0.039	-0.039	-0.029	-0.023	-0.023	0.041
CP3	CP2-CP3	0.018	-0.021	0.115	0.054	0.031	-0.010
CP4	CP3-CP4	0.011	-0.009	0.178	0.008	0.040	-0.060
CP5	CP4-CP5	0.053	0.044	-0.144	0.017	0.057	-0.004
CP6	CP5-CP6	0.022	0.066	0.149	0.039	0.096	0.092
CP7	CP6-CP7	0.034	0.099	-0.148	0.053	0.149	-0.029
CP8	CP7-CP8	-0.020	0.080	0.086	-0.075	0.074	-0.219
CP9	CP8-CP9	-0.061	0.018	-0.108	-0.037	0.037	-0.165
CP10	CP9-CP10	-0.092	-0.074	-0.089	-0.108	-0.070	0.040
CP11	CP10-CP11	0.119	0.046	0.001	0.133	0.062	0.025
CP12	CP11-CP12	-0.088	-0.042	-0.315	-0.091	-0.029	-0.205
CP13	CP12-CP13	0.074	0.032	-0.107	0.077	0.048	0.129
PROMEDIO		0.049		0.127	0.055		0.088
DIFERENCIAS				+ - 0.493			+ - 0.348

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura muestra el perfil del tramo obtenido a 200 metros de altura:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31: Perfiles de estación total vs vuelo a 200 metros de altura

6.4.7. Cotejo de áreas entre equipo geodésico y vuelo a 120 metros de altura con 7 puntos de control terrestre (7GCP)

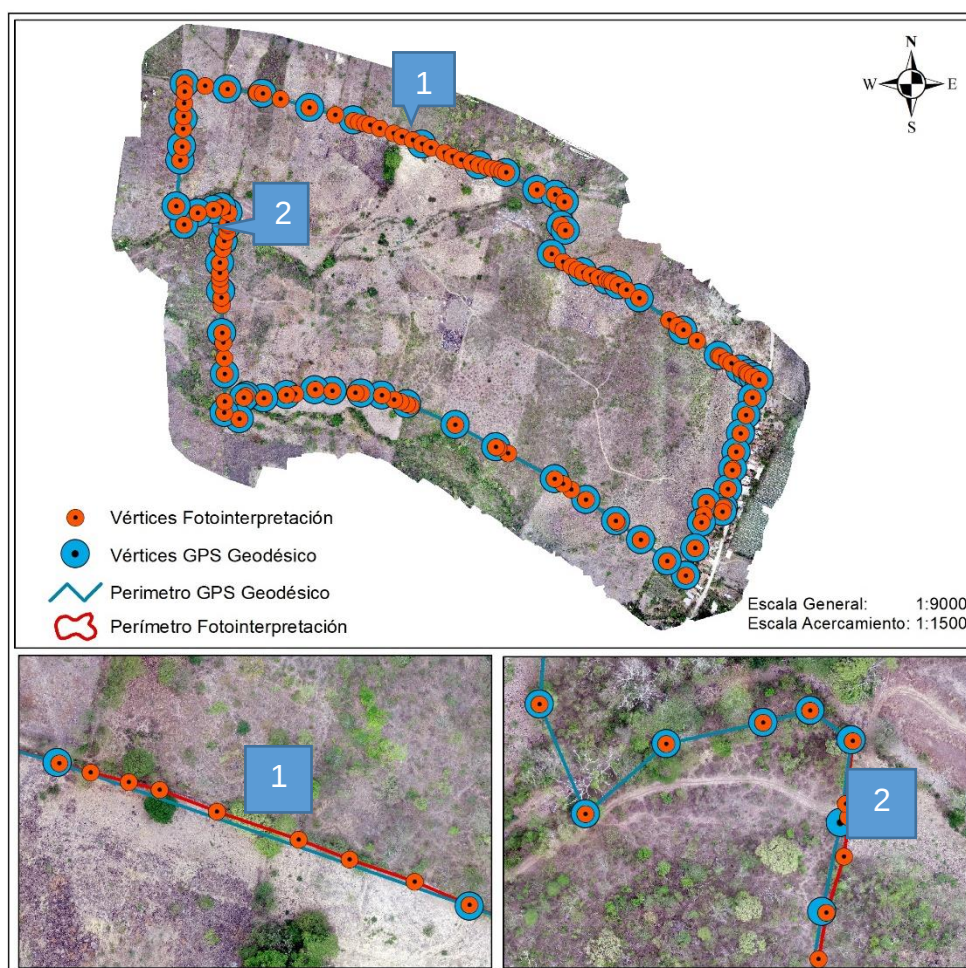
El último parámetro de comparación (área) únicamente comprendió el proyecto a 120 metros de altura utilizando 9 puntos de control terrestre y el perímetro de la finca previamente medido con equipo geodésico. Los datos más relevantes se sintetizan en el siguiente cuadro:

Tabla 20: Cotejo de área, perímetro y vértices de vuelo a 120 metros

Descripción	GPS Geodésico	Vuelo 120 mts y 9 GCP	Diferencia
Vértices	70	129	59
Área M2	491,088.036	490,799.956	288.080
Área Ha	49.109	49.080	0.029
Perímetro	3,498.323	3,502.698	4.375
Observaciones de los Vértices	67 (96%) coinciden con su ubicación en la ortofoto y 3 (4%) es imposible identificar su coincidencia por la presencia de vegetación densa en la ortofoto		

Fuente: Elaboración propia.

Sobreponiendo los vértices y el perímetro de la finca en el mosaico, se aprecia que la medición se puede complementar con la inclusión de más vértices en los que el perímetro discrimina cambios de dirección, pues a nivel de campo son imposibles de determinar con certeza. Por ello, al fotointerpretar en el mosaico, se incluyeron 59 vértices más para la finca, lo cual condicionó cambios de dirección y aumento de distancia del perímetro en 4.37 metros. Esto también afectó el área de la finca, cuya medida reflejó una reducción de 288 metros cuadrados (0.028 hectáreas) respecto a la medición original. De los 70 vértices originales, el 96% coincide con su ubicación en la ortofoto, el restante 4% corresponde a sectores de vegetación densa y arbustos profusos en el mosaico, lo que hizo imposible su coincidencia en la fotointerpretación, mas no significa que su ubicación sea inexacta. Se comprende mejor al analizar la siguiente figura:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32: Cotejo de áreas entre equipo geodésico y vuelo a 120 metros de altura

VII. CONCLUSIONES

- Los proyectos sin usar ningún punto de control terrestre, muestran baja precisión respecto a mediciones con estación total: las diferencias de distancias del tramo de interés superaron los 2.20 metros (en el mejor de los casos), además, muestran un desplazamiento en posición (x, y) propio del GPS a bordo del dron. En el caso de la altura (z), el mejor de los modelos (120 metros) presentó diferencias mayores a 17 metros, fruto esperado de no aplicar correcciones de posición o usar cualquier punto de control en tierra.
- Aplicar un conjunto de puntos de control terrestre, disminuye los errores en todas las direcciones (x, y, z) considerablemente. Sin embargo, el número y distribución de los mismos, jugó un papel extremadamente importante en este estudio. La precisión presentó mejoras mientras se aumentaba el número de puntos de control utilizados, esto sugiere que a más puntos de control mejor precisión del modelo.
- Volar a baja altura (50 metros, alta resolución) sobre un área, campo o lugar cuyas características muestren vegetación densa y alta cobertura de arbustos, resulta problemático in situ y en oficina. Este caso particular resultó que solo el 92% (5,540 de 3,815) de las posiciones de la cámara estaban bien corregidas, causando una barrera para mejorar la precisión global. A partir de los resultados, se notó la desventaja del vuelo a baja altura debido a las características del lugar. Se encontraron errores más grandes donde se ubicaba la mayor concentración de arbustos dado que sus características son difíciles de igualar en el contenido de las imágenes. En el resto del terreno el error fue más uniforme.
- Los resultados del vuelo a 120 metros de altura y procesado con 9 puntos de control terrestre son significativos, ofrece una precisión de alrededor de un píxel (3.1 cm) en todas las direcciones: x, y y z., la diferencia entre distancias del tramo de interés respecto a la estación total arrojó 3.5 cm; dada la extensión de la finca es una medida que se puede menospreciar sin ningún problema. Altitudinalmente, se encontrarán errores de +- 14.7 cm en cualquier punto del modelo. Además, la búsqueda de

características y la coincidencia de las imágenes no presentó problema alguno (980 de 980 imágenes calibradas).

- La diferencia de área de la finca fue de 288 metros cuadrados entre la medición original (equipo geodésico) y la fotointerpretación del mosaico a 120 metros de altura. De ello se infiere que la diferencia entre áreas es menor al 1%. Se incrementó el número de vértices en 59 y de esta manera aumentó el perímetro en 4.4 metros. Esto sugiere que el modelo es correcto para apoyo en mediciones (área y perímetro) de inmuebles.
- Al sobreponer los vértices de la medición original (GPS geodésico) en el mosaico con 9 GCP y 120 metros de altura, el 96% (67 de 70) coincide con su localización en la fotografía, el restante 4% corresponde a áreas de vegetación densa cuyos vértices son inapreciables en la fotointerpretación: no sugiere que no coinciden, en áreas que los arbustos profusos no suponen problema, los vértices coinciden al 100%. Por consiguiente, esto valida la generación de la fotografía aérea y la medición en ella.
- El uso de drones en el campo de la topografía tiene ventajas, que incluyen: datos completos de alta calidad, datos volumétricos con millones de puntos de medición, cubrir más áreas, etc., con técnicas convencionales de topografía el único resultado sería la medición propiamente hecha, mientras que con vuelos aéreos se puede entregar mucho más que eso: ortomosaicos y nube de puntos; no obstante, esta tecnología no sustituye a las técnicas de medición y equipo convencional topográfico, en consecuencia, apoya e innova en estas prácticas; de forma independiente no aporta datos significativos en el campo de la topografía.
- Los resultados son satisfactorios bajo la premisa, que en ingeniería civil (cálculo de volúmenes, movimientos de tierra, perfiles, etc) se usan parámetros y factores de corrección volumétrica y las variaciones observadas en la investigación no son significativas.

VIII. RECOMENDACIONES

- Evitar llevar a cabo vuelos que no incluyan la utilización de puntos de control terrestre medidos con topografía convencional en proyectos topográficos que requieran precisiones sub métricas.
- La utilización de 5 y 10 puntos de control terrestre por proyecto fotogramétrico con dron, incluyendo un punto en el centro del área de interés que funja como epicentro de amarre, generará los mejores resultados.
- Realizar los vuelos desde 100 hasta 150 metros de altura para evitar errores de calibración de imágenes y pérdida de resolución de los modelos. De igual manera, planificar el punto de despegue y aterrizaje en un sector intermedio (entre la elevación más alta y más baja) del área de interés como compensación al relieve del terreno.
- Utilizar los productos fotogramétricos haciendo uso de sus características propias (MDT, MDS, Ortomosaico) en las mediciones y cálculos correspondientes a su naturaleza.
- Para el análisis, mediciones y cálculo de productos fotogramétricos, utilizar el software Pix4D Mapper en versión de escritorio, esto por la ligereza y rapidez en el manejo de los datos en comparación con software GIS y dibujo asistido por computadora -CAD-
.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Barrientos, A; del Cerro, J; Gutiérrez, P; San Martín, R; Martínez, A; Rossi, C. 2015. Vehículos aéreos no tripulados para uso civil: tecnología y aplicaciones (en línea). España, Unizar. 29 p. Consultado 3 jul. 2018. Disponible en <http://webdiis.unizar.es/~neira/docs/ABarrientos-CEDI2007.pdf>
- Barrios Pérez, LF. 2017. Análisis jurídico de la normativa aplicable para el uso civil de los vehículos aéreos no tripulados o drones en Guatemala (en línea). Tesis Lic. Guatemala, Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales. 150 p. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2018/07/01/Barrios-Luis.pdf>
- Bojorquez Lara, CC. 2016. Guía técnica: curso de topografía II. Chiquimula, Guatemala, USAC-CUNORI. 169 p.
- Charfen Garcia, MA. 2015. Recomendaciones para la aplicación de los drones en el mundo de la arquitectura (en línea). Tesis M.Sc. Barcelona, España, Universitat Politècnica de Catalunya. 67 p. Consultado 2 jul. 2018. Disponible en <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/87943>
- Ciraiz Rivera, MR. 2001. Aspectos legales de la aviación civil en Guatemala (en línea). Tesis Lic. Guatemala, URL; IIJ. 17 p. Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/pPublicacion.aspx?pb=278>
- Claros Zelaya, RA; Guevara Aguilar, AE; Pacas Cruz, NR. 2016. Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (en línea). Tesis Lic. San Miguel, El Salvador, Universidad de El Salvador. Consultado 2 may. 2018. Disponible en <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/>

Congreso de la República de Guatemala. 2005. Ley del Registro de Información Catastral; decreto 41-2005 (en línea). Guatemala, CENADOJ. 33 p. Consultado 18 may. 2018. Disponible en <http://www.marn.gob.gt/Multimedios/571.pdf>

Corredor Daza, JG. 2015. Implementación de modelos de elevación obtenidos mediante topografía convencional y topografía con drones para el diseño geométrico de una vía en rehabilitación sector Tulua – Río Frío (en línea). Tesis Lic. Bogotá, Colombia, Universidad Militar de Nueva Granada. 20 p. Consultado 25 abr. 2018. Disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7596/CorredorDazaJuanGuillermo2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

DGAC (Dirección General de Aeronáutica Civil, Guatemala). 2013. RAC-101 regulación sobre aeronaves no tripuladas, aeronaves de modelismo y fuegos artificiales (en línea). Guatemala. 22 p. Consultado 19 abr. 2018. Disponible en http://www.dgac.gob.gt/sistema/uploads/2018/01/26/21_1251529091.pdf

DJI (Dajiang Innovation Technology, China). 2017. Phantom 4 Pro Specs (en línea, sitio web). Consultado 5 ago. 2018. Disponible en <https://www.dji.com/phantom-4-pro/info#specs>

Draeyer, B; Strecha, C. 2014. White paper: how accurate are UAV surveying methods? (en línea). Suiza, Pix4D. 8 p. Consultado 2 may. 2018. Disponible en <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235026-Advanced-knowledge-Scientific-papers#label14>

España Estrada, MA. 2013. Determinación morfológica y batimétrica de la laguna del volcán del municipio de Ipala, departamento de Chiquimula. Tesis Lic. Chiquimula, Guatemala, USAC-CUNORI. 93 p.

Farjas, M. 2017. Libro topografía (en línea). s.n.t. 480 p. Consultado 15 jul. 2018. Disponible en https://kupdf.net/download/l-topografia-m-farjas_5a1ed156e2b6f5cb6586282f_pdf

- FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, España). 2015. Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (en línea). Madrid, España. 242 p. Consultado 17 abr. 2018. Disponible en <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Los-Drones-y-sus-aplicaciones-a-la-ingenieria-civil-fenercom-2015.pdf>
- Ferreira, MR; Aira, VG. 2015. Aplicaciones topográficas de los drones (en línea). Buenos Aires, Argentina, UBA. 11 p. Consultado 3 jul. 2018. Disponible en <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/otragr/index/assoc/HASH0159/314a3cb8.dir/doc.pdf>
- García Álvarez, D. 2008. Sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) (en línea). España, Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior. 124 p. Consultado 5 ago. 2018. Disponible en <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>
- Geodrones. 2 jul. 2018. Cómo hacer topografía con drones (en línea, blog). México. Consultado 10 jul. 2018. Disponible en <https://www.geodronesmx.com/geodronesblog/como-hacer-topografia-con-drones>
- IGN (Instituto Geográfico Nacional, Guatemala). 2013. Guatemala transversa mercator: resolución normativa IGN-01/99 (en línea, sitio web). Consultado 1 ago. 2018. Disponible en <https://ignguatemala5.webnode.es/news/guatemala-transversa-mercator-gtm/>
- Jimenez Cleves, G. 2007. Topografía para ingenieros civiles (en línea). Armenia, Colombia, Universidad de Quindío, Facultad de Ingeniería. 192 p. Consultado 4 jul. 2018. Disponible en <https://civilgeeks.com/2011/12/07/topografia-para-ingenieros-civiles/>

- Leica Geosystems. 2003. Guía para mediciones en modo estático y estático rápido 3.0.0es (en línea). Heerbrugg, Suiza. 42 p. Consultado 5 jul. 2018. Disponible en <https://www.yumpu.com/es/document/read/13720342/guia-para-mediciones-en-modo-estatico-y-estatico-rapido>
- Mora Fernández, R. 2013. Producción de productos cartográficos MDT y ortofoto a partir de imágenes capturadas por un vehículo UAV (en línea). Tesis M.Sc. Salamanca, España, USAL. 89 p. Consultado 17 abr. 2018. Disponible en https://gredos.usal.es/bitstream/handle/10366/119810/TFM_MoraFernandezdeCordobaR_Generacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, Canadá). 2011. Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) (en línea). Montreal, Quebec, Canadá. 56 p. (Circular 328 AN/190). Consultado 18 abr. 2018. Disponible en <https://www.yumpu.com/es/document/read/4544276/sistemas-de-aeronaves-no-tripuladas-uas-icao/13>
- Pix4D. 2017. Pix4Dmapper 4.1 user manual (en línea, sitio web). Lausanne, Suiza. 305 p. Consultado 5 ago. 2018. Disponible en <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf->
- Quirós Rosado, E. 2014. Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicada a la ingeniería civil (en línea). Cáceres, España, Universidad de Extremadura. 139 p. Consultado 17 abr. 2018. Disponible en https://mascvuex.unex.es/ebooks/sites/mascvuex.unex.es.mascvuex.ebooks/files/files/file/Fotogrametria_9788469713174_0.pdf
- RIC (Registro de Información Catastral, Guatemala). 2008. Manual de normas técnicas y procedimientos catastrales del registro de información catastral (en línea). Guatemala. 364 p. Consultado 18 may. 2018. Disponible en <https://es.scribd.com/document/259427644/Manual-de-Normas-Tecnicas-Ric>

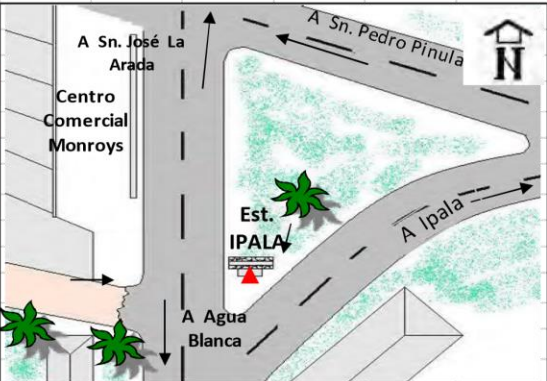
- Ruales Salazar, DN. 2018. Pertinencia del uso de drones en la caracterización geoespacial del módulo dos junta de agua de riego de la comuna Morlán, Imbabura (en línea). Tesis M.Sc. Ibarra, Ecuador, Universidad Técnica del Norte, Instituto de Postgrado. 109 p. Consultado 25 may. 2018. Disponible en <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7880/1/PG%20601%20TESIS.pdf>
- Solis Solares, ODJ. 2016. Comparación de costos entre método convencional de medición topográfica con estación total y fotogrametría, para elaborar estudios de prefactibilidad en el diseño geométrico de carreteras (en línea). Tesis Lic. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería. 167 p. Consultado 25 mayo 2018. Disponible en <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5210/1/Oswin%20David%20Jos%C3%A9%20Solis%20Solares.pdf>
- Tacca Qquelca, H. 2015. Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional (en línea). Tesis Lic. Puno, Perú, UNA, PUNO. 124 p. Consultado 25 abr. 2018. Disponible en http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3882/Hilario_Tacca_Qquelca.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vásquez Paulino, JC; Backhoff Pohls, MA. 2017. Procesamiento geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte (en línea). Querétaro, México, IMT. 93 p. (Publicación técnica no. 490). Consultado 26 may. 2018. Disponible en <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt490.pdf>
- Villalobos Viato, R. 2015. La era de los drones (en línea). Revista D. Consultado 19 abr. 2018. Disponible en <https://www.prensalibre.com/revista-d/la-era-de-los-drones/>

Villarreal Moncayo, JV. 2015. Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control (en línea). Tesis Lic. Loja, Ecuador, Universidad Técnica Particular de Loja. 45 p. Consultado 2 jul. 2018. Disponible en <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/13079/1/Villareal%20Moncayo%20Joffre%20Vicente.pdf>



X. ANEXOS

Anexo 1: Ficha técnica vértice geodésico Ipala.

			
Estación IPALA		Orden	
Latitud 14° 37' 22.20870" N	Longitud 89° 37' 42.28038" W	Sistema de Referencia Geodésico WGS84 EPOCA 2011.30	
Norte (Y) 1,618,251.0914 m.	Este (X) 216,849.7085 m.	Zona y Proyección 16 UTM	
Norte (Y) 1,617,114.3797 m.	Este (X) 593,886.4872 m.	Zona y proyección 15.5 GTM	
Altura Elipsoidal: 806.8507 m.	Elevación:	Orden:	Datúm: Puerto de San José 1949 / 50
Características de la marca Ficha de bronce de 6 cms., de diámetro, incrustada en monumento de concreto tipo piramidal con ficha subterránea		Estampado IPALA GPS IGN 2,005	
Referencia No. 1: Az. 135° a mts.	Referencia No. 2: Az. 230° a mts.	Referencia No. 3: Az. ° a mts.	Referencia No. 4: Az. ° a mts.
Localización Dep. De Chiquimula, Municipio de Ipala.		Trabajó GEODESIA-IGN	
Acceso: Partiendo de Chiquimula con rumbo hacia Esquipulas recorrer 7 km. Tome la carretera al lado derecho con rumbo hacia Ipala, recorra aproximadamente 24 km. Y en el vertice sur del triangulo formado por la bifurcación de carreteras, entrada a Ipala se localiza el vértice geodésico, al pie de un rotulo de concreto donde se lee Bienvenidos a Ipala.			
MAPA DE REFERENCIA		CROQUIS	
			
			
Posicionada por: H. Muñoz, W. Castañeda Fecha: Septiembre - 2003		Reposicionada por: L. Sandoval y J.C. Contreras Fecha: Abril de 2011.	

Anexo 2: Tabulación de distancias entre tramos y alturas de puntos con estación total.

Descripción	Estación Total	
	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	114.282	114.282
CP2 a CP2	70.605	184.888
CP3 a CP4	128.070	312.958
CP4 a CP5	72.829	385.786
CP5 a CP6	108.193	493.979
CP6 a CP7	109.910	603.889
CP7 a CP8	95.592	699.481
CP8 a CP9	90.613	790.094
CP9 a CP10	151.172	941.265
CP10 a CP11	103.802	1045.067
CP11 a CP12	125.875	1170.942
CP12 a CP13	62.452	1233.394

Anexo 3: Tabulación de coordenadas de posicionamiento de vuelo a 50 metros de altura.

Descripción	Sin GCP			5 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596928.462	1617729.516	855.633	596927.678	1617726.854	889.361
CP2	596822.717	1617771.888	858.742	596821.329	1617769.249	889.018
CP3	596753.954	1617786.551	856.230	596752.250	1617783.635	885.605
CP4	596718.122	1617908.890	852.658	596715.978	1617906.160	877.313
CP5	596675.377	1617967.075	840.750	596672.793	1617964.250	865.130
CP6	596583.976	1618019.842	826.685	596579.527	1618017.521	855.541
CP7	596494.762	1618083.171	816.720	596490.027	1618081.201	851.208
CP8	596422.862	1618145.456	807.369	596417.831	1618143.828	846.984
CP9	596379.855	1618224.831	799.278	596374.538	1618223.473	842.608
CP10	596230.571	1618233.325	787.308	596223.615	1618232.802	842.910
CP11	596146.222	1618292.924	777.453	596138.754	1618292.718	842.755
CP12	596047.354	1618371.120	774.842	596040.103	1618370.907	852.255
CP13	596015.057	1618424.565	772.415	596007.816	1618424.407	855.117
Descripción	7 GCP			8 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596927.033	1617724.909	866.079	596927.012	1617724.028	866.415
CP2	596821.822	1617767.159	873.366	596821.229	1617766.932	872.985
CP3	596752.417	1617782.744	874.563	596752.179	1617781.881	873.441
CP4	596716.652	1617905.500	868.171	596716.458	1617904.791	871.169
CP5	596672.803	1617964.582	866.188	596673.217	1617963.473	861.531
CP6	596579.544	1618017.418	853.882	596579.535	1618017.438	853.986
CP7	596490.007	1618081.185	850.938	596490.018	1618081.174	850.910
CP8	596417.806	1618143.862	847.444	596417.822	1618143.820	847.431
CP9	596374.531	1618223.525	843.428	596374.541	1618223.451	843.430
CP10	596223.677	1618232.896	844.283	596223.627	1618232.878	843.911
CP11	596138.851	1618292.720	843.364	596138.828	1618292.732	843.190
CP12	596040.122	1618370.870	851.265	596040.145	1618370.902	851.467
CP13	596007.785	1618424.354	853.178	596007.837	1618424.388	853.619

Anexo 4: Tabulación de distancias entre tramos y alturas de puntos en vuelo a 50 metros de altura.

Descripción	Sin GCP		5 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	113.918	113.918	114.488	114.488
CP2 a CP2	70.309	184.227	70.561	185.049
CP3 a CP4	127.479	311.705	127.781	312.830
CP4 a CP5	72.198	383.903	72.384	385.214
CP5 a CP6	105.540	489.443	107.408	492.622
CP6 a CP7	109.406	598.849	109.843	602.464
CP7 a CP8	95.126	693.975	95.574	698.038
CP8 a CP9	90.277	784.252	90.651	788.689
CP9 a CP10	149.525	933.778	151.211	939.900
CP10 a CP11	103.280	1037.058	103.881	1043.781
CP11 a CP12	126.054	1163.112	125.879	1169.661
CP12 a CP13	62.445	1225.557	62.488	1232.148
Descripción	7 GCP		8 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	113.378	113.378	114.153	114.153
CP2 a CP2	71.133	184.511	70.650	184.802
CP3 a CP4	127.860	312.371	127.996	312.798
CP4 a CP5	73.575	385.947	72.893	385.691
CP5 a CP6	107.187	493.133	108.114	493.804
CP6 a CP7	109.923	603.056	109.889	603.693
CP7 a CP8	95.611	698.667	95.586	699.280
CP8 a CP9	90.657	789.325	90.633	789.913
CP9 a CP10	151.145	940.470	151.208	941.121
CP10 a CP11	103.799	1044.269	103.795	1044.915
CP11 a CP12	125.916	1170.185	125.892	1170.808
CP12 a CP13	62.499	1232.685	62.487	1233.294

Anexo 5: Tabulación de coordenadas de posicionamiento de vuelo a 120 metros de altura.

Descripción	Sin GCP			5 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596927.878	1617725.900	813.094	596927.030	1617723.911	867.410
CP2	596822.026	1617768.497	817.813	596821.149	1617766.860	873.400
CP3	596753.088	1617783.239	816.747	596752.095	1617781.790	873.120
CP4	596717.219	1617905.859	814.444	596716.426	1617904.745	871.156
CP5	596674.096	1617964.285	804.261	596673.236	1617963.368	861.363
CP6	596580.541	1618018.025	795.930	596579.531	1618017.389	853.981
CP7	596491.095	1618081.516	792.008	596490.004	1618081.146	851.019
CP8	596418.993	1618143.932	787.715	596417.839	1618143.754	847.502
CP9	596375.684	1618223.394	783.484	596374.529	1618223.407	843.598
CP10	596224.987	1618232.655	782.242	596223.606	1618232.863	843.980
CP11	596140.263	1618292.333	780.701	596138.801	1618292.731	843.223
CP12	596041.561	1618370.252	787.918	596040.151	1618370.897	851.510
CP13	596009.207	1618423.623	789.904	596007.800	1618424.402	853.619
Descripción	7 GCP			9 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596927.024	1617723.909	867.506	596927.027	1617723.914	867.409
CP2	596821.149	1617766.866	873.411	596821.162	1617766.867	873.458
CP3	596752.104	1617781.814	873.112	596752.120	1617781.806	873.162
CP4	596716.431	1617904.766	871.108	596716.456	1617904.759	871.166
CP5	596673.242	1617963.389	861.341	596673.257	1617963.379	861.404
CP6	596579.546	1618017.400	853.963	596579.564	1618017.396	853.968
CP7	596490.012	1618081.165	850.993	596490.024	1618081.168	850.980
CP8	596417.848	1618143.785	847.466	596417.866	1618143.778	847.491
CP9	596374.512	1618223.444	843.628	596374.540	1618223.428	843.578
CP10	596223.600	1618232.878	844.001	596223.630	1618232.867	843.992
CP11	596138.803	1618292.738	843.367	596138.828	1618292.734	843.327
CP12	596040.119	1618370.904	851.560	596040.126	1618370.911	851.481
CP13	596007.785	1618424.388	853.844	596007.790	1618424.399	853.748

Anexo 6: Tabulación de distancias entre tramos y alturas de puntos en vuelo a 120 metros de altura.

Descripción	Sin GCP		5 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	114.102	114.102	114.260	114.260
CP2 a CP2	70.497	184.599	70.650	184.909
CP3 a CP4	127.758	312.357	128.024	312.934
CP4 a CP5	72.617	384.974	72.815	385.749
CP5 a CP6	107.891	492.865	108.162	493.911
CP6 a CP7	109.689	602.554	109.909	603.819
CP7 a CP8	95.364	697.919	95.539	699.358
CP8 a CP9	90.499	788.417	90.666	790.024
CP9 a CP10	150.981	939.399	151.219	941.243
CP10 a CP11	103.632	1043.031	103.807	1045.050
CP11 a CP12	125.752	1168.783	125.864	1170.914
CP12 a CP13	62.412	1231.195	62.525	1233.439
Descripción	7 GCP		9 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	114.258	114.258	114.247	114.247
CP2 a CP2	70.644	184.903	70.639	184.886
CP3 a CP4	128.023	312.926	128.021	312.907
CP4 a CP5	72.814	385.740	72.819	385.726
CP5 a CP6	108.149	493.888	108.149	493.874
CP6 a CP7	109.919	603.808	109.928	603.802
CP7 a CP8	95.545	699.353	95.534	699.337
CP8 a CP9	90.684	790.037	90.671	790.008
CP9 a CP10	151.207	941.244	151.205	941.213
CP10 a CP11	103.796	1045.041	103.805	1045.018
CP11 a CP12	125.891	1170.932	125.911	1170.929
CP12 a CP13	62.499	1233.430	62.502	1233.431

Anexo 7: Tabulación de coordenadas de posicionamiento de vuelo a 200 metros de altura.

Descripción	Sin GCP			5 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596925.465	1617729.026	851.424	596927.049	1617723.912	867.592
CP2	596819.695	1617771.633	857.073	596821.126	1617766.869	873.358
CP3	596750.842	1617786.336	856.446	596752.148	1617781.793	872.886
CP4	596714.892	1617908.915	854.699	596716.381	1617904.741	871.069
CP5	596671.766	1617967.297	844.745	596673.241	1617963.355	861.455
CP6	596578.232	1618020.975	837.010	596579.538	1618017.378	853.693
CP7	596488.865	1618084.355	833.950	596490.030	1618081.088	851.000
CP8	596416.776	1618146.767	829.947	596417.807	1618143.782	847.361
CP9	596373.458	1618226.169	825.907	596374.536	1618223.418	843.711
CP10	596222.877	1618235.432	825.669	596223.567	1618232.902	844.164
CP11	596138.277	1618295.002	824.198	596138.840	1618292.740	843.248
CP12	596039.671	1618372.867	831.958	596040.103	1618370.973	851.736
CP13	596007.391	1618426.204	833.873	596007.890	1618424.387	853.837
Descripción	7 GCP			9 GCP		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
CP1	596927.038	1617723.886	867.604	596927.041	1617723.903	867.556
CP2	596821.110	1617766.879	873.438	596821.126	1617766.887	873.368
CP3	596752.115	1617781.786	872.941	596752.167	1617781.788	873.066
CP4	596716.383	1617904.758	870.969	596716.421	1617904.759	871.207
CP5	596673.236	1617963.364	861.429	596673.240	1617963.385	861.289
CP6	596579.534	1618017.410	853.712	596579.536	1618017.394	853.769
CP7	596490.025	1618081.136	851.065	596490.039	1618081.103	850.946
CP8	596417.812	1618143.801	847.359	596417.771	1618143.788	847.664
CP9	596374.500	1618223.462	843.549	596374.540	1618223.465	843.606
CP10	596223.532	1618232.924	843.976	596223.556	1618232.925	843.847
CP11	596138.838	1618292.731	843.232	596138.861	1618292.708	843.208
CP12	596040.115	1618370.964	851.817	596040.139	1618370.948	851.707
CP13	596007.896	1618424.377	853.729	596007.895	1618424.343	853.493

Anexo 8: Tabulación de distancias entre tramos y alturas de puntos en vuelo a 200 metros de altura.

Descripción	Sin GCP		5 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	114.029	114.029	114.303	114.303
CP2 a CP2	70.406	184.435	70.574	184.877
CP3 a CP4	127.741	312.177	128.045	312.922
CP4 a CP5	72.583	384.760	72.779	385.700
CP5 a CP6	107.842	492.602	108.160	493.860
CP6 a CP7	109.561	602.163	109.867	603.727
CP7 a CP8	95.352	697.515	95.639	699.365
CP8 a CP9	90.450	787.965	90.632	789.997
CP9 a CP10	150.866	938.831	151.267	941.264
CP10 a CP11	103.469	1042.300	103.727	1044.992
CP11 a CP12	125.642	1167.942	125.973	1170.965
CP12 a CP13	62.345	1230.286	62.376	1233.341
Descripción	7 GCP		9 GCP	
	Distancia (m)	Acumulado (m)	Distancia (m)	Acumulado (m)
CP1 a CP2	114.321	114.321	114.305	114.305
CP2 a CP2	70.587	184.908	70.551	184.856
CP3 a CP4	128.059	312.966	128.062	312.917
CP4 a CP5	72.776	385.742	72.812	385.729
CP5 a CP6	108.171	493.913	108.154	493.883
CP6 a CP7	109.876	603.790	109.857	603.740
CP7 a CP8	95.612	699.401	95.667	699.407
CP8 a CP9	90.674	790.076	90.650	790.057
CP9 a CP10	151.264	941.340	151.280	941.336
CP10 a CP11	103.683	1045.022	103.669	1045.006
CP11 a CP12	125.963	1170.985	125.966	1170.972
CP12 a CP13	62.378	1233.363	62.375	1233.347