



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: Evaluación de la calidad posicional de productos
cartográficos catastrales y modelamiento 3D empleando UAVs
comerciales**

AUTOR: CAICEDO ESTÉVEZ, ANDRÉS IVAN

DIRECTOR: PABLO ROBERTO, PÉREZ SALAZAR

SANGOLQUÍ

2018



CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS CATASTRALES Y MODELAMIENTO 3D EMPLEANDO UAVS COMERCIALES”** fue realizado por el Sr. **ANDRÉS CAICEDO**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 07 de Febrero del 2018

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Pablo Pérez', is written over a horizontal line.

Ing. Pablo Pérez
DIRECTOR



AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ANDRÉS CAICEDO**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS CATASTRALES Y MODELAMIENTO 3D EMPLEANDO UAVS COMERCIALES”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 07 de Febrero del 2018

A handwritten signature in black ink is positioned above a solid horizontal line. The signature is cursive and appears to read 'Andrés Caicedo'.

Andrés Caicedo



AUTORIZACIÓN

Yo, **CAICEDO ESTÉVEZ ANDRÉS IVAN**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS CATASTRALES Y MODELAMIENTO 3D EMPLEANDO UAVS COMERCIALES”**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 07 de Febrero del 2018

Andrés Caicedo

DEDICATORIA

Para mi familia, mi razón de ser: mis padres, Ivan y Ondina, mis hermanos, Mauricio, Amira y Romina.

A Vale Apolo: en la inmensidad del espacio y tiempo, es mi alegría compartir un planeta y época contigo.

A mis mejores amigos Óscar y Alex, sin ustedes me habría graduado dos años antes y redactado este documento en la mitad del tiempo.

AGRADECIMIENTO

A mi director: Ing. Pablo Pérez, por toda la enseñanza, dedicación, guía y apoyo a lo largo de mi carrera.

A Day y Yesenia, por toda su ayuda en el levantamiento de información.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I	1
PROBLEMA	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Antecedentes	1
1.3 Justificación e importancia	2
1.4 Zona de estudio	2
1.5 Objetivos	3
1.5.1 Objetivo general.....	3
1.5.2 Objetivos específicos.....	3
1.6 Metas	3
CAPÍTULO II	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.2 UAVs.....	4
2.2.1 Clasificación.....	4
2.2.2 Marco legal.....	5
2.3 Adquisición y procesamiento de imágenes UAV	7
2.3.1 Planificación de vuelo	7
2.3.2 Phantom 3 professional	7
2.3.2.1 Especificaciones sensor.....	9
2.3.3 Procesamiento de datos fotogramétricos	9
2.3.4 Pix4Dmapper Pro	10
2.3.5 Productos fotogramétricos.....	10

2.3.5.1	Nube de puntos.....	10
2.3.5.2	Modelo Digital de Superficie (MDS)	11
2.3.5.3	Ortomosaico.....	11
2.4	Legislación	11
CAPÍTULO III		12
MARCO METODOLÓGICO		12
3.1	Metodología	12
3.1.1	Planificación de vuelo.....	12
3.1.1.1	Parámetros de vuelo.....	13
3.1.1.2	Puntos de apoyo terrestre (GCPs)	13
3.1.1.3	Nivelación geométrica.....	15
3.1.2	Ejecución de vuelo.....	16
3.1.2.1	Altizure App.....	17
3.1.3	Procesamiento de imágenes software Pix4D	18
3.1.3.1	Procesamiento Inicial	20
3.1.3.2	GCPs – Puntos de Apoyo Terrestre.....	21
3.1.3.3	Ortomosaico.....	22
3.1.4	Creación de superficies	23
3.1.5	Control de calidad productos fotogramétricos	25
CAPÍTULO IV		29
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		29
4.1	Análisis de los resultados.....	29
1.1	Discusión de los resultados.....	32
1.2	Comprobación de la hipótesis	32
CAPÍTULO V		33
CONCLUSIONES		33
RECOMENDACIONES		33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de UAVs.....	5
Tabla 2. Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA)	5
Tabla 3. Tolerancia de cartografía para grandes escalas	11
Tabla 4. Parámetros de vuelo UAV.....	13
Tabla 5. Resultado de procesamiento de GCPs	15
Tabla 6. Resultado de nivelación geométrica	16
Tabla 7. Código alfabético del tamaño de la muestra	25
Tabla 8. Planes de muestreo simple para la inspección normal	26
Tabla 9. Diferencia posicional entre coordenadas obtenidas en cartografía catastral y puntos de control.....	29
Tabla 10. RMSE en componentes x-y	31
Tabla 11. Diferencia altimétrica entre cotas niveladas obtenidas en MDS y puntos de control.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zona de estudio.....	2
Figura 2: Componentes UAV Phantom 3 Professional.....	8
Figura 3: Sony EXMOR.....	9
Figura 4: Flujograma metodología del proyecto	12
Figura 5: Puntos de apoyo terrestre	14
Figura 6: Rastreo de puntos de apoyo terrestre	15
Figura 7: Nivel automático de ingeniero	16
Figura 8: Delimitación del área de vuelo	17
Figura 9: Variación de altura y traslapo.....	18
Figura 10: Importación de imágenes aéreas en software Pix4D	19
Figura 11: Información GNSS/IMU de imágenes	20
Figura 12: Sistema de coordenadas de salida	20
Figura 13: Tie points resultantes de procesamiento inicial.....	21
Figura 14: Formato de importación GCPs.....	21
Figura 15: Pinchado de GCPs en imágenes	22
Figura 16: Ortomosaico.....	22
Figura 17: Ángulos de captura de imágenes.....	23
Figura 18: Creación de superficies.....	24
Figura 19: Comparación superficies sobre ortomosaico	24
Figura 20: Distribución puntos de control	27
Figura 21: Diferencia GCPs - Point clouds.....	28
Figura 22: Captura información GCPs	28

RESUMEN

El presente proyecto describe una metodología experimental en la generación de productos cartográficos catastrales empleando un UAV multi-rotor. La reconstrucción de la escena 3D y creación de superficies, combinó una serie de misiones de vuelo programadas con ángulos de 45 y 90°, puntos de apoyo fotoidentificables y alturas niveladas obtenidas a través de una nivelación geométrica de tercer orden. Puntos de control distribuidos aleatoriamente, en comparación con coordenadas obtenidas en cartografía y alturas pertenecientes a la nube de puntos, determinaron una exactitud posicional de 6,93 cm en el componente horizontal y 10,95 cm en el componente vertical, cumpliendo la tolerancia requerida por la normativa IGM.

PALABRAS CLAVE:

- **UAV**
- **ESCENA 3D**
- **CARTOGRAFÍA**
- **EXACTITUD POSICIONAL**

ABSTRACT

The present project describes an experimental methodology in the generation of cadastral cartographic products using a multi-rotor UAV. The 3D scene reconstruction and surfaces creation, combined a programmed flight missions series with angles of 45 and 90°, photo-identifiable support points and level heights obtained through a third order geometric leveling. Ground control points randomly distributed, compared to coordinates obtained in cartography and heights belonging to the point clouds, determined a positional accuracy of 6,93 cm in the horizontal component and 10,95 cm in the vertical component, fulfilling the tolerance required by the IGM regulations.

KEYWORDS:

- **UAV**
- **3D SCENE**
- **CARTOGRAPHY**
- **POSITIONAL ACCURACY**

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El empleo de UAVs para la actualización y levantamiento de información catastral deben garantizar una precisión dentro de los límites de la norma A2 del IGM para escalas grandes; por tal motivo el presente proyecto ejecutará un control de calidad de los productos cartográficos y modelos 3D, generados a partir de las técnicas citadas.

1.2 Antecedentes

La obtención de cartografía a gran escala a partir de proyectos de fotogrametría mediante vehículos aéreos no tripulados (UAVs) se ha convertido en una alternativa a los levantamientos de información tradicionales basados en sistemas de posicionamiento global (GPS) o estaciones totales. Esta hipótesis se basa en la reducción de costos, la aplicación a zonas reducidas, la eficiencia de los procedimientos, la precisión de posición obtenida, entre otros (Mozas-Calvache & Pérez-García, 2016).

En los últimos años, los UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados), equipados con varios sensores, se han desarrollado rápidamente y han sido implementados de varias maneras en todo el campo de la información geoespacial. Los datos e imágenes de áreas específicas pueden ser rápidamente adquiridos por los UAVs a bajo costo y con actualizaciones frecuentes (Park & Lee, 2016).

El avance en el catastro ha sido notable con la aparición de la fotogrametría digital y el empleo de UAVs, que a través de la combinación de hardware y software son capaces de generar productos cartográficos de excelente calidad, con menor tiempo de procesamiento y adquisición de información (ISPRS, 2013).

1.3 Justificación e importancia

La actualización y levantamiento de información catastral por parte de los municipios implica un elevado costo financiero y temporal, lo cual crea la necesidad del desarrollo de procesos que agilicen la producción de información geoespacial. Los UAVs multirrotor ofrecen una nueva tecnología en el campo fotogramétrico, y a diferencia de los UAV de ala fija, permiten la captura de imágenes oblicuas, lo cual favorece la adquisición de elementos espaciales significativos para el catastro. Al no poseer cámaras calibradas, el control de calidad de sus productos es indispensable para verificar el alcance de las precisiones establecidas por las autoridades que rigen la cartografía nacional.

1.4 Zona de estudio

La zona de estudio (Figura 1) se fija en el Cantón Rumiñahui, parroquia Sangolquí, lugar que cuenta con una densidad constructiva alta, cubriendo una extensión de 6 hectáreas.

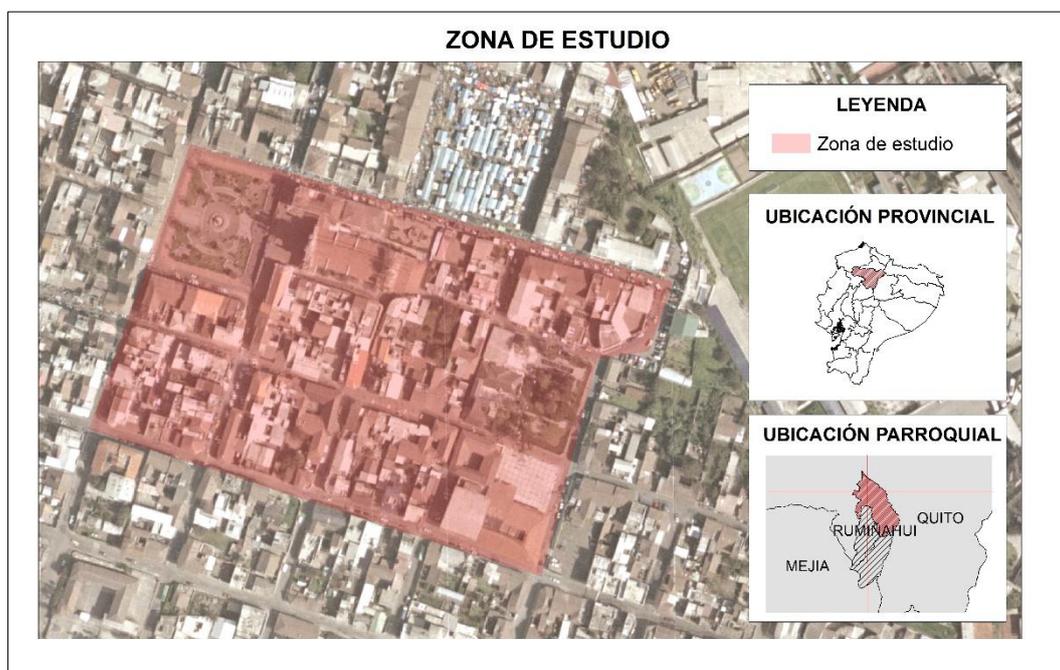


Figura 1: Zona de estudio

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la calidad posicional de productos cartográficos catastrales y modelamiento 3D empleando UAVs comerciales.

1.5.2 Objetivos específicos

- Generar nubes de puntos y ortomosaicos, mediante la combinación de imágenes aéreas y puntos de apoyo terrestres.
- Vectorizar los modelos 2D y 3D referidos al catálogo de objetos con fines catastrales del Instituto Geográfico Militar.
- Realizar el control de calidad de los productos cartográficos.

1.6 Metas

- Nube de puntos .LAS y ortomosaico .TIFF de la zona de estudio.
- Plano catastral 1:1000 de acuerdo a parámetros IGM.
- Informe de precisiones horizontal y vertical.
- Manual metodológico del proceso fotogramétrico y control de calidad.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Catastro

El catastro es un inventario público ordenado metódicamente de datos, relativos a todos los objetos terrestres legales en un determinado país o distrito, basado en una encuesta de sus límites (Steudler, 2001). Estos datos proporcionados por los sistemas catastrales, logran reforzar notablemente los procesos de toma de decisiones políticas y el desarrollo sostenible (Kaufmann, 2002).

La actualización catastral en predios urbanos y rurales, se debe realizar en forma permanente por parte de las municipalidades y distritos metropolitanos, incluyendo los bienes inmuebles con el valor de la propiedad (COOTAD, 2011).

2.2 UAVs

Un UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) es una aeronave genérica diseñada para operar sin un piloto humano a bordo (Everaerts, 2008). Su fuente de energía, que proporciona la elevación y el empuje basados en aerodinámica, es controlada por navegación autónoma o a control remoto (Nonami, et al., 2010).

Las aeronaves actuales se encuentran equipadas con sistemas de medición fotogramétricos y sensores implementados que permiten el registro y seguimiento de la posición y orientación del equipo (Eisenbeiß, 2009). Niveles de crecimiento sin precedentes han sido alcanzados en diversos dominios de aplicaciones militares y civiles (Valavanis, 2008).

2.2.1 Clasificación

Eisenbeiß (2009) clasifica a los UAVs a través de las características principales de las aeronaves presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1
Clasificación de UAVs

	Más liviano que el aire	Más pesado que el aire		
		Ala flexible	Ala fija	Ala giratoria
Sin fuente de energía	Globo	Ala delta	Planeador	Cometa de rotor
		Parapente		
		Cometa		
Con fuente de energía	Dirigible	Parapente	Propulsor	Rotores individuales
				Coaxial
			Jet de motor	Cuadro rotor
				Multi-rotores

Fuente: (Eisenbeiß, 2009)

2.2.2 Marco legal

La Dirección General de Aviación Civil (DGAC) con la finalidad de precautelar la seguridad operacional del Transporte Aéreo, ha elaborado y presentado el proyecto de Regulación Técnica estableciendo requisitos para la Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), detallado en la Tabla 2.

Tabla 2
Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA)

Operaciones recreativas	Restricciones en zonas de operación	9 kilómetros	Aeródromo
			Base aérea militar
		500 m de demostraciones aéreas	
		150 m	Edificación
			Estructura
			Vehículo
			Embarcación
			Persona
		Zonas densamente pobladas	
		Salida – puesta de sol	

	Horas de operación	Condiciones meteorológicas de vuelo visual	
	Altura máxima	122 m	
	Responsabilidad por la operación	Durante todo el vuelo	
	Integridad fisiológica del operador	Ninguna persona operará los controles si mantiene:	Efectos de fatiga
			Efecto de consumo bebidas alcohólicas o drogas
	Funciones de automatización	Un vuelo automático podrá ser efectuado si permite al operador intervenir en cualquier momento en el control de la aeronave	
	Limitaciones	Operador responsable de cumplir las limitaciones operacionales establecidas por el fabricante	
	Seguros	Contratación póliza de seguros de responsabilidad civil legal a terceros en los montos:	
		2 a 25 kg masa máxima de despegue	USD 3.000,00
		Más de 25 kg masa máxima de despegue	USD 5.000,00
	Cumplimiento leyes y reglamentos locales	El cumplimiento de estas disposiciones, no exime al operador cumplir con leyes y reglamentos locales aplicables	
	Consideración final	La Autoridad Aeronáutica Civil analizará y resolverá cualquier aspecto no considerado	
Operaciones no recreativas	Solicitud de autorización	Remitida 10 días hábiles de anticipación	

Fuente: (DGAC, 2017)

2.3 Adquisición y procesamiento de imágenes UAV

2.3.1 Planificación de vuelo

La planificación de vuelo es una de las fases más importantes para la generación de productos cartográficos, debido a que asegura una cobertura fotográfica estereoscópica total del área de estudio; definiendo la resolución espacial y la distribución de los puntos de control terrestre para una escala determinada (García Fernández, 2015).

Inicia con el conocimiento del área de interés, el tamaño de GSD requerido, y los parámetros intrínsecos de la cámara digital. La escala de imagen deseada y la longitud focal de la cámara utilizada generalmente se fijan para obtener la altura de vuelo de la misión. Los centros de perspectiva se calculan fijando el traslape longitudinal y transversal de las líneas de vuelo (por ejemplo, 80-60%) (Nex & Remondino, 2014).

Dentro de los parámetros más importantes, se encuentra: la altura de vuelo, que determina el tamaño de GSD, el área a ser cubierta y la duración del vuelo (Rossiter & Hengl, 2002); el traslape define la superposición de imágenes en la proporción existente entre el sector repetido en ambas (Valdebenito & Gonzales, 2003) y los puntos de apoyo, los cuales son puntos de coordenadas conocidas en el área de interés. Su obtención puede proceder de diferentes fuentes, por ejemplo, a partir de nubes de puntos en Estructura de Movimiento (SfM), píxeles compatibles de forma fiable, escaneo rango de datos láser de baja resolución, intervención del usuario o diversas combinaciones de estas modalidades (Wang & Yang, 2011).

2.3.2 Phantom 3 professional

El DJI Phantom 3 profesional (Figura 2) es un quadróptero con un peso inferior a 44 onzas (1280g), diseñado principalmente para transportar una cámara de alta definición. Posee una velocidad máxima de 16 m/s y una

velocidad máxima de ascenso de 5 m/s. Utiliza una unidad interna de medición inercial (IMU) con sensor barométrico integrado y un sistema de posicionamiento global (GPS) para mantener su orientación geoespacial y su posición (Magro, 2015).

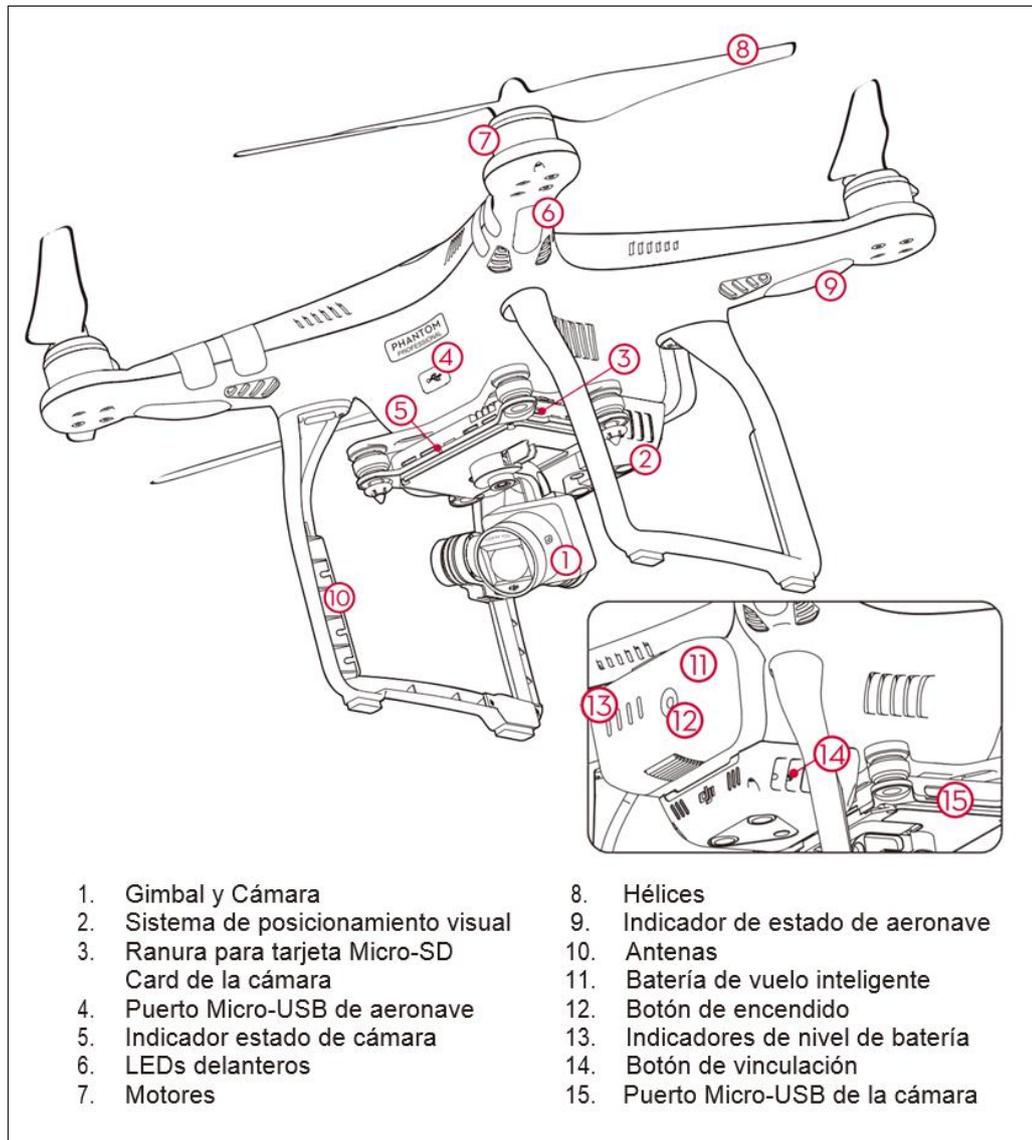


Figura 2: Componentes UAV Phantom 3 Professional

Fuente: (DJI, 2015)

2.3.2.1 Especificaciones sensor

DJI implementó la cámara Sony EXMOR (Figura 3) con un poder de resolución de 12,7 megapíxeles y calidad 4K en video. Posee una rótula de estabilización en 3 ejes que mantiene el sensor nivelado, eliminando distorsiones debido a la vibración producida por las hélices en movimiento (DJI, 2015).



Figura 3: Sony EXMOR

Fuente: (DJI, 2015)

Un amplio campo de visión es procedente de un tamaño de imagen 4000x3000 píxeles y longitud focal de 3,55 mm. El espectro electromagnético cubre las bandas RGB, pertenecientes al espectro visible.

2.3.3 Procesamiento de datos fotogramétricos

La determinación simultánea de los parámetros de la cámara (interior y exterior) y de la estructura 3D se denomina Estructura de Movimiento (SfM) (Nex & Remondino, 2014).

SfM implica un proceso que automáticamente localiza y empareja un limitado número de características comunes entre imágenes, las cuales son utilizadas para establecer los parámetros de orientación interna y externa

(Micheletti, et al., 2015). Los algoritmos SfM necesitan un gran número de imágenes superpuestas para cubrir el área de interés (Fonstad, et al., 2013).

La geometría de la escena, las posiciones de la cámara y la orientación se resuelven automáticamente sin necesidad de especificar una red de objetivos que tienen posiciones 3D conocidas. En su lugar, se resuelven simultáneamente utilizando un procedimiento de ajuste de haces iterativos altamente redundante, establecido en una base de datos de características extraídas automáticamente de un conjunto de múltiples imágenes superpuestas (Westoby, et al., 2012).

2.3.4 Pix4Dmapper Pro

Pix4Dmapper Pro de Pix4D es un software suizo de Visión por Computadora desarrollado en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Benassi, et al., 2017). Convierte imágenes en resultados altamente precisos y aplicables para una amplia gama de aplicaciones SIG. Utiliza imágenes para generar nubes de puntos, modelos digitales de superficie y terreno, ortomosaicos y modelos texturados (Pix4D, 2016).

2.3.5 Productos fotogramétricos

2.3.5.1 Nube de puntos

La reconstrucción en 3D a partir de imágenes se basa en la extracción de correspondencias de imágenes. Los puntos de características coincidentes en las imágenes superpuestas permiten la derivación de coordenadas 3D como nubes de puntos. En la visión por computadora esto se realiza a través de un proceso conocido como Estructura de Movimiento (SfM) que deriva la posición y orientación de la cámara y las coordenadas del modelo 3D (Harwin & Lucieer, 2012). La densidad de la nube de puntos

creada se encuentra en función del número de coincidencias de puntos encontrados (Furukawa & Ponce, 2007).

2.3.5.2 Modelo Digital de Superficie (MDS)

Se define como un ráster que representa la altura de la superficie de la Tierra (Li, et al., 2010), el cual incluye: vegetación, edificios y todos los demás objetos de superficie (Stal, 2010).

2.3.5.3 Ortomosaico

Un ortomosaico se compone de la fusión de imágenes corregidas y georreferenciadas adyacentes en una sola imagen más grande, mediante un proceso llamado “mosaicking” (Mouafo & Muller, 2002). Proporcionan la geometría correcta de un mapa y tienen la ventaja de ofrecer capacidades interpretativas visuales (Konecny, 2014).

2.4 Legislación

Las tolerancias máximas permisibles para la generación de cartografía en el Ecuador (Tabla 3), se encuentran en la Norma Ecuatoriana “Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala” (IGM, 2006). El presente proyecto efectuará controles de calidad de los productos cartográficos con fines catastrales, los cuales no deben diferir del valor verdadero en más de 0,3 mm multiplicado por el factor de escala.

Tabla 3
Tolerancia de cartografía para grandes escalas

Escala	Precisión horizontal	Precisión vertical
1000	30 cm	25 cm

Fuente: (IGM, 2006)

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Metodología

La metodología del proyecto fue definida en cuatro etapas, las cuales son representadas en la Figura 4.

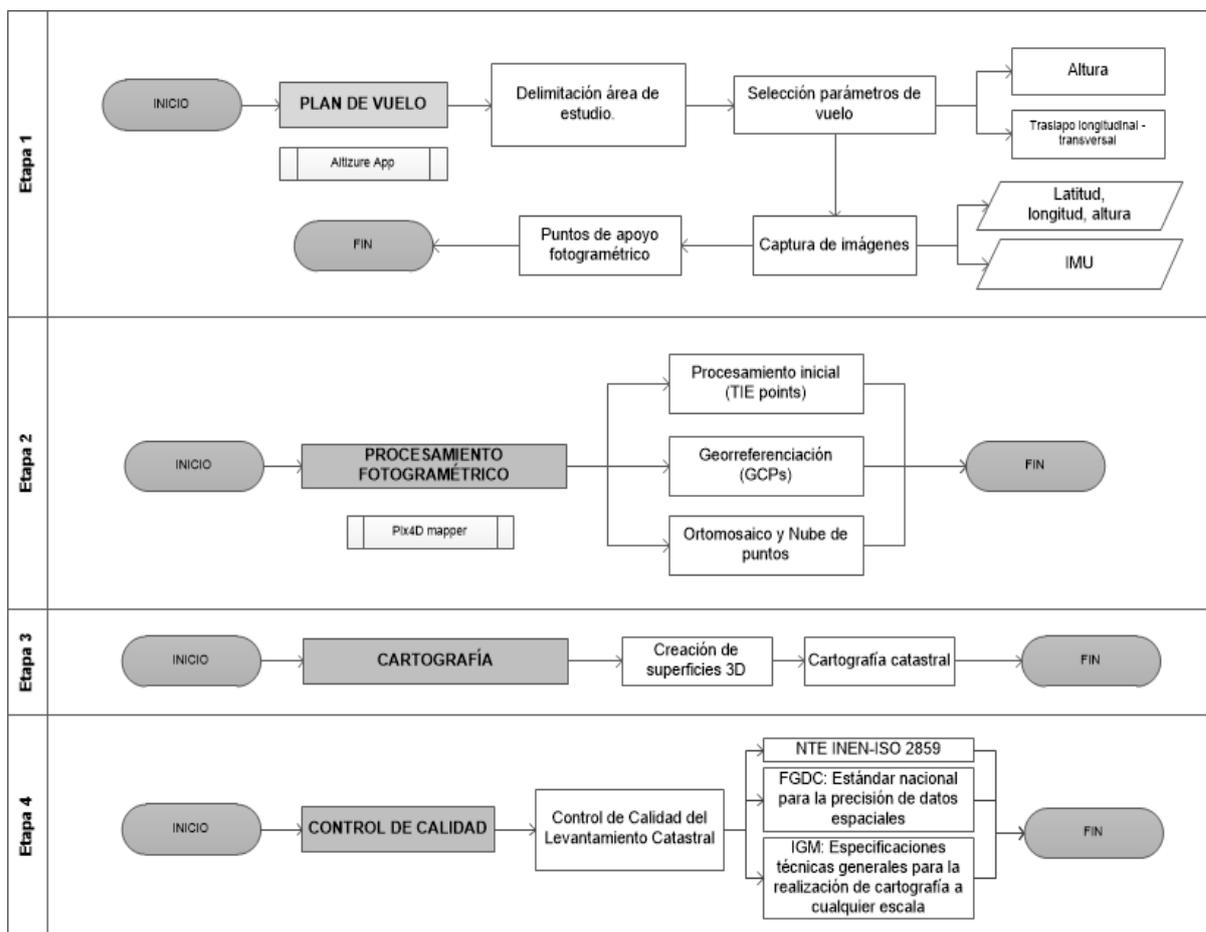


Figura 4: Flujograma metodológico del proyecto

3.1.1 Planificación de vuelo

La planificación de vuelo es la fase de inicio en un proyecto fotogramétrico mediante UAV, considera aspectos como: la escala del producto final y la

precisión requerida, para lo cual es importante definir parámetros de vuelo y puntos de apoyo terrestre.

3.1.1.1 Parámetros de vuelo

Los parámetros de vuelo son valores programados en función de la resolución del producto a obtener, entre los cuales se encuentran: altura de vuelo, traslapeo transversal y longitudinal, velocidad de ascenso y desplazamiento, ángulo de inclinación de la cámara y tamaño GSD a obtener.

La Tabla 4 enlista los parámetros de vuelo definidos para el UAV Phantom 3 Professional en el área de estudio del cantón Rumiñahui.

Tabla 4

Parámetros de vuelo UAV

Altura de vuelo	120 m
Traslapeo Transversal	80%
Traslapeo longitudinal	80%
Velocidad de ascenso	3 m/s
Velocidad de desplazamiento	10 m/s
Ángulo de inclinación de la cámara	45° - 90°
GSD	5,3 cm

3.1.1.2 Puntos de apoyo terrestre (GCPs)

Los puntos de apoyo permitirán una correcta georreferenciación del producto final, para lo cual se realizó un rastreo de ocho puntos fotoidentificables distribuidos en el interior del área cubierta (Figura 5).



Figura 5: Puntos de apoyo terrestre

El rastreo fue realizado en el día GPS 293, correspondiente al 20 de octubre del 2017. La red GNSS de monitoreo continuo del Ecuador – REGME fue empleada para el posicionamiento de los puntos, mediante la estación EPEC, localizada en la Universidad de las Fuerzas Armadas.

Los equipos GNSS (Figura 6) rastrearon cada punto de apoyo por un tiempo de una hora y un intervalo de registro de 5 segundos en el marco de referencia WGS84, siendo estos equipos:

- L1/L2: Trimble 5800, Trimble R4

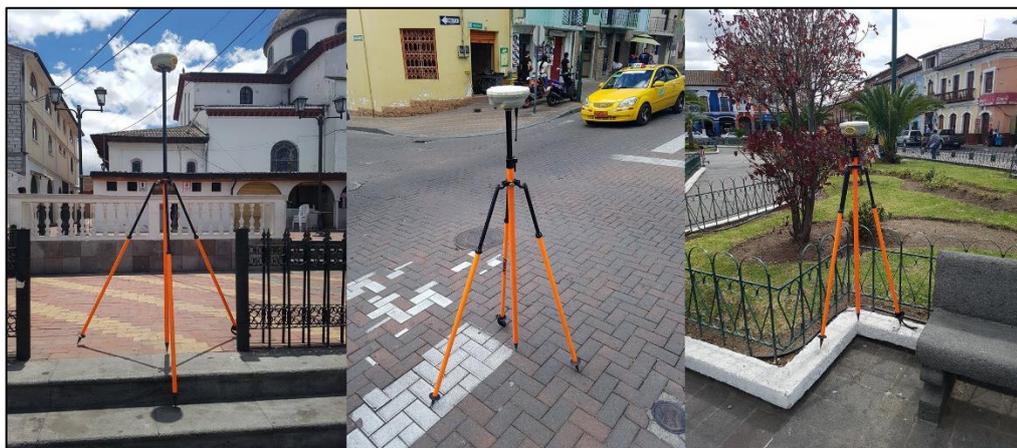


Figura 6: Rastreo de puntos de apoyo terrestre

Los datos obtenidos fueron procesados en el software Trimble Business Center (TBC), cuyo resultado es presentando en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultado de procesamiento de GCPs

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Altura elipsoidal (m)	Precisión horizontal (m)	Precisión vertical (m)
GCP1	784286,892	9963574,52	2513,278	0,011	0,018
GCP2	784122,883	9963614,01	2512,888	0,012	0,017
GCP3	783948,162	9963493,35	2507,511	0,011	0,018
GCP4	784069,034	9963452,17	2512,858	0,01	0,021
GCP5	784156,632	9963498,37	2515,307	0,012	0,03
GCP6	784009,985	9963640,48	2509,535	0,012	0,019
GCP7	784207,638	9963474,32	2513,278	0,003	0,005
GCP8	784096,235	9963516,93	2514,983	0,01	0,016

3.1.1.3 Nivelación geométrica

La altura nivelada de los puntos de apoyo terrestres fue obtenida a partir de la altura elipsoidal de uno de ellos, debido a la inexistencia de vértices de la red de nivelación cercanas a la zona de estudio.

El nivel automático Sokkia C320 (Figura 7) fue empleado para la nivelación geométrica que alcanzó una precisión de tercer orden con un cierre de 9 mm en 2 km de distancia; las alturas niveladas obtenidas son presentadas en la Tabla 6.



Figura 7: Nivel automático de ingeniero

Tabla 6

Resultado de nivelación geométrica

Nombre	Altura nivelada (m)
GCP1	2514,266
GCP2	2513,9
GCP3	2508,51
GCP4	2512,858
GCP5	2516,408
GCP6	2510,72
GCP7	2517,123
GCP8	2514,993

3.1.2 Ejecución de vuelo

El proyecto se desarrolló en el Cantón Rumiñahui, con una densidad constructiva alta cubriendo una extensión de 6 hectáreas, mediante del empleo de un UAV Phantom 3 Professional.

Varios vuelos fueron ejecutados mediante la aplicación “Altizure”, que combina ángulos de captura de 45 y 90°.

3.1.2.1 Altizure App

Altizure es una plataforma móvil, que permite la captura de imágenes verticales y oblicuas para generación de productos 2D y 3D, mediante una interfaz basada en la visualización de imágenes satelitales de Google Earth.

El procedimiento para la captura de información es el siguiente:

- Delimitación del área de vuelo

El área de vuelo (Figura 8), es delimitada ajustando su posición (presionando la cuadrícula verde), tamaño (expandingo los vértices azules) y dirección (presionando la cuadrícula y girándola).



Figura 8: Delimitación del área de vuelo

- Parámetros de vuelo

La altura es definida en la esquina superior derecha de la pantalla y el porcentaje de traslapo es ingresado en el ícono “Settings”, como se ilustra en la Figura 9.

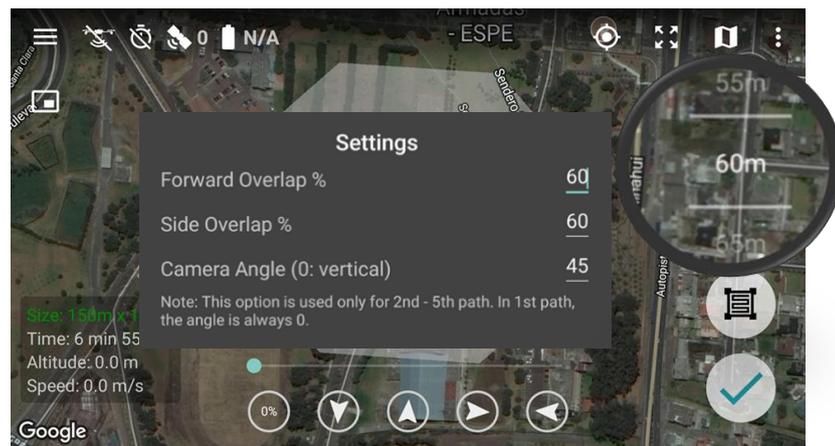


Figura 9: Variación de altura y traslapo

3.1.3 Procesamiento de imágenes software Pix4D

Pix4D es un software fotogramétrico, que utiliza imágenes para generar nubes de puntos, modelos digitales de superficie, ortomosaicos e información 2D y 3D.

Como primer paso se generará un nuevo proyecto, colocando su nombre y la dirección de guardado. Posteriormente se importarán las imágenes obtenidas en formato JPG o TIFF (Figura 10).

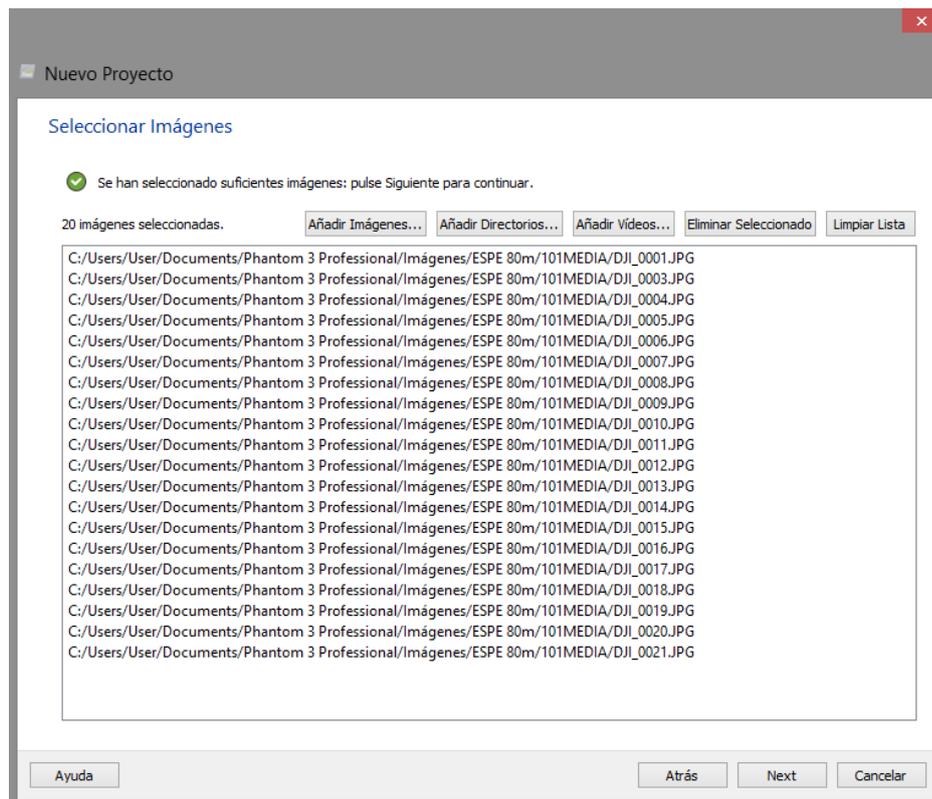


Figura 10: Importación de imágenes aéreas en software Pix4D

La siguiente ventana muestra las propiedades de la imagen, con el sistema de coordenadas por defecto empleado en el GPS incorporado en el UAV, siendo éste el sistema WGS 84. El modelo de cámara es seleccionado automáticamente, identificando el Phantom 3 Professional con el nombre FC300X y banda RGB.

Cada imagen posee información GNSS/IMU (Figura 11), la cual se compone por diez columnas clasificadas en tres grupos:

- Identificador: Nombre, Grupo.
- GNSS: Latitud, Longitud, Altura elipsoidal, Precisión horizontal, Precisión vertical.
- IMU: Omega (Roll), Phi (Pitch) y Kappa (Yaw).

Activada	Imagen	Grupo	Latitud [degree]	Longitud [degree]	Altitud [m]	Precisión Horz [m]	Precisión Vert [m]	Omega [grado]	Phi [grado]	Kappa [grado]
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0001.JPG	group1	-0.31103819	-78.44711236	2591.763	5.000	10.000	-0.09974	-0.00713	-175.91387
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0003.JPG	group1	-0.31102275	-78.44695033	2591.663	5.000	10.000	-0.09974	-0.00713	-175.91387
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0004.JPG	group1	-0.31101075	-78.44678878	2591.663	5.000	10.000	-0.09969	-0.00782	-175.51388
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0005.JPG	group1	-0.31099825	-78.44662708	2591.863	5.000	10.000	-0.09968	-0.00800	-175.41387
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0006.JPG	group1	-0.31098506	-78.44646611	2591.863	5.000	10.000	-0.09966	-0.00817	-175.31388
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0007.JPG	group1	-0.31097275	-78.44630497	2591.863	5.000	10.000	-0.09966	-0.00817	-175.31388

Figura 11: Información GNSS/IMU de imágenes

Se procede a seleccionar el sistema de coordenadas de salida (Figura 12), considerando el Ecuador continental la Zona UTM 17 y 18 Sur.

Sistema de coordenadas seleccionado

 Datum: World Geodetic System 1984
Sistema de Coordenadas: WGS 84 / UTM zone 17S (egm96)

Sistema de Coordenadas de Salida/Puntos de Apoyo

Unidad:

Sistema de coordenadas arbitrario [m]

Auto detectado: WGS84 / UTM zone 17S

Sistema de coordenadas conocido [m]

Opciones avanzadas de coordenadas

Figura 12: Sistema de coordenadas de salida

La opción Mapas 3D, generará como resultados: Nube de puntos, Ortomosaicos, DSM (Modelo Digital de Superficie) y Malla en 3D. Siendo los ortomosaicos el producto deseado en el proyecto.

3.1.3.1 Procesamiento Inicial

Calcula la localización y parámetros de las imágenes aéreas a través de una Avanzada Aerotriangulación Automática (ATA) y Ajuste de Bloque Simultáneo (ABS), aspectos característicos del software Pix4D. El resultado del proceso es una nube de puntos de paso o "Tie points" (Figura 13).

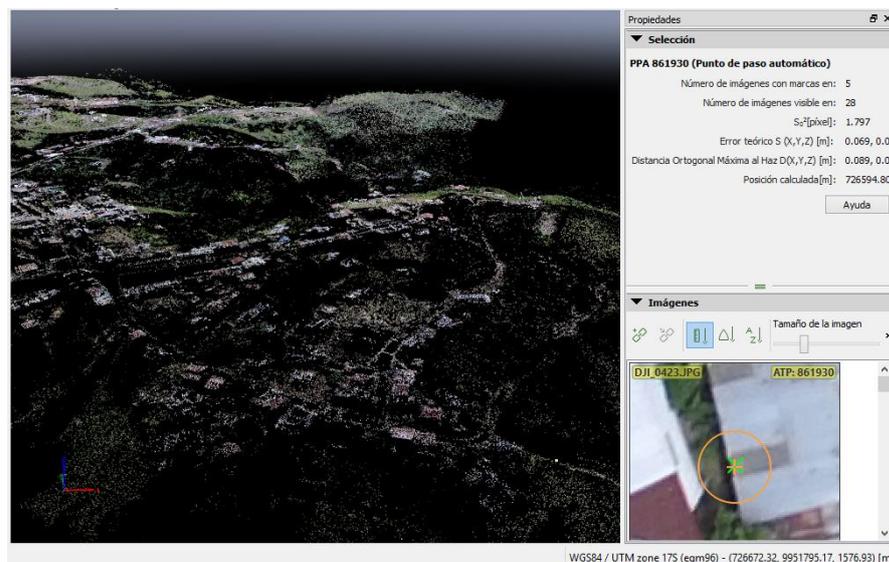


Figura 13: Tie points resultantes del procesamiento inicial

3.1.3.2 GCPs – Puntos de Apoyo Terrestre

El enlace entre las imágenes y los puntos de apoyo permitirán una “Georreferenciación” del proyecto, para lo cual es necesario crear un Bloc de Notas (Figura 14), el cual contenga las coordenadas de Este, Norte y h con sus respectivas precisiones tanto horizontal, como vertical.

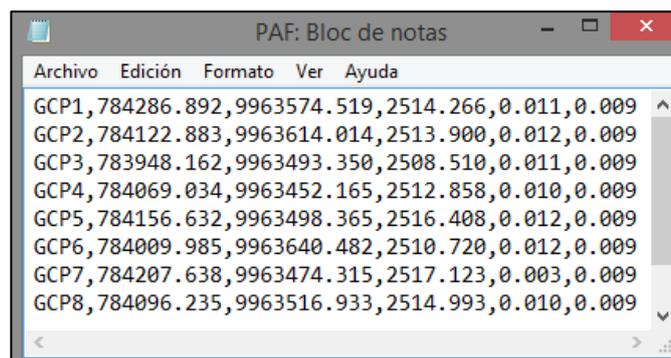


Figura 14: Formato de importación GCPs

El archivo .txt debe ser importado en el Gestor GCP/MTP y ser marcado o “pinchado” en al menos 3 imágenes para calcular su posición 3D (Figura 15).

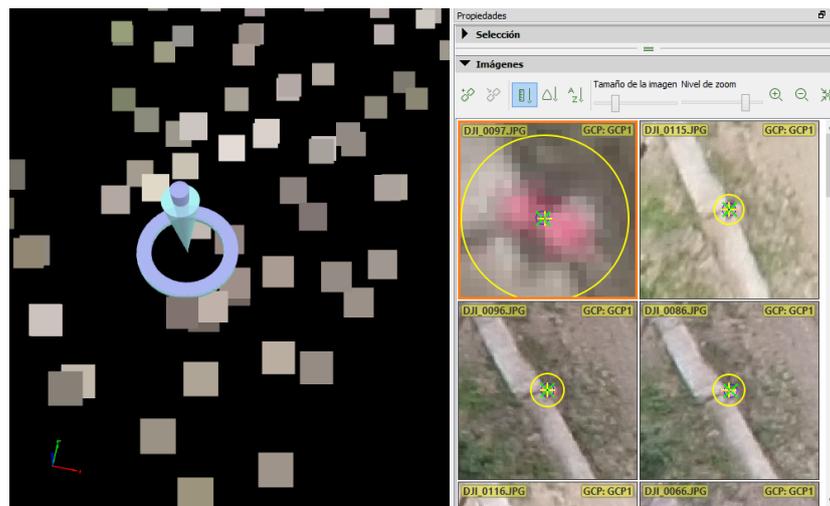


Figura 15: Pinchado de GCPs en imágenes

Finalmente es necesario “Reoptimizar” el proceso, para ajustar los Tie Points automáticos a la posición de los GCPs.

3.1.3.3 Ortomosaico

El resultado final del proyecto se da a través de la fusión de las imágenes corregidas en formato TIFF (Figura 16).



Figura 16: Ortomosaico

3.1.4 Creación de superficies

El proceso convencional para la generación de cartografía se basa en la digitalización sobre el ortomosaico referida al “Catálogo de objetos para cartografía base con fines catastrales escala 1:1000”, sin embargo es necesario realizar mediciones en cada construcción para lograr obtener áreas reales que no incluyan volados y aleros.

Por este motivo, se aplicó una metodología experimental, generando superficies en la nube de puntos en donde cada vértice pinchado se lo realiza sobre la base de la construcción más no sobre el tejado, lo cual es posible debido a los ángulos de captura de 45 y 90° (Figura 17).

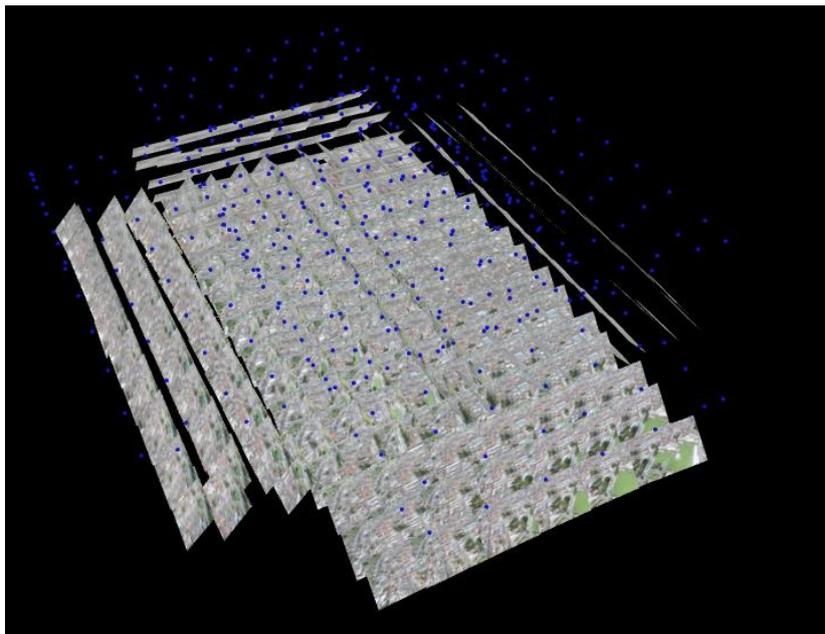


Figura 17: Ángulos de captura de imágenes

El procedimiento de marcado o pinchado realizado en los GCPs en al menos 3 imágenes es realizado en cada vértice de la superficie creada, garantizando una reconstrucción relativa idónea (Figura 18).

Su comparación respecto a superficies digitalizadas sobre ortomosaicos es presentada en la Figura 19.

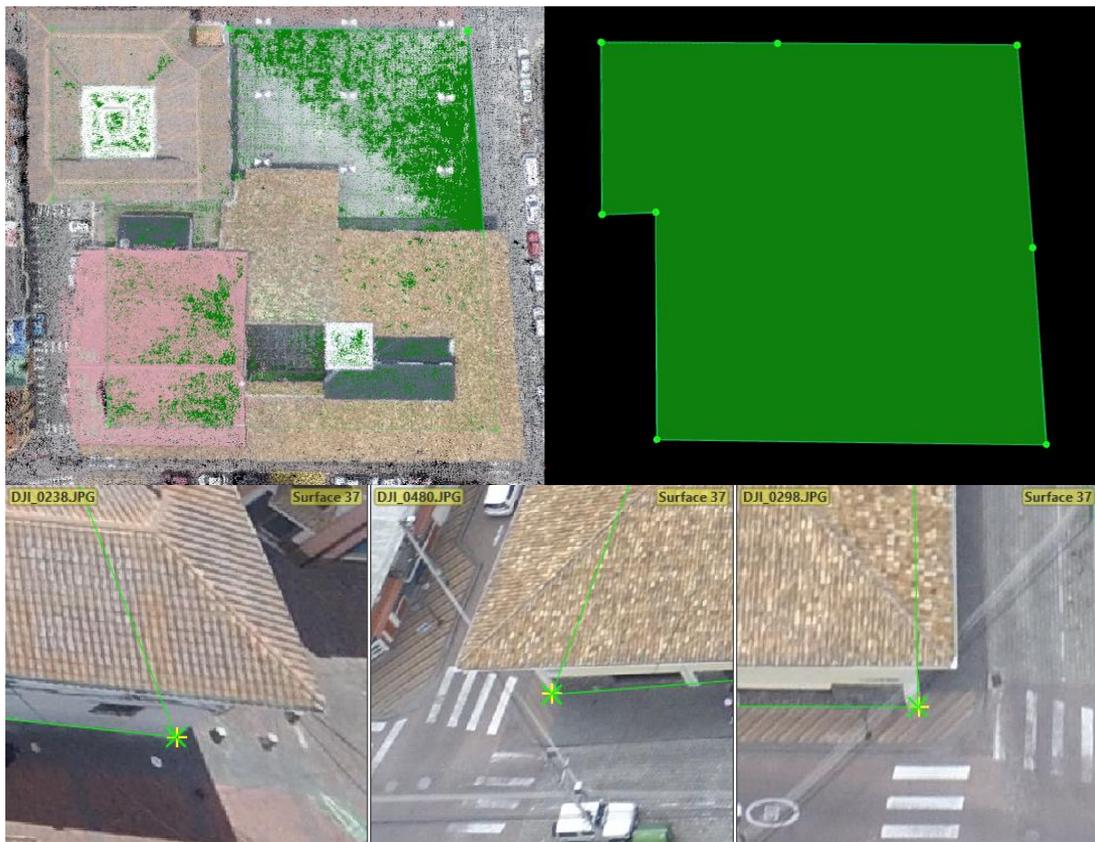


Figura 18: Creación de superficies



Figura 19: Comparación superficies sobre ortomosaico

3.1.5 Control de calidad productos fotogramétricos

3.1.5.1 Tamaño y selección de la muestra

La definición del tamaño muestral es aplicado de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 2859-1:2009: “Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1. Programas de muestreo clasificados por el nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección lote a lote.”

Al poseer un total de 107 predios en la zona de estudio, se recomienda seleccionar una muestra de 20 puntos de control con una inspección normal de nivel II, valor obtenido del “Código alfabético del tamaño de la muestra” (Tabla 7) y “Planes de muestreo simple para la inspección normal” (Tabla 8), pertenecientes a la NTE INEN-ISO 2859-1:2009; sin embargo por fines estadísticos, se optó seleccionar un total de 30 puntos de control.

Tabla 7

Código alfabético del tamaño de la muestra

Tamaño del lote	Niveles generales de inspección		
	I	II	III
2 a 8	A	A	B
9 a 15	A	B	C
16 a 25	B	C	D
26 a 50	C	D	E
51 a 90	C	E	F
91 a 150	D	F	G
151 a 280	E	G	H
281 a 500	F	H	J
501 a 1 200	G	J	K
1 201 a 3 200	H	K	L
3 201 a 10000	J	L	M
10 001 a 35000	K	M	N
35 001 a 150000	L	N	P
150 001 a 500 000	M	P	Q
500 000 y más	N	Q	R

Fuente: (INEN, 2009)

Tabla 8***Planes de muestreo simple para la inspección normal***

Letra código del tamaño de la muestra	Tamaño de la muestra
A	2
B	3
C	5
D	8
E	13
F	20
G	32
H	50
J	80
K	125
L	200
M	315
N	500
P	800
Q	1 250
R	2 000

Fuente: (INEN, 2009)

3.1.5.2 Exactitud posicional

La verificación de tolerancias máximas permisibles en el aspecto horizontal y vertical, se rigen a la norma ecuatoriana A2: “Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala” (IGM, 2006); la cual determina una precisión cartográfica para escala 1:1000 de 30 cm en horizontal y 25 cm en vertical.

El control de calidad emplea la norma: “Estándares de precisión de posicionamiento geoespacial - Parte 3: Estándar nacional para la precisión de datos espaciales” de la Federal Geographic Data Comitee (FGDC), en donde se utiliza el Error Medio Cuadrático (RMSE) para estimar la exactitud posicional. Se realizó una comparación de coordenadas entre los puntos definidos por la distribución muestral y los mismos puntos obtenidos en campo por antenas GPS de doble frecuencia.

3.1.5.2.1 Exactitud posicional horizontal

El rastreo de la muestra comprendida por 30 puntos de control (Figura 20) fue efectuado con el método RTK (Real Time Kinematic), por un tiempo de un minuto y un intervalo de registro de 5 segundos en el marco de referencia WGS84.



Figura 20: Distribución puntos de control

3.1.5.2.2 Exactitud posicional vertical

Se realizó una nivelación geométrica de tercer orden en cada punto de control, a partir de la altura elipsoidal obtenida en un punto de apoyo terrestre (GCP); determinando la diferencia entre las cotas niveladas y la nube de puntos (Figura 21).

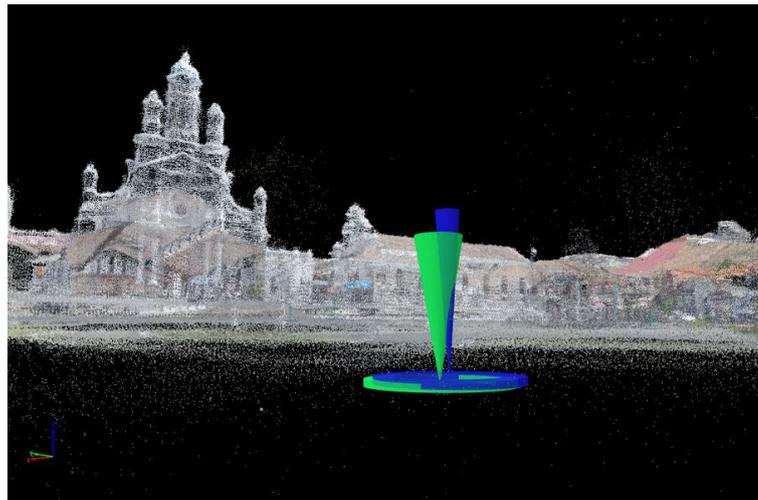


Figura 21: Diferencia GCPs - Point clouds

La captura de información GPS perteneciente a GCPs se presenta en la Figura 22.

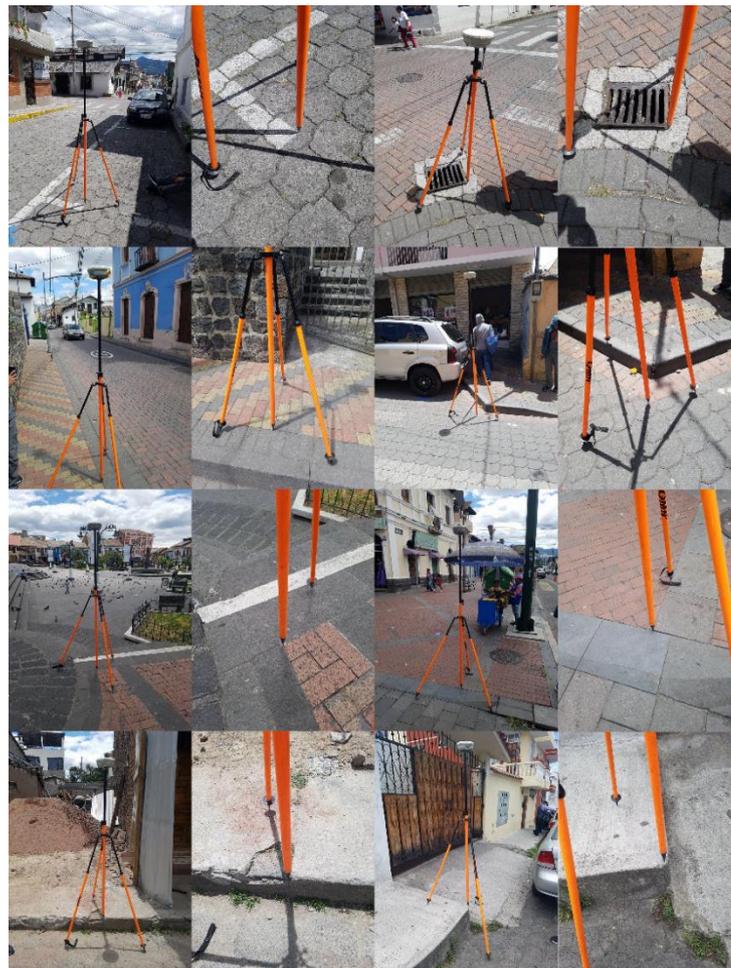


Figura 22: Captura información GCPs

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Análisis de los resultados

4.1.1 Exactitud posicional horizontal

Para la determinación de la exactitud posicional horizontal, se comparó las coordenadas de los 30 puntos pre-definidos obtenidos de la cartografía catastral generada en la nube de puntos, con las coordenadas adquiridas mediante las antenas GPS doble frecuencia, resultando la diferencia presentada en la Tabla 9.

Tabla 9

Diferencia posicional entre coordenadas obtenidas en cartografía catastral y puntos de control

	ΔE	ΔN		ΔE	ΔN
1	-0,008	-0,024	16	-0,032	-0,011
2	0,027	0,021	17	-0,005	-0,041
3	-0,008	-0,005	18	-0,029	-0,032
4	0,001	-0,079	19	0,034	0,009
5	0,017	0,02	20	0,042	0,019
6	-0,043	-0,002	21	-0,036	-0,017
7	-0,036	-0,005	22	-0,028	-0,025
8	-0,039	0,054	23	0,012	0,029
9	-0,021	-0,028	24	-0,001	-0,024
10	0,036	0,031	25	-0,027	-0,027
11	-0,005	-0,018	26	0,029	0,008
12	0,023	0,035	27	-0,011	-0,039
13	-0,04	-0,006	28	0,035	0,027
14	-0,026	-0,027	29	0,028	0,019
15	0,027	0,036	30	-0,014	-0,005

La Federal Geographic Data Comitee (FGDC) determina la exactitud posicional horizontal mediante el Error Cuadrático Medio (RMSE) correspondiente a la raíz cuadrada de la media de los residuos, la cual debe

fraccionarse en los componentes este (x) y sur (y), representados en las ecuaciones 1 y 2.

$$\text{RMSE}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{cartografía}} - x_{\text{control}})^2}{n}} \quad [1]$$

$$\text{RMSE}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{cartografía}} - y_{\text{control}})^2}{n}} \quad [2]$$

Dos consideraciones son aplicadas a partir de los valores obtenidos por el RMSE en los componentes x-y.

- Caso 1: $\text{RMSE}_x = \text{RMSE}_y$, la exactitud posicional se calculará mediante la ecuación 3.

$$\text{Exactitud posicional}_{\text{horizontal}} = 1,7308 \times \sqrt{\text{RMSE}_x^2 + \text{RMSE}_y^2} \quad [3]$$

- Caso 2: $\text{RMSE}_x \neq \text{RMSE}_y$, la exactitud posicional se calculará mediante la ecuación 4.

$$\text{Exactitud posicional}_{\text{horizontal}} = 2,4477 \times 0,5 \times (\text{RMSE}_x + \text{RMSE}_y) \quad [4]$$

Los valores 1,7308 y 2,4477 pertenecen a una distribución normal estándar bivalente, con un intervalo de confianza del 95%, empleados como normas de precisión por la FGDC de acuerdo al reporte técnico: "Principios de la teoría del error y aplicaciones cartográficas" (Greenwalt & Shultz, 1968).

La aplicación de las ecuaciones 1 y 2 sobre la diferencia posicional entre las coordenadas obtenidas en cartografía catastral y puntos de control, calcularon los resultados presentados en la Tabla 10.

Tabla 10***RMSE en componentes x-y***

RMSE _x	0,0274
RMSE _y	0,0293

Al ser $RMSE_x \neq RMSE_y$, la exactitud posicional horizontal fue calculada a través de la ecuación 4, resultando en el siguiente valor:

$$\text{Exactitud posicional}_{horizontal} = 2,4477 \times 0,5 \times (0,0274 + 0,0293)$$

$$\text{Exactitud posicional}_{horizontal} = 0,0693 \text{ m}$$

4.1.2 Exactitud posicional vertical

Para la determinación de la exactitud posicional vertical, se comparó las alturas niveladas de los 30 puntos pre-definidos descritos en el literal 4.1.1, resultando la diferencia presentada en la Tabla 11.

Tabla 11***Diferencia altimétrica entre cotas niveladas obtenidas en MDS y puntos de control***

	Δh		Δh
1	0,032	16	-0,039
2	-0,049	17	-0,050
3	-0,050	18	-0,048
4	0,015	19	-0,067
5	0,044	20	0,076
6	0,063	21	-0,078
7	0,027	22	-0,091
8	0,067	23	0,032
9	-0,095	24	-0,050
10	0,044	25	-0,069
11	-0,049	26	-0,051
12	0,058	27	-0,036
13	-0,031	28	0,057
14	-0,063	29	-0,024
15	0,018	30	-0,064

La ecuación 5 representa el cálculo del RMSE vertical, cuya exactitud posicional de acuerdo a la FGDC, se encuentra definida por la ecuación 6.

$$\text{RMSE}_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{MDS} - z_{control})^2}{n}} \quad [5]$$

$$\text{Exactitud posicional}_{vertical} = 1,96 \times \text{RMSE}_z \quad [6]$$

El valor 1,96 pertenece a una distribución normal estándar con un intervalo de confianza del 95% (Greenwalt & Shultz, 1968).

La aplicación de la ecuación 5 sobre la diferencia altimétrica entre cotas niveladas obtenidas en MDS y puntos de control, generó un valor de:

$$\text{RMSE}_z = 0,0559$$

La exactitud posicional vertical fue calculada a través de la ecuación 6, resultando en el siguiente valor:

$$\text{Exactitud posicional}_{vertical} = 1,96 \times 0,0559$$

$$\text{Exactitud posicional}_{vertical} = 0,1095 \text{ m}$$

1.1 Discusión de los resultados

Distintos parámetros y estilos de vuelo pueden llevarse a cabo en futuros trabajos para estudiar su impacto en la exactitud posicional horizontal y vertical de los resultados.

1.2 Comprobación de la hipótesis

Los productos cartográficos con fines catastrales obtenidos mediante el empleo de UAVs comerciales cumplen la precisión horizontal y vertical requerida por el Instituto Geográfico Militar, mediante el control de calidad determinado por la norma de la Federal Geographic Data Comitee (FGDC).

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Los productos cartográficos catastrales obtenidos mediante la combinación de tecnología UAV y procesamiento de imágenes, cumplen la calidad posicional requerida por las especificaciones técnicas de la agencia cartográfica del Ecuador.

El control de calidad efectuado sobre la exactitud posicional en cartografía con fines catastrales del presente proyecto, muestra un valor de 6,93 cm para el componente horizontal y 10,95 cm para el componente vertical cumpliendo con la tolerancia requerida por la normativa IGM.

La metodología experimental aplicada en la generación de superficies, permite obtener información sobre la base de la construcción, eliminando la distancia medida en campo en volados y aleros.

El quadróptero Phantom 3 Professional permite la captura de imágenes verticales y oblicuas, lo cual posibilita densificar la nube de puntos y generar modelos 3D.

RECOMENDACIONES

Se recomienda mantener una cantidad, distribución, precisión y orden de nivelación óptimos en los puntos de apoyo fotogramétrico, para asegurar un ajuste adecuado en el componente horizontal y vertical.

La validación de productos fotogramétricos generados mediante tecnología UAV es importante, debido a su aporte en el avance tecnológico del campo geoespacial, disminuyendo costos y tiempo.

Es necesario conocer las disposiciones generales para la operación de UAV's, establecidos por la DGAC, con la finalidad de precautelar la seguridad operacional en las actividades fotogramétricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benassi, F. y otros, 2017. Testing Accuracy and Repeatability of UAV Blocks Oriented with GNSS-Supported Aerial Triangulation. *Remote Sensing*, p. 172.
- COOTAD, 2011. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización. pp. 186-188.
- DGAC, 2017. Operación de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS). *Regulación Técnica*, pp. 1-3.
- DJI, 2015. Phantom 3 Professional specifications.
- DJI, 2015. Quick Start Guide Phantom 3. p. 15.
- Eisenbeiß, H., 2009. UAV photogrammetry.
- Everaerts, J., 2008. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping.. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 1187-1192.
- Fonstad, M. A. y otros, 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement.. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), pp. 421-430.
- Furukawa, Y. & Ponce, J., 2007. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- García Fernández, E., 2015. Planificación de vuelos fotogramétricos para UAV.
- Harwin, S. & Lucieer, A., 2012. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, pp. 1573-1599.
- IGM, 2006. *Especificaciones técnicas generales para la realización de cartografía topográfica a cualquier escala*, Quito: s.n.
- INEN, 2009. Procedimientos de muestreo para inspección por atributos. Parte 1. Programas de muestreo clasificados por el nivel aceptable de calidad (AQL) para inspección lote a lote.. *NTE INEN-ISO 2859-1:2009*, pp. 21-22.
- ISPRS, 2013. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. s.l.:s.n.
- Kaufmann, J., 2002. Catastro 2014: una visión del sistema de Catastro futuro. / *Congreso sobre el Catastro en la Unión Europea*, Octubre.

- Konecny, G., 2014. Geoinformation: remote sensing, photogrammetry and geographic information systems.. *cRc Press*..
- Li, Y., Zhu, L., Gong, P. & Shimamura, H., 2010. A refined marker controlled watershed for building extraction from DSM and imagery.. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1441-1452.
- Magro, M. B., 2015. Airworthiness Certification. pp. 13-15.
- Mesas-Carrascosa, F. J. y otros, 2015. Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by UAV to support site-specific crop management.. *Remote Sensing*, pp. 12793-12814.
- Micheletti, N., Chandler, J. H. & Lane, S. N., 2015. Structure from motion (SFM) photogrammetry..
- Mouafo, D. & Muller, A., 2002. Web-based multimedia cartography applied to the historical evolution of Iqaluit, Nunavut.. *Proceedings of the Joint Designing sound in cybercartography*, p. 1243.
- Mozas-Calvache, A. T. & Pérez-García, J. L., 2016. Analysis and Comparison of Lines Obtained from GNSS and UAV for Large-Scale Maps.. *Journal of Surveying Engineering*.
- Nex, F. & Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review.. *Applied Geomatics*, pp. 1-15.
- Nonami, K. y otros, 2010. Autonomous Flying Robots. *Springer Japan*, pp. 2-27.
- Park, J. H. & Lee, W. H., 2016. Orthophoto and DEM Generation in Small Slope Areas Using Low Specification UAV.. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*., pp. 283-290.
- Pix4D, 2016. *Pix4D SA*. [En línea] Available at: <https://pix4d.com>
- Rossiter, D. G. & Hengl, T., 2002. Technical note: Creating geometrically-correct photointerpretations, photomosaics, and base maps for a project GIS.. *ITC, Department of Earth System Analysis, Enschede, Netherlands*..
- Stal, C., 2010. Kemmelberg (Belgium) case study: comparison of DTM analysis methods for the detection of relicts from the First World War.. *In Proc. 30th EARSeL Symposium: Remote Sensing for Science, Education and Culture*..
- Stuedler, D., 2001. Cadastre 2014: A vision for a future cadastral system. *International Federation of Surveyors*..

- Valavanis, K. P., 2008. *Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy*. Tampa(Florida): Springer Science & Business Media.
- Valdebenito, C. & Gonzales, R., 2003. Apoyo cartográfico al plan maestro de la Universidad de Santiago de Chile, mediante fotogrametría y técnicas GPS.
- Wang, L. & Yang, R., 2011. Global stereo matching leveraged by sparse ground control points. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3033-3040.
- Westoby, M. J. y otros, 2012. 'Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, pp. 300-314.