

Aplicaciones de aeronaves no tripuladas en el control de avance de obras civiles

Abstract

The purpose of this research is to create a methodology that facilitates and speed up the collection of data in order to quantifiably determine the progress of construction work, through the use of drones and commercial Structure from Motion software, so that it could be affordable for small and medium construction companies.

The equipment and the software were selected based on a quality / price ratio. A guide was presented, explaining the way of taking data, its process and photogrammetric products (ortomosaics, 3D models, etc.). Finally, the technique proposed in the guide was validated through a real case where the progress of an activity was quantified. In conclusion, if what is going to be measure tolerates precisions up to 1/1000, the technique is applicable.

The results of this methodology do not intend to displace conventional methods such as topography, but the manual collection of some data, because it is possible to generate reliable, fast, inexpensive, and accurate metric information. For these reasons, it can be an everyday tool for the construction engineer, with extra gains in job security, accessibility and the possibility of creating visual support material for a better understanding with clients, consultants and field workers.

Keywords:

Drones, Structure from Motion, construction works control, activity monitoring, construction.

Resumen

Esta investigación tiene la finalidad de crear una metodología que facilite y agilice la toma de datos con el objetivo de determinar de manera cuantificable los avances de obra de construcción, a través del uso de drones y *software* comerciales utilizados en la fotogrametría digital automatizada, de modo que sea asequible para pequeñas y medianas empresas constructoras.

Se seleccionó el equipo y el software con base en una relación calidad / precio. Se presentó una guía que explica la manera de toma de datos, procesamiento y productos fotogramétricos (ortomosaicos, modelos 3D, etc.). Finalmente, se validó la técnica propuesta en la guía y se aplicó a un caso real en el cual se cuantificó el avance de una actividad. En conclusión, si lo que se quiere medir tolera precisiones de hasta 1/1000, la técnica es aplicable.

Los resultados de esta metodología no pretenden desplazar métodos convencionales como la topografía, pero, sí la toma manual de algunos datos, pues se logra generar de manera segura información métrica rápida, económica y de precisión aceptable. Por estas razones, puede considerarse una herramienta de uso cotidiano del ingeniero en construcción, con beneficios extras en seguridad, accesibilidad y la posibilidad de crear material visual de apoyo para mejorar el entendimiento con clientes, consultores y personal.

Palabras clave:

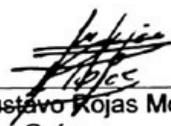
Drones, fotogrametría digital automatizada, control de obras, monitoreo de actividades, construcción.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Manuel Alán Zúñiga, Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, Ing. Milton Sandoval Quirós, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



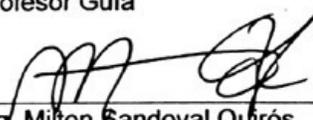
Ing. Manuel Alán Zúñiga.
En representación del Director



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Profesor Guía



Ing. Mauricio Araya Rodríguez.
Profesor Lector



Ing. Milton Sandoval Quirós.
Profesor Observador

Aplicaciones de aeronaves no tripuladas en el control de avance de obras civiles

JORGE ALEJANDRO HERNÁNDEZ MORENO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre del 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Dedicatoria

A mi padre, el ingeniero Jorge Luis Hernández Briceño, a quien sigo en sus pasos en la construcción y en la vida.

A mi madre, Lic. Carmen Elisa Moreno de Hernández, por su incondicional apoyo en la persecución de todas mis metas.

Ambos me han dado la posibilidad de una mejor vida, aunque eso implicara dejar todo en nuestra amada Venezuela y empezar de nuevo.

Dedico este trabajo también a Costa Rica, que nos recibió con los brazos abiertos, y a Venezuela, mi patria, a donde espero volver a reconstruir.

Contenido

Prefacio	1
Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	4
Marco teórico	6
Marco metodológico.....	19
Resultados	21
Análisis de resultados	46
Conclusiones.....	54
Apéndices	55
Referencias	56

Prefacio

En los proyectos de construcción hay una continua necesidad de información acerca de los distintos elementos presentes *in situ*, sin embargo, existe la limitante de que debe ser obtenida de manera rápida, económica y con una precisión aceptable para la estimación del avance de actividades. A modo de ejemplo, usualmente, en actividades como colocación de encofrados, se asigna a una persona para que mida los avances de manera manual.

Desde hace más de un siglo, es posible tratar las fotografías y rectificarlas, permitiendo extraer mediciones de ellas. Sin embargo, en el pasado, era necesario capacitarse durante años en el uso de los equipos (entre ellos aviones tripulados y cámaras métricas especiales), los cuales resultaban bastante costosos. Dicha modalidad de capacitación generaba que este tipo de técnicas quedaran fuera de consideración en el campo de la construcción de edificios, y fueran casi exclusivas para trabajos de cartografía o geodesia.

Los nuevos avances tecnológicos han permitido la democratización de estas técnicas, actualmente existen *software* capaces de procesar imágenes tomadas con cámaras digitales convencionales, asimismo la industria de los drones de uso personal ha crecido notablemente, logrando que estos equipos sean asequibles y que se puedan obtener fotografías que de otro modo eran imposibles.

Numerosas empresas, pequeñas y medianas, ya poseen estos equipos tecnológicos. Sin embargo, no explotan su potencial total (por desconocimiento de sus usos en el área), comúnmente los utilizan solo para obtener fotografías meramente demostrativas de los avances de proyectos y para mercadeo.

Estas herramientas tecnológicas pueden tener aplicación real para los ingenieros dedicados a la construcción si se combina con los *software* adecuados, como se explica en este documento.

De allí que el objetivo de este trabajo fuera elaborar una metodología que facilite y agilice la

toma de datos para determinar de manera cuantificable los avances de obra de construcción, mediante el uso de aeronaves no tripuladas comerciales para el procesamiento fotogramétrico, de modo que quede al alcance de pequeñas y medianas empresas constructoras. La metodología fue validada en un caso real, corto y sencillo, en el cual se demuestra la riqueza y potencialidad de la técnica aplicada a la construcción.

Se agradece el tutelaje del ingeniero civil Gustavo Rojas Moya por su apoyo y orientación en la elaboración de este proyecto en el que se da un paso más hacia la tecnificación de la industria de la construcción. Se agradece también el aporte y guía de tres expertos en el uso de drones y fotogrametría: el ingeniero geodesta Alexis Piña y los ingenieros topógrafos Federico Monge y Olman Fuentes. Asimismo, se agradece a la empresa constructora que permitió el uso de uno de sus proyectos para validar la técnica con un caso real.

La industria de la construcción debe actualizarse tecnológicamente para satisfacer las necesidades del mercado actual.

Resumen ejecutivo

La finalidad de esta investigación fue crear una metodología que facilite y agilice la toma de datos, para determinar de manera cuantificable los avances de obra de construcción, mediante el uso de drones (con precios que oscilan entre 500 USD a 1000 USD), *software* comerciales para la fotogrametría digital automatizada y sistemas de información geográfica, de modo que sea asequible para pequeñas y medianas empresas constructoras.

El principal aporte de esta investigación consiste en hacer que el método sea sencillo económico y apto para el uso cotidiano de los Ingenieros en construcción en proyectos como edificios habitacionales, sin dejar de lado la seguridad.

Para alcanzar este propósito, se seleccionó el equipo y el *software* con base en criterios de calidad y precio. Se presentó una guía que explica la manera de toma de datos, procesamiento y productos fotogramétricos (ortomosaicos, modelos 3D, etc). Finalmente, se validó la técnica propuesta en la guía, mediante un caso real en el que se cuantificó el avance de una actividad.

En la consecución del primer objetivo se estudiaron los requerimientos mínimos con los que debía cumplir el dron y los *software* a utilizar. a continuación, se compararon algunas ofertas del mercado y se escogió una que se adaptara al presupuesto del proyecto (550 USD), pero que, al mismo tiempo, cumpliera con los requisitos mínimos establecidos.

Como resultado, se escogió un dron de la marca DJI, modelo Phantom 3 Standard (cuyo precio referencial es de 499 USD), equipado con una cámara de 12 Mpx. Este dron satisfacía los requerimientos mínimos para el uso en la investigación.

En cuanto al *software* de fotogrametría digital automatizada, se utilizó el Agisoft Photoscan Professional, el costo de la licencia permanente de este programa es de 3500 USD,

siendo (a la larga) más económico que otros *software* como Pix4D Mapper y DroneDeploy. Para el desarrollo de este proyecto se usó la versión de prueba de 30 días.

En relación con el segundo objetivo, se obtuvo como resultado una guía, en la cual se explica al lector de manera sencilla aspectos relevantes de la normativa nacional y la forma de ejecutar esta técnica en un ambiente de construcción; aunque se utiliza el equipo y *software* definidos en el primer objetivo, en el fondo, la técnica es adaptable a otras herramientas. Se consideraron 4 pasos principales, los cuales se profundizan en la guía:

- El planeamiento de la ruta de vuelo.
- La ejecución del vuelo, con un Phantom 3 Standard.
- El procesamiento fotogramétrico, mediante el uso de Agisoft Photoscan Professional.
- Usos de los productos obtenidos, como lo son los ortomosaicos y los modelos 3D.

Finalmente, se validó el método propuesto en la guía del punto 2. Para ello, se desarrolló el método en una construcción real (un edificio de parqueos), se escogió la actividad de colocación de encofrados para losas.

Como resultado se obtuvieron 2 ortomosaicos que representan la misma área de interés, la diferencia es que las fotografías con las cuales se formó cada uno tienen un espacio temporal de una semana. La resolución lograda en ellos fue de 2,8 cm/px.

Se notaron diferencias espaciales de hasta 5,6 m, lo cual era esperable, porque no se utilizaron puntos de control en tierra georreferenciados, sino que la información georreferencial se limitó al uso del GPS integrado al Phantom 3 Standard. La implicación fundamental de este procedimiento consiste en que los productos tienen errores espaciales, que,

si bien son relevantes en otras disciplinas, en este caso particular de uso no son tan importantes como para cuestionar la utilidad de la técnica. El criterio que realmente concierne a este método es la precisión geométrica, la cual se logra mayoritariamente gracias a la resolución de la cámara, que, como mínimo, requiere 12 Mpx, especificación que sí cumple el dron utilizado.

Para solventar los problemas de ubicación espacial y lograr que los dos ortomosaicos fueran superponibles entre sí, se utilizó una herramienta de Qgis llamada Georreferenciados GDAL, en ella se puede seleccionar uno de varios modelos matemáticos con los cuales se pueden transformar las coordenadas de un ráster. En este caso, se utilizó el modelo polinómico de primer orden por ser el que mejor se adaptaba a las necesidades de transformación, las cuales eran traslación, escalado y rotación.

Una vez que los puntos espaciales y geométricos en los ortomosaicos se volvieron equivalentes, se equipararon medidas tomadas en ambos ortomosaicos para ver qué tan alejadas de la realidad estaban y, también, cuán diferentes eran entre sí, los resultados indican precisiones de 1/1000 aproximadamente, equivalente a lo que se logra por medio del uso de cintas métricas, y muy superior a lo esperable de un odómetro o estimación de distancias realizadas con pasos.

Con base en estos resultados se procedió a medir el avance logrado en 1 semana en la actividad de colocación de encofrado de fondo para losas.

Como conclusión, se puede afirmar que la técnica es aplicable si se quiere estimar el avance de una actividad de construcción.

Además, se analizó el uso comunicacional, con base en productos como los modelos 3D de las texturas. Adicionalmente, se pudieron obtener estimaciones gruesas de curvas de nivel y volúmenes, estos casos no se validaron, son solo demostrativos.

Introducción

Los ingenieros a cargo de un proyecto de construcción deben tener una noción de lo que está sucediendo en la obra. Para ellos es necesario contar con un excelente sistema de control, sustentado en la información que se pueda recopilar de campo.

Recopilar información rápida *in situ* puede ser un trabajo tedioso y poco preciso, pues usualmente se recurre a instrumentos como cintas métricas, odómetros e, incluso, estimaciones mediante pasos. Por otro lado, obtener mayores precisiones de medición requiere tiempo y dinero, porque se hace necesario el uso de una cuadrilla formal de topografía o el uso de fotogrametría aérea clásica o satelital. En consecuencia, estas dos últimas opciones no se emplearían para evaluar el avance de una actividad en la construcción de un edificio de medianas dimensiones, pues sería sumamente costoso.

Gracias a las tecnologías actuales (como los *drones* equipados con cámaras digitales y algunos *software* de procesamiento fotogramétrico digital automatizado) es posible fotografiar un lugar y, a partir de las imágenes, crear modelos de los cuales se puede extraer información como distancias, áreas y volúmenes.

Estas tecnologías han ganado relevancia de uso en otras disciplinas como la geodesia, la cartografía y la topografía, pero resultan adaptables también a algunas necesidades del campo de la construcción sin necesidad de que los ingenieros a cargo del proyecto sean expertos en fotogrametría ni que la inversión por realizar resulte inalcanzable. Otros han incurrido en estas técnicas, pero sin darles el enfoque que se ofrece en este trabajo. A continuación, se reseñan los trabajos de algunos autores en este campo.

Neitzel y Klonowski (2011), en Suiza, utilizaron la técnica en la estimación de volúmenes en un relleno sanitario que cubre un área de 25 000m². Comparan varios *software* de procesamiento fotogramétrico con el mismo set de fotos, además comparan los resultados con un levantamiento topográfico donde se utiliza un RTK.

Concluyen que la técnica con drones y *software* de bajo costo es aplicable.

Pizón (2017), en Colombia, generó una guía de implementación de drones, haciendo énfasis en sus usos para la cartografía. En ella se habla de la historia de los drones, sus clasificaciones, la normativa que regula su uso y compara *software* de procesamiento fotogramétrico.

Vázquez y Backoff (2017) aplicaron la técnica a la gestión de infraestructura del transporte en México. Explicaron minuciosamente el *hardware* de los equipos computacionales que deberían ser utilizados para que el procesamiento sea rápido, debido a que, para la aplicación que proponen, las nubes de datos son enormes. Asimismo, comentan los tipos de drones existentes y utilizan el software Pix4D Mapper para generar un ejemplo del que extraen nubes de puntos georreferenciadas, curvas de nivel, ortomosaicos y modelos de elevación digital.

En España, Astorqui (2003) utilizó cámaras convencionales para generar levantamientos de planos de edificios (de fachada), y Muñoz-Narciso et al (2014) usaron la fotogrametría digital automatizada, apoyada en drones para generar modelos topográficos en un río de gravas altamente dinámico en un tramo de 13 km; utilizando puntos de control en tierra (tomados con un RTK), lograron errores espaciales menores a los 0,125 m en los 3 ejes. Otro estudio importante es el de Charfen (2015) donde se muestran las aplicaciones de los drones para el mundo de la arquitectura y la construcción.

Las investigaciones anteriores se desarrollan con puntos de control en tierra, además en su mayoría se llevan a cabo en áreas y trabajos grandes de infraestructura o movimientos de tierra, no se aplica la técnica para el control de avances de obras como edificios. El único que menciona este punto es Charfen (2015) pero no lo demuestra. Por otro lado, Astorqui (2003) aunque sí fotografía edificios, no utilizó

drones y el uso que le da es meramente arquitectónico.

El principal aporte de esta investigación consiste en hacer que el método sea sencillo económico y apto para el uso cotidiano de los Ingenieros en construcción en proyectos como edificios habitacionales, sin dejar de lado la seguridad.

El objetivo general de esta investigación pretende crear una metodología que facilite y agilice la toma de datos para determinar de manera cuantificable los avances de obra de construcción mediante el uso de drones económicos (con precios que pueden rondar entre 500 USD a 1000 USD) y *software* comerciales para la fotogrametría digital automatizada, de modo que la técnica sea asequible para pequeñas y medianas empresas constructoras.

Para alcanzar este propósito, se desarrollaron los siguientes objetivos:

- Definir el equipo y *software* requeridos para realizar las mediciones fotogramétricas. Para alcanzar esta estimación se analizaron requerimientos mínimos y los tipos de productos se ofrecen en el mercado.
- Generar una guía del método de toma de información y su procesamiento fotogramétrico. Se fundamenta en las experiencias del autor, recomendaciones de expertos en el uso de drones y fotogrametría y los manuales de uso de los equipos y *software*.
- Dar validez al método fotogramétrico mediante un caso real donde se cuantifique el avance de actividades específicas. Para lograrlo, se visitó una construcción en ejecución, se desarrolló lo propuesto en la guía y se compararon los resultados de precisión con las que teóricamente se obtendrían de instrumentos de uso común en la tarea como odómetros y cintas métricas.

La metodología aquí planteada representa un paso más hacia la tecnificación de la industria de la construcción, con la ventaja de que sea accesible a todos.

Marco teórico

El correcto control y monitoreo de las actividades de una obra de construcción es transcendental para la debida ejecución de la misma.

Los proyectos de construcción tienen que contar con un cronograma de ejecución, en el cual se estipula el costo de cada actividad y el plazo de estas. Todo bajo requerimientos establecidos en las especificaciones y planos.

Es obligación del gerente de obra saber si se está cumpliendo con lo estipulado para cada actividad; por ello, tiene que monitorear constantemente las actividades en proceso.

Si ocurriera algún atraso por ineficiencia, el gerente deberá tomar decisiones que influirán en el futuro desarrollo del proyecto.

Para tomar acciones, se debe tener una noción precisa de lo que está sucediendo en sitio. Esto hace necesario contar con un excelente sistema de control, sustentado en la información que se pueda recopilar de campo.

Recopilar información rápida en sitio puede ser un trabajo tedioso y poco preciso, pues usualmente se recurre a instrumentos como cintas métricas, odómetros, entre otros. Por otro lado, llegar a mayores precisiones requiere de tiempo o dinero, porque se hace necesario el uso de una cuadrilla formal de topografía o el uso de fotografías satelitales. En consecuencia, estas opciones son para contextos en los que son extremadamente necesarias altas precisiones de medición.

Gracias a las tecnologías actuales (como los drones equipados con cámaras digitales y algunos *software* de procesamiento fotogramétrico), el ingeniero constructor puede lograr medidas rápidas, económicas y suficientemente precisas, siendo utilizables para llevar un control del avance de obra. Además, ofrecen otra ventaja: mejorar la comunicación con el equipo de trabajo mediante material audiovisual.

Drones

En el mundo de los drones, existen diversas terminologías para clasificar y referirse a estos dispositivos. Pues la palabra dron es genérica o coloquial para referirnos a ellos, es un hecho que es el nombre utilizado por los medios, pero no por la literatura técnica.

Según Charfen (2015) 'dron' proviene palabra inglesa *dron* que significa 'zángano' (el macho de la abeja)" (p.11). El uso de esta palabra surge del sonido emitido por las hélices de los artefactos, similar al del insecto mencionado.

Clasificación según intervención humana en el vuelo

Los drones pueden clasificarse según su grado de intervención humana en su manejo:

- RPA, RPAS: acrónimos para Aeronave Remotamente Pilotada (en inglés *Remotely Piloted Aircraft*) y Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (en inglés *Remotely Piloted Aircraft System*), respectivamente. El primer término describe un aparato volador que se maneja desde tierra por medio de un control. El segundo, al contener la palabra sistema, incluye al piloto con el control en tierra y a la línea de comunicación entre la aeronave y el control.
- UAV, UAS: Vehículo Aéreo No Tripulado (en inglés *Unmanned Aerial Vehicle*) y Sistema Aéreo No Tripulado (en inglés *Unmanned Aerial System*), respectivamente. El primero es el artefacto volador, y el segundo incluye la comunicación y el control en tierra. La diferencia con los RPAS es, según Bañon et al. (2014), que los UAS son totalmente

autónomos, porque operan sin intervención humana durante sus misiones. Su uso principal es el militar, en operaciones de combate y reconocimiento. Sin embargo, ya se está incursionando en el uso civil de estos mecanismos.

Clasificación por peso

En Costa Rica, la Dirección General de Aviación Civil (DGAC, 2017. B) clasifica a los RPAS según su peso como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de RPAS según peso.

Clasificación	Peso
Micro RPAS	≤ 100 gramos
Pequeños RPAS	≤ 2 kg
Livianos RPAS	≤ 25 kg
Grandes RPAS	≤ 150 kg

Fuente: DGAC, 2017. B.

Charfen (2015) asegura que los RPAS menores a 2 kg son muy ágiles, pero también muy ligeros por lo que son susceptibles a movimientos causados por el viento.

Por otro lado, también indica que los RPAS Livianos son los adecuados para moverse en el entorno arquitectónico. Mientras que los RPAS grandes son de uso militar o de bomberos.



Figura 1. RPAS pequeño DJI Phantom 4 Pro (pesa 1388 g).
Fuente: DJI (2017. D).

Clasificación según sustentación de vuelo o motor

Asimismo, se pueden clasificar estas aeronaves según su generación de sustentación o motor en distintos tipos:

- Alas fijas: similares a los aviones.



Figura 2. Ala fija Sensefly eBee Plus.

Fuente: Sensefly (2017).

- Alas rotatorias: pueden ser cuadracópteros, hexacópteros o incluso octacópteros (el prefijo numérico se refiere a la cantidad de rotores con hélices con las que cuenta la plataforma de vuelo). En el caso de los cuadracópteros, Charfen (2015) indica: “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 necesaria para llevar el dron hacia arriba.” (p. 14)



Figura 3. Octacóptero de uso agrícola DJI AGRAS MG-1S.

Fuente: DJI (2017. A).

La ventaja que tienen las aeronaves de alas fijas es que son más eficientes (1-2 horas de vuelo, en comparación con los 20-30 minutos que logra un cuadricóptero pequeño), pueden alcanzar mayores velocidades (es decir que vuelan más lejos combinando ambas características), resultan perfectos para operaciones cartográficas de gran envergadura. Al mismo tiempo, producen menos ruido por lo que son ideales para misiones de vigilancia (Charfen 2015).

Ahora bien, para el caso de áreas pequeñas, como proyectos de construcción vertical, los drones de ala rotatoria se apegan más a las necesidades, porque tienen ventajas como la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente lo que reduce la necesidad de espacio, también poseen la capacidad de mantenerse estáticas en el aire y, del mismo modo, poseen mayor maniobrabilidad porque tienen el poder de moverse en 3 ejes en lugar de recorridos curvilíneos como los de ala fija.

Estas particularidades hacen que sean apropiados para realizar inspecciones de obra y para recopilar los datos de campo (mediante fotografías y videos) que ayudaran al gerente de proyecto en la toma de decisiones y en la creación de información de lo que existe *in situ*.

En ambos casos, estos dispositivos (de nivel semi-profesional y profesional) incluyen un sistema de navegación satelital incorporado.

Sistemas satelitales de navegación global

Los drones llevan a bordo aparatos GNSS (Global Navigation Satellite System), cuyo sistema más conocido es el GPS (Global Positioning System) de origen estadounidense, algunos equipos mezclan este sistema con el ruso GLONASS para lograr mejores precisiones espaciales.

Estos sistemas de posicionamiento permiten determinar las coordenadas geográficas del RPAS en el espacio. Una particularidad de las fotografías tomadas con los RPAS es que guardan metadatos, dentro de los cuales está la ubicación geográfica.

Fotogrametría

La fotogrametría según Buill, Amparo y Rodríguez (2003) "Es el conjunto de técnicas, instrumentales y matemáticas, que permite obtener coordenadas tridimensionales de un objeto, a partir de información bidimensional extraída de una o varias fotografías." (p. 7) Sin embargo, otros la definen como ciencia, en lugar de técnica:

Fotogrametría es la ciencia de medir por medio de fotografías, y levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía. También constituye la fotogrametría una eficaz ayuda en arqueología, arquitectura, astronomía, balística, criminología, geología, hidráulica, radiología y otras ciencias; pero su principal aplicación la constituyen los levantamientos fotogramétricos, fundados en el análisis matemático o gráfico de fotografías parcialmente superpuestas. (Davis, Foote y Kelly, 1972, p. 844)

En síntesis, la fotogrametría es una herramienta poderosa, con la cual se pueden realizar mediciones a partir de fotografías, al utilizar métodos matemáticos. Aunque, la mayor explotación de esta técnica ha sido en el ámbito topográfico, no excluye su uso en otras ramas, como puede ser la Ingeniería en Construcción.

Gracias a la potencia de las computadoras personales en la actualidad y a la aparición de *software* para tratamiento fotogramétrico asequible, el uso de esta técnica es una práctica que ahora puede ser manejada cotidianamente, debido a que en el pasado se reservaba para el campo de la topografía (Astorqui, 2003).

Fotogrametría aérea

Este método se ha utilizado por más de un siglo. "A partir de la primera guerra mundial la fotogrametría aérea ha reemplazado a la terrestre en casi todos los levantamientos; esta sustitución se ha debido a los progresos de la aviación a partir de entonces." (Davis, Foote y Kelly, 1972, p 864)

El levantamiento fotogramétrico aéreo consta de cuatro partes, según Davis, Foote y Kelly (1972): proyecto, fotografía, apoyo terrestre

y fotoplano. La primera constituye la piedra angular de todo el proceso, porque de ella depende el éxito o el fracaso del trabajo.

En la fase de proyecto se requiere de un estudio previo, se determina que exigencias tendrá el levantamiento, la finalidad con la que se hace, se debe investigar si existen datos útiles en estudios o planos anteriores, métodos a utilizar, entre otros.

Por otro lado, en la fotogrametría aérea clásica, se deben definir algunos parámetros previos al vuelo, como: la escala con la cual se iba a trabajar, la altura de vuelo a partir de esta y el número de pasadas. Una vez estimados, se procede a preparar el plan de vuelo y la ejecución del mismo, considerando los debidos controles terrestres.

El apoyo terrestre consiste en la ubicación de puntos de control que posteriormente servirán en el proceso de rectificación y para la realización de ajustes.

Finalmente, se preparan los planos por medio del método seleccionado. En la actualidad, muchos de estos métodos cayeron en desuso y otros simplemente han sido automatizados gracias a las tecnologías actuales.

Aspectos a considerar durante el planeamiento y ejecución del vuelo

Algunos aspectos relevantes a considerar durante la planeación y ejecución del vuelo, de acuerdo con Davis, Foote y Kelly (1972), son:

- Formular los planes de vuelo con los mapas más recientes.
- Lograr que las fotografías cubran estereoscópicamente toda la superficie que se trata de levantar. Es decir, que las fotos se solapen unas sobre otras y que se cubra todo el terreno de estudio.
- Situación y extensión de los apoyos existentes.
- Configuración del terreno.
- La cobertura o solape entre dos fotografías consecutivas en el sentido de vuelo debe estar comprendida entre 55 % y 65%.
- No deben tomarse fotografías aéreas cuando el sol está a menos de 3 horas del horizonte o cuando la altitud del mismo

sea menor a 30° en relación con el horizonte.

- La mejor época del año para realizar un levantamiento es cuando los árboles de hojas caducas pierden sus hojas (aplica para otras latitudes).
- Deben evitarse situaciones de neblina, vientos fuertes y otras condiciones meteorológicas locales adversas.

Aunque estos principios son para vuelos en aeroplanos con cámaras fotogramétricas especializadas con la finalidad de ejecutar trabajos cartográficos o topográficos a gran escala, también aplican para la utilización de drones con cámaras digitales convencionales con algunas variaciones como que el traslape recomendado por Agisoft (s. f. B), el cual oscila de 60 % a 80 %.

Según Astorqui (2003), de la resolución de la fotografía dependerá la precisión final del producto. La resolución depende del número de píxeles o puntos de imagen, una buena resolución está por encima de los 3 millones de píxeles. Sin embargo, Agisoft (s. f. B) recomienda el uso de cámaras de 5 Mpx, y para ortomapas de calidad profesional 12 Mpx. En la actualidad, es fácil encontrar cámaras de 12 megapíxeles o más con precios manejables.

Para adaptar la fotogrametría a las necesidades de una construcción vertical hay que considerar otros factores como los obstáculos, según Astorqui (2003) "Los árboles pueden ser el peor "enemigo" de esta técnica" (p. 39), pues estos impiden una correcta visualización de la fachada y, por tanto, generan espacios vacíos en la superficie que se requiere modelar.

Con una correcta toma fotográfica, se obtiene la información para rectificar las fotografías por medio de los modelos matemáticos.

Fotogrametría digital automatizada

La fotogrametría digital automatizada es una técnica con la que se pueden obtener mediciones indirectas, económica y rápidamente.

Gracias a la aparición de *software* de bajo costo, compatible con computadoras convencionales, se pone al alcance de todos, para aumentar así su competitividad ante técnicas

tradicionales (Souto-Vidal, Ortiz-Sanz, Gil-Docampo, 2015).

La fotogrametría digital automatizada (SfM por sus siglas en inglés, *Structure from Motion*) logra la restitución digital tridimensional de una superficie a partir de fotografías estereoscópicas. Esta técnica que se fundamenta en el uso de algoritmos para la caracterización espacial de puntos comunes en pares de fotografías. (Muñoz-Narcizo et al., 2014).

El proceso automático se basa en orientar y localizar las cámaras (ubicación del lugar desde donde se toman las fotografías), para con ello generar una nube de puntos (identificados con el método estereoscópico) para que describa la superficie, con la posibilidad de triangular y luego texturizar el modelo, lo cual es una ayuda visual con potencial de explotación.

La restitución estereoscópica se basa en la introducción de dos fotos (de dirección paralela) del mismo objeto en un aparato restituidor que permite visualizar estereoscópicamente dicho objeto en relieve, y que dispone de unos mecanismos para situar un índice sobre cualquier punto del objeto virtual, calculándose automáticamente su posición en el espacio. (Astorqui, 2003, p. 32)

Lo explicado anteriormente por Astorqui (2003) consiste en el método clásico de restitución estereoscópica. Con el SfM se hace automáticamente por medio de modelos matemáticos en un *software* y no con un aparato restituidor.

Según Westoby et al. (cómo se citó en Muñoz-Narcizo et al., 2014). "Respecto a la fotogrametría tradicional SfM no requiere datos de orientación ni ubicación 3D de las cámaras para la reconstrucción de la escena". Lo que implica una ventaja, debido a que los *software* automáticamente identifican, orientan y ubican las cámaras en el espacio, significando un gran ahorro de esfuerzo en la toma de datos y en su trabajo matemático.

El metadato de ubicación de las fotografías es especialmente útil para que los productos obtenidos estén georreferenciados.

Charfen (2015) indica que "la precisión de los GPS de abordó en los RPAS es de varios metros (incluso 10-20 m) por lo que las precisiones

de centímetros del trabajo final han de obtenerse mediante puntos de control en el terreno" (p. 31). Sin embargo, esta precisión de la que habla Charfen (2015) es espacial y no geométrica, según explica Piña (2017).

Precisión espacial se entiende como la precisión lograda al ubicar el punto en la superficie terrestre. Por otro lado, la precisión geométrica se refiere a la precisión lograda en la determinación de dimensiones de los elementos visualizados en los productos fotogramétricos.

Según Piña (2017), un grupo de fotos tomado en el mismo espacio temporal tiene que tener el mismo error en sus ubicaciones geográficas, siempre y cuando se haya utilizado el mismo set de satélites. Es decir, es un error sistemático en la ubicación y no afecta la geometría, esta última depende en mayor medida la calidad de la fotografía, la cual obedece directamente de la cámara con la que es tomada.

Finalmente, de esta técnica se obtienen una serie de productos como ortomosaicos, nubes de puntos y modelos de elevación digital.

Ortomosaico

Un ortomosaico es un producto de 2 dimensiones, que según Vázquez (2017) "resulta de integrar todas las fotos en un mosaico referenciado y corregido" (p. 63)

El término "corregido" hace referencia a la eliminación de la distorsión de la cámara, por lo cual se rectifican las imágenes y hace posible la extracción de información como distancias y áreas.

Nube de puntos

Las nubes de puntos son una constelación de puntos, donde cada uno tiene una ubicación coordenada en los 3 planos X, Y y Z.

Este es uno de los productos principales en 3 dimensiones de la fotogrametría digital, es la raíz de los modelos tridimensionales, de los modelos de elevación digital, etc.

Modelo de elevación digital

Charfen (2015) indica sobre los modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés, *Digital Elevation Model*) que representan, mediante una capa ráster, el relieve de la superficie tal y como se encuentra teniendo en cuenta las edificaciones, vegetación, etc. Se visualizan las elevaciones con colores.

Este modelo está georreferenciado por provenir de la nube de puntos

Tanto del modelo de elevación digital, como de la nube de puntos se pueden graficar curvas de nivel.

Georreferenciación y sistemas de coordenadas

“La georreferenciación es el uso de coordenadas de mapa para asignar una ubicación espacial a entidades cartográficas” (Esri, s. f. C, p. 1).

Las coordenadas brindan la capacidad de ubicar de manera precisa puntos en la superficie de la tierra o cerca de ella.

Esri (s. f. C) indica que la correcta ubicación y forma de las entidades requiere un marco para definir ubicaciones del mundo real. Un sistema son las coordenadas geográficas de latitud y longitud. Por otro lado, existen las coordenadas cartesianas o planas que surgen de la proyección del globo y describen una zona específica de la Tierra.

Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas son esféricas y se miden en ángulos desde el centro de la Tierra hasta un punto en su superficie (Esri, s. f. C).

Este método consiste en suponer que la Tierra es un esferoide (existen diversas aproximaciones de ella, como el esferoide de Clark 1866 y el WGS84 1984, este último es el utilizado por los sistemas GPS). Luego se traza una malla imaginaria sobre su superficie, cuyos elementos verticales son llamados meridianos y miden la longitud; mientras que, las horizontales son llamadas paralelos y miden la latitud.

La longitud mide ángulos en dirección este-oeste. Cotidianamente estas mediciones se

basan en el meridiano de Greenwich, el cual es una línea imaginaria que pasa por el poblado de Greenwich, Inglaterra, desde el Polo Norte, hasta el Polo Sur. Esta línea sirve de referencia, marcando el ángulo 0°.

Asimismo, el ecuador es aquel paralelo que marca los 0° de latitud. Se encuentra a una distancia equidistante de los polos.

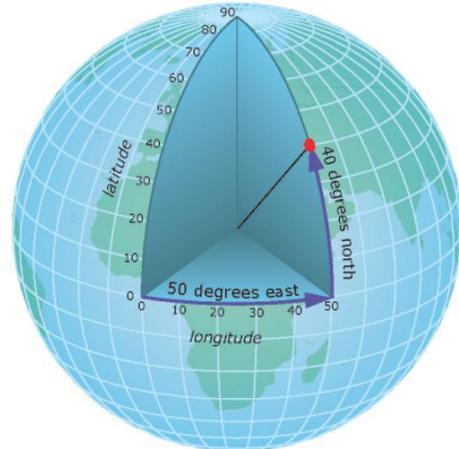


Figura 4. Ubicación de un punto con coordenadas esféricas, caso: 50° 00' 00" longitud y 40° 00' 00" de latitud.

Fuente: Esri (s. f. C).

Si bien la longitud y la latitud se pueden ubicar posiciones exactas de la superficie de la tierra, no proporcionan unidades de medición uniformes de longitud y distancia. Sólo a lo largo del ecuador la distancia que representa un grado de longitud se aproxima a la distancia que representa un grado de latitud. Esto se debe a que el ecuador es la única línea paralela que es tan extensa como el meridiano. (Los círculos con el mismo radio que la Tierra esférica se denominan círculos grandes. El ecuador y todos los meridianos conforman los círculos grandes). (Esri, s. f. C, p. 2)

Por tanto, la medida de 1° de longitud en el polo norte aproxima a los 0 metros mientras que “En el esferoide de Clarke 1866, un grado de longitud en el ecuador equivale a 111321 kilómetros” (Esri, s. f. C, p. 2).

Como los grados de longitud y latitud no aportan una longitud estándar, no se puede utilizar este método para medir distancias y áreas de forma precisa. En síntesis, se requiere transformar

la zona de estudio a un sistema más estable del cual se puedan obtener medidas más precisas.

WGS 84

El WGS84; por sus siglas en inglés, *World Geodetic System 1984*. “Es un sistema terrestre de referencia calculado por la NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*) dependiente del Departamento de Defensa (DoD) de Estados Unidos y utilizado por este para el posicionamiento GPS” (Sánchez, 2004, p. 40).

Sánchez (2004) indica algunos aspectos relevantes de este sistema, como:

- La orientación fue definida por el BIH (Bureau International de L'Heure) para la época de 1984.
- El origen es coincidente (± 2 m) con el centro de masas de la Tierra (Incluyendo océanos y la atmósfera).
- El eje Z es paralelo a la dirección del polo CIO (polo medio definido por el BIH para la época de 1984).
- El eje X es la intersección del meridiano de Greenwich con el plano del ecuador.
- El eje Y es ortogonal a los anteriores.
- El origen del sistema de referencia WGS84 sirve como centro geométrico para el elipsoide WGS84.
- El elipsoide de revolución gira sobre el eje Z.

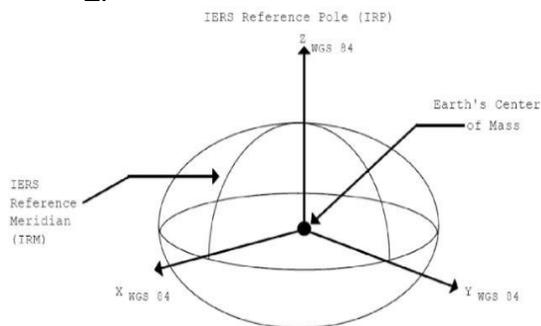


Figura 5. Descripción gráfica del elipsoide y del marco de referencia WGS 84.

Fuente: Sánchez (2004).

Este elipsoide se aprovecha como referencia para muchos de los sistemas de coordenadas proyectadas actuales.

Coordenadas proyectadas

En este caso, el sistema toma como base una superficie plana, con ello ofrece un modo de descripción de ubicación y geometría de las entidades.

El sistema tiene tres ejes ortogonales, cuya notación se expresa con las letras X, Y y Z. X y Y enmarcan el plano, siendo la primera la referencia este-oeste y la segunda la de norte-sur. Adicionalmente, la Z se refiere a la elevación sobre o bajo este (usualmente se mide como metros sobre el nivel del mar). La intersección de estos se llama origen.

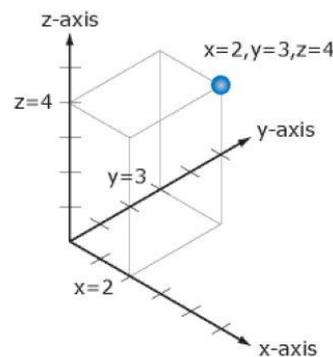


Figura 6. Ilustración del sistema de coordenadas cartesianas 3D. Caso: ubicación del punto (2, 3, 4).

Fuente: Esri (s. f. C)

El detalle de este método es que la Tierra no es plana, es esférica. Por lo cual, al aplastar o aplanar esta superficie se crean distorsiones, con las cuales se debe lidiar para poder medir debidamente sobre el plano. Este proceso se llama proyección (Esri, s. f. C).

Según el sistema de proyección (cilíndrico, plano o cónico) se generan distintas distorsiones. Dependiendo del uso que se le vaya a dar al mapa, se escogerá uno u otro para trabajar.

Las proyecciones cartográficas nunca representan con absoluta precisión la esfera terrestre. Como resultado del proceso de proyección, todos los mapas muestran distorsiones de la conformidad angular, la distancia y/o el área. Una proyección cartográfica puede combinar varias de estas distorsiones o puede resultar en un compromiso que distorsiona todas las propiedades de área, distancia y conformidad angular, dentro de un límite

aceptable. (Sutton, Dassau y Sutton, 2009, p. 2).

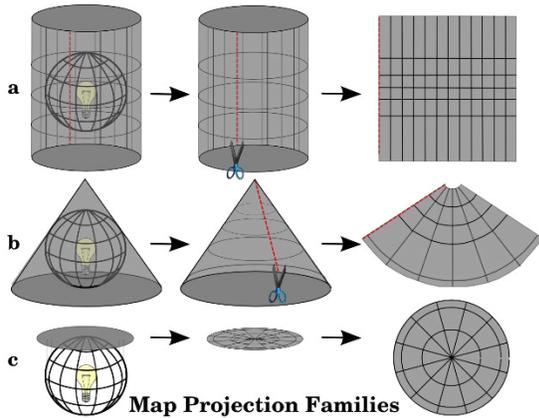


Figura 7. Tipos de sistemas de proyección: (a) proyección cilíndrica, (b) proyección cónica y (c) proyección plana. Fuente: Sutton, Dassau y Sutton (2009).

Otro dato importante de este método es el *datum*, el cual se constituye por una serie de puntos constantes en la superficie terrestre que están asociados al elipsoide de referencia.

En resumen, un sistema proyectado se define por su *datum*, el elipsoide de referencia y la forma de proyección del mapa. En Costa Rica, desde el 2007 se utiliza el sistema CRTM-05, por ley.

CRTM-05

En Costa Rica, por ley, desde junio de 2007, se utilizan las coordenadas proyectadas Costa Rica Transversal Mercator 2005 o CRTM-05.

Los parámetros oficiales son los siguientes:

Tabla 2. Parámetros oficiales de la cuadrícula CRTM-05.

Entidad	Nombre	Parámetros
Datum	WGS 84	
Proyección	Universal Transverso Mercator (UTM)	Meridiano central: -84°
		Factor de escala: 0,9999
		Falso este: 500.000,00
		Falso norte: 0,00

Fuente: La Gaceta, 2007 como se citó en Ortiz, 2009.

Sistemas de información geográfico

Un sistema de información geográfica (SIG) es un software que procesa grandes cantidades de información, usualmente con aspecto geográfico.

Permite la ejecución de análisis espaciales, transformación y proyección de coordenadas, cálculo de volúmenes y distancias, etc.

Con una aplicación SIG, se puede abrir mapas digitales en la computadora, crear nueva información espacial para añadir a un mapa, crear mapas impresos personalizados a las necesidades y trabajar análisis espacial. (Sutton, Dassau y Sutton, 2009).

La ventaja del SIG sobre el mapa común de papel es la capacidad de asociar información no geográfica a una ubicación geográfica, en grandes cantidades. Asimismo, permite que el usuario interactúe con ella.

Tipos de datos

Datos vectoriales

Un vector es un objeto espacial compuesto por uno o más vértices enlazados, con los cuales se describe una geometría. Cada vértice está ubicado en el sistema de coordenadas seleccionado.

Los vectores brindan la posibilidad al usuario de representar, mediante formas, elementos geográficos como árboles, mojones o postes (con puntos), ríos o carreteras (con líneas), y áreas urbanas, bosques o lagunas (con polígonos).

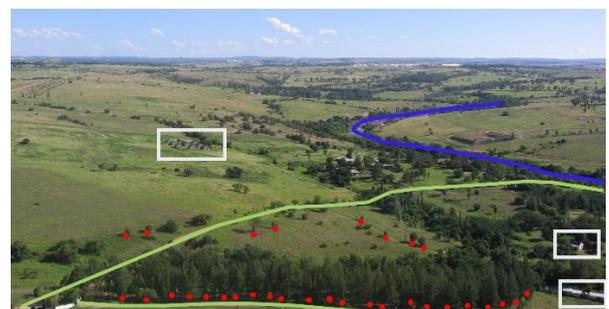


Figura 8. Entidades geográficas representadas con vectores. Fuente: Sutton, Dassau y Sutton (2009).

Datos Ráster

“En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura.” (Esri, s. f. A, p. 1).

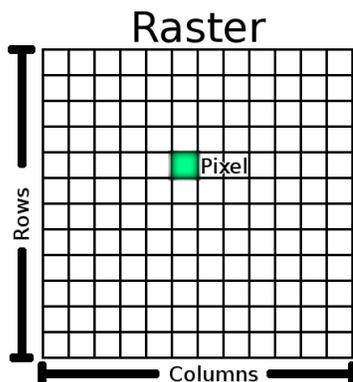


Figura 9. Desglose de un ráster: cuadrícula y píxeles.
Fuente: Sutton, Dassau y Sutton (2009).

Este tipo de datos sirve para representar aspectos geográficos como temperatura, densidad poblacional o elevaciones del terreno. Cada pixel guarda un valor que describe el fenómeno en ese punto.

Un aspecto importante de este tipo de información es la resolución. Esta puede ser espacial o temporal. El tamaño de los píxeles es el que determina su resolución espacial, mientras más pequeños son las celdas, mayor es la resolución, pero también la memoria física requerida para procesar la información, también hará que las figuras en el ráster sean más suavizadas y se aproximen más a la realidad.

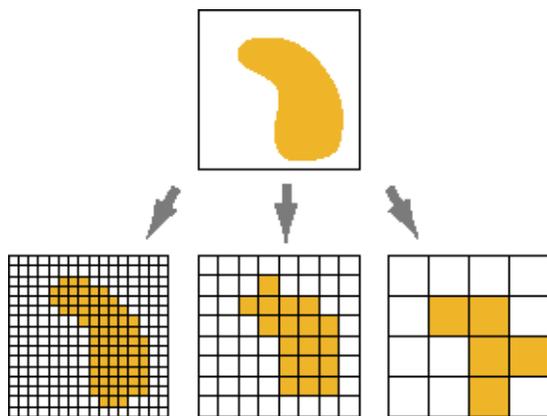


Figura 10. Desglose de un ráster: cuadrícula y píxeles.
Fuente: Sutton, Dassau y Sutton (2009).

Los rásteres son producto de fotografías aéreas o satelitales, usualmente cada fotografía captura la imagen del sitio en ese punto temporal, esta resolución se refiere a cada cuanto tiempo el área es levantada.

Con el paso del tiempo se notan cambios en las características del sitio, en consecuencia, un ráster levantado hace tiempo resulta inútil si se pretende visualizar lo que existe en el momento actual.

Modelos de georreferenciación

Los sets de datos de mapas escaneados, por lo general, no contienen información de referencia espacial. Por otro lado, los rásteres producto de fotografías aéreas y de imágenes de satélite, muchas veces cuentan con información espacial errónea y los datos no se alinean correctamente con otros datos que ya tiene.

Estos problemas espaciales pueden solucionarse mediante la georreferenciación del ráster, por medio de las herramientas que ofrecen sistemas de información geográfica. “La georreferenciación de datos de ráster permite visualizarlos, consultarlos y analizarlos con otros datos geográficos.” (Esri, s. f. A).

Alineación de rásteres

Existen varios métodos para que el ráster de origen se adecue al sistema de destino. Entre otros, existen:

1. Modelo lineal
2. Modelos polinómicos
3. Modelos *spline*
4. Modelos de ajuste
5. Modelos de proyección correctiva

Qgis (2014) describe los usos y limitaciones de los Modelos lineales de la siguiente manera “El algoritmo Lineal se utiliza para crear un archivo de referencia y es diferente de los otros algoritmos, ya que realmente no transforma el ráster. Este algoritmo probablemente no será suficiente si se trata de material escaneado”

Por otro lado, los modelos de transformación polinómica utilizan un polinomio basado en puntos de control y un algoritmo de

adecuación por mínimos cuadrados, según explica Esri (s. f. D). La finalidad de este modelo matemático, las cantidades de puntos de control y las implicaciones de utilizar un algoritmo u otro se explican a continuación:

El objetivo del algoritmo de adecuación por mínimos cuadrados es derivar una fórmula general que se pueda aplicar a todos los puntos, normalmente a costa de un ligero movimiento de las posiciones de los puntos de control. La cantidad de puntos de control no correlativos requerida para este método debe ser de 1 para un cambio de orden cero, 3 para un primer orden afín, 6 para un segundo orden y 10 para un tercer orden. Los polinomios del menor orden tienden a generar un error de tipo aleatorio, mientras que los polinomios de mayor orden tienden a generar un error de extrapolación. (Esri, s. f. D).

Los polinomios de orden cero se utilizan cuando los datos de origen están referenciados, pero tienen algún pequeño error de posición y por ello requieren ser alineados, en este caso, solo se utiliza un punto de control.

La transformación de primer orden “preserva la colinealidad y permite escalado, traslación y rotación solamente” (Qgis, 2014). Se requiere un mínimo de tres puntos de control vinculados para ejecutar esta transformación:

La presencia de más de tres vínculos introduce errores, o errores residuales, que se distribuyen por todos los vínculos. Sin embargo, debería agregar más de tres vínculos, porque si uno se coloca mal, tiene un impacto mucho mayor en la transformación. Así, aunque el error de transformación matemática pueda aumentar al crear más vínculos, la precisión general de la transformación también aumentará. (Esri, s. f.).

Por su parte, Qgis (2014) indica que cualquiera de los modelos “debe tener por lo menos cuatro puntos y cuantas más coordenadas pueda proporcionar mejor será el resultado.”

Son pocas las ocasiones en que se necesitan transformaciones de mayor orden. Este tipo de modelos requiere mayor número de puntos

de control y también mayor tiempo de procesamiento. Se utilizan “si se tiene que doblar o curvar el *dataset* ráster” (Esri, s. f. D).

Las transformaciones por *spline* tienen su uso cuando los puntos de control son prioritarios y se necesita que se registren de forma precisa. Como mínimo, este modelo requiere de 10 puntos de control (Esri, s. f. D).

La transformación de ajuste, toma base en un algoritmo que combina la transformación polinómica y técnicas de interpolación de red irregular de triángulos (TIN), este modelo optimiza el ajuste de mínimos cuadrados global y la precisión local. Este modelo necesita un mínimo de tres puntos de control, según indica Esri (s. f. D).

La transformación proyectiva encuentra su uso cuando es necesario georreferenciar imágenes oblicuas o mapas escaneados. Se requiere un mínimo de cuatro puntos de control. (Esri, s. f. D). Por otro lado, Qgis (2014) indica sobre esta transformación que “es una rotación lineal y traducción de coordenadas”.

Control de obra

Es vital durante la ejecución de un proyecto de construcción, el llevar un correcto control de los recursos en general, para ello es necesario, según Levy (2002), que se cuente con un sistema para vigilar todos los costos, en un proceso continuo para ver que la planificación de ejecución de las actividades se esté cumpliendo de la manera correcta.

Sobre la planificación, Pérez (2004) dice “(...) las actividades están programadas, así como la obra en general con un determinado costo, calidad y tiempo.” (p. 36). Sobre estas variables también dice: “(...) una va a depender de la otra, si se descuida una se verá reflejado en las demás” (p. 38).

El fin de controlar la obra es que se puedan identificar fallas en la ejecución de las actividades como el bajo rendimiento, la mala coordinación, faltas a las especificaciones y que se puedan tomar acciones rápidamente para evitar sobrecostos o atrasos.

Para lograr lo anterior, se requiere de un buen sistema de control, en el que la información de lo que sucede *in situ* es vital para que el director de proyecto sepa exactamente lo que sucede en

campo, lo que se está logrando contra lo que se tenía previsto (puede verse gráficamente en un diagrama de Gantt) y pueda analizar las posibles soluciones que implementará a los problemas detectados, y, si no se identificaron problemas, igualmente se puede optimizar el rendimiento, siendo beneficioso para la empresa, incluso, cabe la posibilidad de que se obtengan bonos por cumplimiento anticipado.

En fin, existen diversas técnicas para lograr tener control de la ejecución.

Técnicas para el control

Las técnicas de control de avance de actividades que propone Pérez (2004) son:

- Control reactivo
- Control proactivo
- Control físico y financiero

Las dos primeras pueden agruparse como meros controles de avance de actividades, mientras que la última incluye la parte financiera, la cual debe incluir en sí misma el control del recurso humano y de los materiales.

Levy (2002) coincide con Pérez (2004) en cuanto al control físico-financiero y su relación estrecha con los materiales y la mano de obra, pero, además, incluye a los subcontratistas.

Control reactivo

Esta técnica se basa en los siguientes criterios, según Pérez (2004):

- Establecimiento de metas.
- Ejecución de las actividades.
- Recolección de información de avance.
- Comparación del avance con las metas establecidas.
- Implementación de correcciones y/o acciones preventivas.

Del último, las acciones serían: la introducción de más recursos, el cambio del personal ineficiente o del proceso constructivo, lo cual implicaría la reprogramación de las actividades para tratar de enderezar el camino del programa sobre la ruta crítica.

La información es el principal recurso de esta técnica, se debe tener registro de lo que se ha hecho y de lo que se está haciendo en campo. Una mala información puede llevar a tomar malas decisiones y empeorar aún más el retraso.

Una buena manera de llevar registro de esto es mediante fotografías, reportes, etc.

Control proactivo

“Consiste en controlar las metas establecidas independientemente con un grado de aceptación en su caso.” (Pérez, 2004, p. 46)

Es más sutil que el control reactivo porque, cuando se detectan problemas, se van haciendo ajustes de manera que no puedan crear más problemas. Se aplica antes de que la actividad sea realizada y va en relación al trabajo y la productividad.

Control físico y financiero

En este caso, además de controlar el avance físico de las actividades hay que considerar también el aspecto financiero, debido a que se cuenta con un presupuesto y este debe ser respetado en medida de lo posible, incluso, buscando ahorros para mejorar la utilidad. Por eso es importante controlar los recursos. Al respecto, Pérez (2004) refiere técnicas como:

- Una relación por cantidades, por ejemplo: metros cúbicos de concreto, toneladas de acero, etc., y cuánto está destinado para ello.
- Un corte cada determinado tiempo en donde se muestre la cantidad de trabajo para ese periodo y cuánto dinero se necesita para su ejecución. Levy (2002) indica que para subcontratistas debe ser mensual, mientras que para la mano de obra de planilla ha de ser semanal; por otro lado, Pérez (2004) explica que no debe ser mayor a 3 semanas.
- Una relación de insumos, estableciendo la cantidad exacta y el precio al que será adquirido el material, así como el personal requerido para la elaboración del proyecto. Levy (2002) coincide también, recomienda el uso de informes de

materiales y mano de obra para la determinación de precios unitarios reales.

Además, con el fin de mantener un correcto control físico-financiero, ha de llevarse un buen control de materiales y recursos humanos.

Control de materiales y recursos humanos

Con base en los aspectos de control mencionados en el punto anterior, dentro de la integración del precio unitario, el gerente debe saber qué cantidad de material y mano de obra se requerirá para la actividad.

La idea es que los miembros del equipo de trabajo aprovechen al máximo los materiales para sacarles la máxima utilidad. Entre las técnicas de control de recursos materiales destacan (Pérez, 2004):

- Registro de entrada del material indicando la cantidad y el tipo de material.
- Buen almacenaje, recomendado por el proveedor.
- Inventario de todos los materiales que se encuentran en bodega.
- Programa de utilización de cada uno de ellos.
- Registro de salidas, así como el destino o actividad a realizar.
- Adecuada elaboración de materiales; si fuera este el caso, en una adecuada proporción de material, un caso específico es la elaboración de concreto en sitio.

Las técnicas anteriormente expuestas son particularmente difíciles cuando se trata de agregados, pues corresponde a materiales normalmente expuestos a la intemperie, que reaccionan con el agua y se abultan, asimismo normalmente están en apilamientos, los cuales son ubicados con aproximaciones en campo, en caso de que no cuente con un topógrafo.

Para el control del recurso humano, Pérez (2004), expone lo siguiente:

- La correcta y oportuna intervención del personal que labora en el proyecto.
- Adecuado rendimiento de trabajo.
- Calidad en el trabajo.

- Revisar si lo que se está haciendo es lo requerido.
- Confiabilidad de la información.

La calidad de la mano de obra, su seguridad y buen ambiente son puntos importantes que deben controlarse también, debido a que con ello se logra un mayor desempeño, aumentando la productividad de las cuadrillas del proyecto y con ello la eficiencia y eficacia.

Técnicas para el monitoreo

El monitoreo tiene su fundamentación en la medida del progreso de cada una de las actividades. Cabe aclarar que el monitoreo de actividades es parte complementaria del control de actividades según Pérez (2004).

El principal recurso para el monitoreo de las actividades consiste en la información de lo que sucede *in situ*. Por lo tanto, estas técnicas se utilizan solo para el momento presente y la toma de decisiones a corto plazo, debe ser información representativa de todo el proyecto y fresca, es decir, no debe ser información que tenga mucho tiempo haber sido levantada pero no procesada, porque "la ejecución de cualquier obra es un proceso vivo y como tal requiere de un seguimiento continuo." (Campo, 2015, p. 149)

El gerente de proyecto y su equipo de trabajo se valen de diferentes técnicas para recolectar la información de campo y su posterior procesamiento con el fin de emplearla en la toma de decisiones; entre estas técnicas, se destacan:

- Reporte de actividades realizadas, en cuanto duración, materiales y mano de obra (con ello se puede sacar el costo unitario, y la productividad de la cuadrilla).
- Representación gráfica del avance de proyecto, puede ser desglosado en actividades, se utilizan cuadros, diagramas de Gantt u otros. Con ello es más fácil visualizar la situación del proyecto.
- Uso de memorias, bitácoras e informes de campo.
- Manejo de tecnologías tales como videos, fotografías, etc. Una herramienta sumamente útil porque captura en un

instante de tiempo determinado lo que ocurre.

El gerente seleccionará las técnicas que considere se adapten a su modo de trabajo y que le resulten eficientes. Cabe destacar que las mencionadas no son las únicas posibilidades y que el uso de los drones abre un mundo de posibilidades poco explorado en el ámbito del control y monitoreo de obras civiles.

Aplicaciones de la técnica al mundo de la Ingeniería Civil

En las construcciones, tal como se expone en el punto anterior, hay una continua necesidad de información de lo que existe *in situ*, con la limitante de que debe ser obtenida de manera rápida, económica y con una precisión aceptable para la estimación del avance de actividades.

Para obtener esta información, Campo (2015) afirma que en el pasado se empleaban las técnicas de topografía o fotogrametría clásica, tienen la ventaja de ser muy precisas, pero implican un alto costo y tiempo de procesamiento.

Asimismo, indica que la topografía clásica tiene un problema y es que sus datos discretos. La fotogrametría clásica y las imágenes satelitales solucionan el problema porque sus datos son continuos, pero multiplican el costo y por ende poco se utilizan en áreas pequeñas como puede serlo la construcción de un edificio.

Esto hace común que en las construcciones se asigne la medición/estimación de los avances a alguna persona, lo cual puede ser un proceso laborioso y peligroso si no se tienen las herramientas adecuadas. Además, puede resultar poco preciso, pues se utilizan estimaciones basadas en la experiencia, descomposiciones geométricas para aproximar la medida de algún volumen o área, y las herramientas de trabajo suelen ser cintas métricas, odómetros, etc. Aunque, ya se están utilizando instrumentos de mayor tecnología como los distanciómetros láser.

Campo (2015) indica que es posible utilizar RPAS y fotogrametría digital automatizada para el monitoreo de algunas actividades, y con ello facilitar el control de las mismas. El uso de

drones tiene ventajas sobre los métodos tradicionales y características que los hacen compatibles con la tarea de inspección, como:

- Bajo costo.
- Posibilidad de gestión interna.
- Operador único.
- Rapidez en el levantamiento
- Procesamiento de las imágenes
- Datos continuos referidos al mismo espacio temporal.
- Posibilidad de repetir la ruta.

La posibilidad de que los ingenieros constructores tengan una herramienta tecnológica que posibilitaría la recopilación de información en zonas de difícil acceso y/o alta peligrosidad sin exponerse (lo cual permitiría aumentar los estándares de seguridad laboral) y, además, de la oportunidad de crear material visual que será útil en las interacciones con clientes y el equipo de trabajo. Este tipo de información favorecería la comunicación, lo cual implica beneficios para el proyecto; además permite dejar más clara la situación actual del proyecto para el gerente de obra.

Marco metodológico

La metodología que se siguió para la ejecución de este proyecto se detalla a continuación.

Para definir el equipo y *software* requerido para realizar las mediciones fotogramétricas, se llevó a cabo la selección del *software* de procesamiento fotogramétrico de la siguiente manera:

- Se identificaron los aspectos que se deben considerar a la hora de seleccionar las características técnicas con las que debe cumplir el RPAS/UAS a utilizar.
- Se compararon las características técnicas y el precio de los diferentes equipos, mediante el uso de cuadros.
- Se seleccionó un dron capaz de cubrir las necesidades del estudio, tanto técnicas como presupuestarias.
- Se seleccionó también el *software* de planificación y manejo (que es parte del sistema RPAS/UAS).

Posteriormente, se procedió con la escogencia del *software* de procesamiento fotogramétrico, siguiendo los siguientes pasos:

- Se identificaron los *software* de procesamiento fotogramétrico de mayor uso en la actualidad.
- Apoyándose en entrevistas a expertos y en la consulta de trabajos investigativos anteriores de otros autores, se compararon los programas mediante el uso de cuadros.
- Se seleccionó un *software* de procesamiento fotogramétrico que pudiera cubrir las necesidades y cuyo precio se adaptó al presupuesto del proyecto.

También se seleccionaron otros *software* que sirvieron de apoyo en el postproceso, para darle uso a los resultados fotogramétricos.

Ahora bien, para generar una guía ejemplificada del método de toma de datos y su procesamiento fotogramétrico, con base en la

literatura consultada, en entrevistas a expertos y además en la experiencia propia del autor. Se procedió con la siguiente estrategia:

- Se explican paso a paso las cuatro etapas del método: planificación, ejecución, procesado de imágenes y productos.
- Se resumen algunas técnicas para la correcta toma de datos, desde el planeamiento de vuelo y el pilotaje de la aeronave, hasta el traslape que deben tener las fotografías y las horas del día en las que son recomendables los vuelos, entre otros. Sin dejar de lado la normativa.
- Se sintetizan las buenas prácticas que deben realizarse a la hora de procesar los datos.
- Se explican los usos que tienen los productos obtenidos.

Por último y con el fin aplicar el método propuesto en la guía, se desarrolló un caso real donde se estimó el avance de actividades específicas:

- Se hizo una visita al sitio para reconocimiento. Se identificaron riesgos y escogió una zona de despegue/aterrizaje.
- Se seleccionó una actividad para monitoreo.
- Se planificaron rutas de vuelo seguras y con las cuales se pudieran tomar los datos necesarios.
- Se ejecutaron los planes de vuelo en dos ocasiones, con el fin de tener un set de datos referencial y uno de avance.
- Se procesaron las fotografías según la guía. Se generaron 2 ortomosaicos, uno para cada fecha. Se toma el primero como base y el segundo se transformó mediante un modelo polinómico de primer grado para eliminar la imprecisión producto del GPS.

- Se validó la precisión de las mediciones en los modelos, se tomaron 30 medidas para tener una diferencia mínima observable del 30 % y un 95 % de confianza (Lozano-Rivas, 2011). Posteriormente, se calculó para cada ortomosaico el error absoluto de la magnitud asociado a la medida de la longitud de paneles de 2,44 de longitud. Según indican Kowalski (s. f.) y Gutiérrez (2011) con ello se calcula la precisión y el error relativo.
- Se compara la precisión lograda en cada ortomosaico contra las precisiones teóricas que se pueden obtener de mediciones realizadas con pasos, odómetros y con cinta métrica. Según Gutiérrez (2011) estas son respectivamente:
 - 1/50 a 1/200
 - 1/200
 - 1/1000
- Se calculó el coeficiente de correlación entre los sets de datos, para determinar si efectivamente los dos ortomosaicos están alineados.
- Se comparó el avance real con el planificado.
- Se modelaron en 3 dimensiones los datos encontrado en campo con el fin de que se utilizaran como herramienta para mejorar la comunicación entre los involucrados del proyecto.
- Se analizó en que otras actividades puede utilizarse el método propuesto y cuáles ventajas y desventajas conlleva. Se presentan curvas de nivel y cálculos de volúmenes, demostrativamente debido a que no fueron validados.

El equipo utilizado para la ejecución de este caso fue:

- RPA/UAV: DJI Phantom 3 Standard.
- Teléfono inteligente: Samsung J7 Prime.
- Computadora personal: Toshiba Satellite p55-b5181SM.



Figura 11. DJI Phantom 3 Standard

Fuente: DJI (2015).

Los *software* utilizados fueron:

- App para vuelo manual: DJI GO.
- App para planeamiento de vuelo y ejecución de vuelo: Pix4D Capture.
- *Software* para fotogrametría digital automatizada: Agisoft Photoscan.
- Visor de imágenes de satélite: Google Earth Pro.
- Sistema de posicionamiento geográfico: QGIS.



Figura 12. Aplicaciones para el manejo del dron. A la izquierda DJI GO y a la derecha Pix4Dcapture.

Fuente: El autor.

Para el caso, se tuvo acceso a un proyecto de construcción que cuenta con dos edificios de veinte pisos habitacionales, dos edificios de parqueo de 3 pisos cada uno y un centro comercial. En total son 27 950 m² de construcción en un lote de 17 528,47 m².

Se seleccionó el edificio de parqueos de la primera fase para la realización del estudio.

En el momento de la primera visita los ingenieros estimaron un 18 % de avance del proyecto global. Se estimaba un 60 % del avance general del edificio de parqueos estudiado. El proyecto está ubicado en Costa Rica. Por motivos de confidencialidad no se expondrá el nombre del mismo, ni el de la empresa constructora.

Resultados

A continuación, se plasman las consideraciones tomadas a la hora de seleccionar la plataforma de vuelo y la cámara. Seguidamente se explica la selección de los *software* a utilizar para el proceso de las imágenes y para el manejo de la información producto de esto.

Consecutivamente y como producto de la fase anterior, se muestra una guía en la que se resumen los aspectos básicos a considerar a la hora de aplicar esta técnica: desde planear el vuelo, hasta el procesado de las imágenes.

Finalmente, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la técnica en un caso real de control de obra.

Selección de equipos y *software*

RPAS/UAS

Las características que deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar un RPAS/UAS van en función de la actividad que se realizara con ellos, de la ubicación del proyecto y del tipo de información que se quiera extraer del sitio.

En los cuadros 1 y 2 se exponen las características mínimas que debe tener la aeronave para cumplir con el trabajo. Estas se categorizaron para comparar las diferentes aeronaves en el cuadro 3.

Cuadro 1. Consideraciones por el lugar de trabajo (obras verticales), categorización y mínimos de las características de la aeronave

Consideraciones	Características mínimas del RPAS/UAS	Categorización de características técnicas
Área reducida de despegue	Despegue vertical (Ala rotatoria)	Tipo de aeronave
Área con personal trabajando	Debe ser una aeronave segura para evitar accidentes	Modo de vuelo seguro
	Debe ser pequeño, para reducir daños en caso de accidente	Peso
Obstáculos en el área, por ejemplo grúas y otros edificios	Capacidad de volar manualmente en los 3 ejes para evitar obstáculos (Ala rotatoria)	Tipo de aeronave
	Capacidad programar una altura fija (0-120 m sobre el terreno) para volar sobre o bajo los obstáculos	Distancia de transmisión
	Sensor de detección de obstáculos/ protección de helices (Opcional)	Asistente de vuelo automático Sensor de detección de obstáculos
Área de estudio pequeñas, menores a 1 km ²	No requiere de gran distancia de transmisión. 1 kilómetro es suficiente	Distancia de transmisión
	No requiere de gran duración de vuelo. Alrededor de 30 minutos es suficiente	Tiempo de vuelo

Fuente: El autor.

Cuadro 2. Consideraciones por la actividad a realizar (toma de datos de campo), categorización y mínimos de las características de la aeronave

Consideraciones	Características mínimas del RPAS/UAS	Categorización de características técnicas
Monitoreo de avances	Capacidad de definir una ruta de vuelo	Asistente de vuelo automático
	Capacidad de repetir la ruta de vuelo	Asistente de vuelo automático
	Capacidad de definición de traslape	Asistente de vuelo automático
Ubicación de las cámaras	Capacidad de programar el vuelo	Asistente de vuelo automático
	GPS o algún otro sistema de localización	Sistema de localización en directo
Sitios que requieren mayor detalle	Capacidad de acceder a estos lugares y mantenerse en posición	Vuelo manual Vuelo estacionario
Fotografías de alta resolución	Aeronave estable para que no salgan movidas o borrosas las fotografías (Ala rotatoria)	Vuelo estacionario
	Cámara digital de 12Mpx de resolución	Resolución de la cámara

Fuente: El autor.

Cuadro 3. Comparación de precios y especificaciones técnicas de *drones* comerciales

Marca	Modelo	Tipo de aeronave	Sistema de localización en directo	Vuelo estacionario	Asistente de vuelo automático	Vuelo seguro	Detector de Obstáculos	Tiempo de vuelo (mins)	Peso (g)	Distancia máxima de transmisión	Resolución de la cámara	Precio de referencia comercial
Parrot	Bebop	Cuadricóptero	GPS	Sí	Sí	Sí	No	12	420	250m	14 Mpx	\$230
DJI	Phantom 3 Standard	Cuadricóptero	GPS	Sí	Sí	Sí	No	25	1216	1000m (altura de 120m)	12 Mpx	\$499
Parrot	Bebop 2	Cuadricóptero	GPS	Sí	Sí	Sí	No	25	500	300m	14 Mpx	\$586
DJI	Phantom 3 SE	Cuadricóptero	GPS/ GLONASS	Sí	Sí	Sí	No	25	1236	4000m (altura de 120m)	12 Mpx	\$599
DJI	Spark	Cuadricóptero	GPS/ GLONASS	Sí	Sí	Sí	Sí	16	300	2000m	12 Mpx	\$699
Walkera	Vitus	Cuadricóptero	GPS/ GLONASS	Sí	Sí	Sí	Sí	25	890	1500m	12 Mpx	\$799
Parrot	Disco	Ala fija	GPS/ GLONASS	No	Sí	Sí	No	45	750	3000m	14 Mpx	\$875
DJI	Phantom 4 Advance	Cuadricóptero	GPS/ GLONASS	Sí	Sí	Sí	Sí	30	1368	7000m (altura de 120m)	20 Mpx	\$1,199

Fuente: El autor.

El presupuesto con el que contó esta investigación para la compra del RPAS/UAS fue de 550 USD. Finalmente, se seleccionó el DJI Phantom 3 Standard como herramienta de trabajo.

DJI GO es la aplicación de manejo que recomienda el fabricante. Se utilizó para pilotar manualmente el equipo y tomar fotografías de elementos que requirieron mayor detalle.

Sin embargo, para convertir la plataforma de vuelo en un UAS, se seleccionó otra aplicación que permite programar una ruta de vuelo y asignar parámetros a la toma de las fotografías como el ángulo de la cara y el traslape de las fotografías. La aplicación se llama Pix4D Capture, es gratuita y totalmente compatible con el Phantom 3 Standard.

Software de fotogrametría digital automatizada

Considerando que los datos de entrada serán solo fotografías (cuyos metadatos incluyen coordenadas geográficas), las características que deben considerarse a la hora de escoger un *software* de fotogrametría digital automatizada son las siguientes:

- Debe ser amigable con el usuario.
- Debe tener la capacidad de crear:
 - Nubes de puntos
 - Ortomosaicos
 - Modelos 3D
 - Modelos de elevación digital
 - Curvas de nivel (Todas las anteriores deben ir georreferencias)
- En el programa debe ser posible obtener medidas como distancias, áreas y volúmenes.
- La cantidad de modelos que se pueden crear debe ser ilimitada.
- Debe poder crear reportes de calidad.

Se compararon las características de 3 *software*, DroneDeploy, Pix4D Mapper y Agisoft Photoscan.

En sus versiones profesionales, los 3 se comportan de forma similar y cumplen con todas las características requeridas. Sin embargo, en las

consultas realizadas a Monge (2017), este indicó que Agisoft era su programa de cabecera.

Asimismo, Piña (2017) expresó que Pix4D Mapper es el mejor para agricultura, pero que si lo que se quería era una mejor calidad de texturizado, no había como el Agisoft Photoscan. Aunque, cualquiera de los 3 programas puede cumplir con las funciones requeridas para esta investigación.

Partiendo de que los 3 tienen las capacidades necesarias para estas solicitudes cumplir los requisitos antes enunciados, se debe tomar en cuenta ahora la cuestión de precio.

El Agisoft Photoscan Professional en su licencia *Stand Alone* cuesta 3500 USD y es permanente, en contraste con el DroneDeploy en su versión *Business* que cuesta 3000 USD anuales y el Pix4D Mapper que cuesta 3500 USD anuales u 8700 USD para la licencia permanente.

Cabe destacar que el DroneDeploy tiene licencias mensuales que cuestan 299 USD, al igual que el Pix4D Mapper cuyo precio es de 350 USD por mes, esta modalidad aún no existe para el Agisoft Photoscan.

Por otro lado, Agisoft ofrece una licencia Standard más económica, pero en ella los productos no se pueden georreferenciar, además no permite hacer mediciones sobre los modelos, ni crear reportes de calidad.

Finalmente, se seleccionó el Agisoft Photoscan Professional para la elaboración de este proyecto se utilizó la licencia de prueba gratuita de 1 mes.

Guía para la toma y procesamiento de datos

El objetivo de esta guía es brindar una herramienta al Ingeniero en Construcción, Ingeniero Civil o Arquitecto a cargo de una obra de construcción; con la cual se puede obtener información métrica de manera segura, rápida y que sea suficientemente precisa como para que sea útil en la labor del día a día, sobretodo, en el monitoreo de avance de actividades.

Además, se obtienen productos con otras aplicaciones como modelos tridimensionales y fotografías que sirven como herramientas visuales que mejoran la comunicación con clientes, consultores y personal de campo.

Por tanto, la precisión geoespacial en este caso cae en un segundo plano, dejándole el papel central a la precisión geométrica de las superficies levantadas. Es así que, en este proceso, se omiten los puntos de control en tierra, los cuales son vitales en otras disciplinas como la topografía, la cartografía y la geodesia.

La guía también puede ser de interés para cualquier entusiasta de los drones que quiera obtener información fotogramétrica o modelos tridimensionales a partir de sus fotografías, etc.

Esta técnica se basa en dos herramientas primordiales: un RPAS/UAS equipado con una cámara digital para recopilar los datos de campo mediante fotografía (Un DJI Phantom 3 Standard en este caso con las apps DJI GO y Pix4D Capture para el pilotaje) y un compendio de *software* para la transformación de esos datos en información métrica y visual (Agisoft Photoscan Professional, Google Earth, Qgis).

Ahora bien, es necesario que el usuario de la guía esté familiarizado con la normativa que regule el uso de los RPAS en su país, en el caso de Costa Rica, desde el 2017 rige la Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS (Ver Anexos).

Algunos aspectos importantes a considerar de esta directiva son:

- Las empresas o personas que ejecuten actividades comerciales con drones deben contar con un certificado de explotación y el piloto debe estar acreditado por la Dirección General de Aviación Civil (DGAC).

- Las operaciones no comerciales deben cumplir con requisitos como:
 - No volar sobre aglomeraciones de personas.
 - No volar a más de 120 m de altura o más de 500 m del operador.
 - Volar solo de día y con condiciones meteorológicas adecuadas.
 - Respetar las áreas restringidas como los aeropuertos (radio de 8 km).
 - No pilotar cerca de otro RPA/UAV.

Teniendo en cuenta las regulaciones del uso de los RPA/UAV, se explica de modo conceptual el proceso para la obtención de información fotogramétrica en la figura 13.

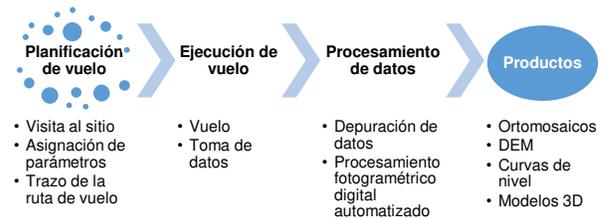


Figura 13. Proceso para la obtención de información fotogramétrica.

Fuente: El autor.

Planificación de vuelo

Primeramente, debe visitarse el sitio de trabajo para identificar los siguientes elementos (se recomienda fotografiar cada uno, para dejar registro y poder usar posteriormente las imágenes como referencia en la oficina):

- Área de interés: espacio del cual se quiere obtener información y sobre el cual volará el RPA/UAV.
- Área de despegue/aterrizaje: terreno plano y despejado del cual despegará la plataforma de vuelo y en la cual puede aterrizar. Según las recomendaciones de Pix4D (s. f. A), debe ser un área despejada de 10 x 10 metros para que el equipo capte fácilmente la señal GPS. El UAV, en ocasiones aterrizará de 1 a 5 metros o, incluso, más del sitio de despegue a causa de inexactitudes o

interferencias del GPS, por lo cual es vital que el sitio esté despejado. En caso de no existir tanto espacio libre, es vital que el piloto sepa aterrizar manualmente.



Figura 14. Área de despegue, se escoge una losa pretensada estibada cerca del área de estudio, la razón es que ofrece una superficie estable y plana desde la cual despegar.

Fuente: El autor.

- Ubicación del controlador en tierra: es la ubicación en la cual estará el controlador del vuelo, esta debe ser una zona segura y donde pueda observarse la aeronave en todo momento.
- Detección de objetos metálicos: es importante al momento de seleccionar las áreas de despegue y control el evitar estar cerca de objetos metálicos, debido a que estos generan interferencias electromagnéticas que pueden afectar la comunicación entre el control y el dron.
- Escogencia de puntos de control: si las imágenes se van a utilizar para llevar un avance de obra, es necesario ubicar en el sitio al menos 3 puntos de control que no vayan a ser movidos y que salgan en las fotografías para poder utilizarlos después como referencias. Estos puntos pueden ser mojones, la esquina de un edificio, una roca grande, etc. Es beneficioso que estén georreferenciados con equipos topográficos de alta precisión; no obstante, esto es opcional dependiendo del producto que se quiera obtener



Figura 15. Ubicación de control en tierra, cercano al área de despegue/aterrizaje y con vista al sitio de estudio. Sin obstáculos ni objetos metálicos cercanos.

Fuente: El autor.

- Identificación de obstáculos: entre estos se pueden contar grúas, andamios, estructuras existentes, etc. Se puede realizar un vuelo manual para estimar las alturas a las cuales se encuentran, a fin de que, cuando se asigne la altura de vuelo, se pueda ejecutar sin problemas. Sobre todo, este paso es relevante si la aeronave no cuenta con detectores de obstáculos.



Figura 16. Obstáculos en la zona de estudio, dos grúas con diferente elevación.

Fuente: El autor.

- Determinar si existen elementos de interés: en ocasiones, existen áreas o elementos en específico de los cuales se quiere tener un mayor detalle.

Seguidamente se procede con la planificación de la ruta de vuelo en oficina, para lo cual se hará uso del *software* Google Earth y de la aplicación móvil Pix4D Capture:

- Delimitación de la zona de estudio: con Google Earth se traza un polígono sobre la zona de estudio que aproxime el área que se quiere levantar, también es válido marcar obstáculos. Se exporta el resultado como un archivo .kml.



Figura 17. Delimitación del área de estudio (ladera) en Google Earth.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Google Earth.

- Cargar el archivo .kml al Pix4D Capture: con esto se logra visualizar en la pantalla del celular los polígonos creados en Google Earth. Cabe destacar que el mapa base que viene por defecto en Pix4D Capture es MapBox, por lo que la imagen satelital de Google Earth podría no coincidir (nótese el caso en las figuras 6 y 7); sin embargo, los polígonos se mantienen en la misma ubicación gracias a que están referenciados geográficamente.

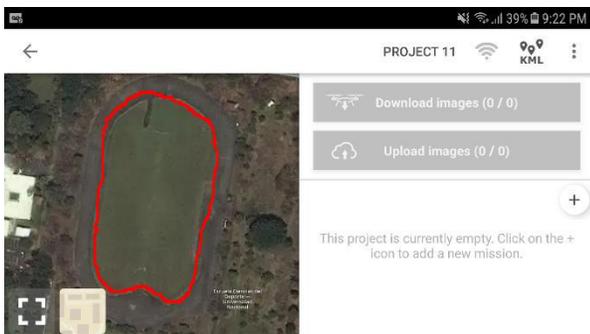


Figura 18. Polígonos marcados en el mapa de Pix4D Capture.
Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

- Seleccionar el tipo de proyecto en Pix4D Capture: dependiendo de la superficie que se va a levantar se recomienda uno u otro.

- Grilla simple: Para modelos de 2 dimensiones.
- Grilla doble: Para modelos de 3 dimensiones.
- Vuelo circular: Para modelar en 3 dimensiones elementos individuales (ejemplo: estatuas).
- Vuelo libre: Requiere que el usuario vuele en forma manual, se programa el equipo para que tome fotografías automáticamente cada cierta distancia recorrida.

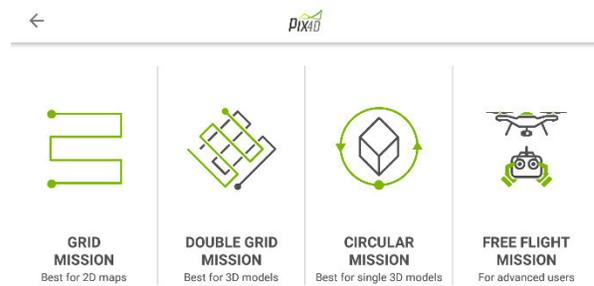


Figura 19. Tipos de proyecto en Pix4D Capture.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

- Asignación de parámetros de vuelo: se asigna el área de estudio en la aplicación, se debe establecer la altura de vuelo (recordando que pueden existir obstáculos, asignar una altura donde no existan). Además, se define una velocidad de vuelo, considerando que a mayor velocidad es probable que las fotografías salgan movidas.
- Asignación de parámetros para la toma de fotografías: se debe escoger el ángulo de la cámara (recomendado que sea a 90° para el levantamiento de la superficie, si existen elementos de mayor altura, como paredes; se levantarán después con fotografías oblicuas). Asimismo, debe seleccionarse el traslape que tendrán las fotografías, lo recomendado según Agisoft (s. f. B) es de 60 % a 80 %.
- Trazo de la ruta de vuelo: la aplicación automáticamente genera una ruta que se

acomode a los parámetros establecidos de tipo de proyecto, área y traslape.

- Tiempo de vuelo: resultado de la ruta de vuelo y de la velocidad asignada, si este tiempo excede el disponible por la batería del dron, corresponde realizar 2 o más vuelos independientes. Es importante destacar que, a mayor altura y a menor solape, el desplazamiento del equipo disminuye y, por tanto, el tiempo de vuelo es menor.



Figura 20. Asignación de área de vuelo, de parámetros de vuelo y de toma de fotografía en Pix4D Capture. Trazo de ruta en grilla doble, resultando en un tiempo de vuelo de 9 minutos 30 segundos.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

- Guardar misión: guardar la ruta de vuelo para ser ejecutada en campo posteriormente.
- Establecer una hora para ejecutar el vuelo: según el Ingeniero Geodesta Alexis Piña (2017) es recomendable que el vuelo se realice entre las 6 de la mañana y las 10 de la mañana, aunque pueden realizarse sin problema a hasta medio día. Al atardecer, pueden ocasionarse problemas por las sombras, incluso explica que existe un fenómeno por el cual las imágenes salen volteadas y por tanto deben aplicárseles correcciones más avanzadas.
- Cargar el UAV, el control y el celular: si alguno de ellos estuviera sin carga en el momento de ejecutar el vuelo, habría que abortar la misión hasta que estén los 3 elementos listo. Si uno de ellos falla, el UAS falla.
- Revisar que el *firmware* del equipo este actualizado: esto se revisa en la aplicación DJI GO. En caso negativo, se debe actualizar, se requiere conexión wifi.

Ejecución de vuelo

Una vez planificado el vuelo, se vuelve a campo con el UAV a la hora establecida y se procede con la fase de ejecución, en el cuadracóptero seguirá la ruta especificada y tomará fotografías automáticamente. En esta fase, se utiliza Pix4D Capture. Adicionalmente, se utiliza DJI GO para revisar que todo funciona correctamente y para la ejecución de vuelos manuales de apoyo. Los pasos a seguir para la correcta ejecución de esta fase son:

- Revisar físicamente el dron: es fundamental que cuente con suficiente batería para ejecutar el vuelo, además se debe inspeccionar que la lente de la cámara esté limpia y que las hélices estén correctamente colocadas.
- Revisar que no haya interferencias, que existan suficientes satélites conectados y que el UAV esté calibrado: esto también es observable en DJI GO. Si existen interferencias, se puede cambiar la ubicación de despegue y control o esperar a que esta pase. En caso de no estar calibrado, conviene seguir las instrucciones de DJI GO, consisten en darle vueltas al dron 360° sobre su eje.

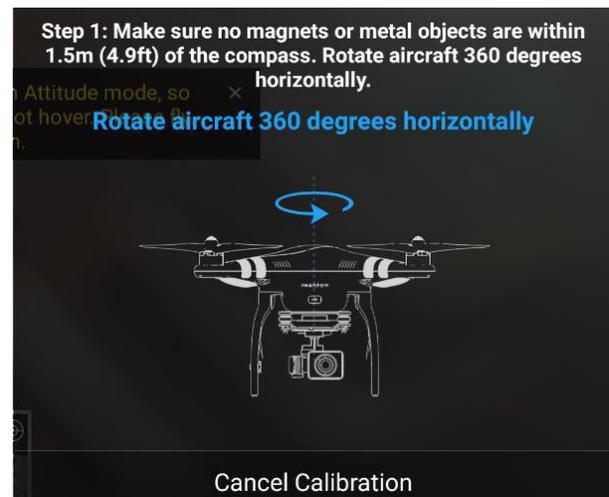


Figura 21. Paso 1 para la calibración del Phantom 3 Standard.
Fuente: El autor.
Obtenido de: DJI GO.

- Realizar un vuelo manual corto con DJI: con ello se revisa que el equipo funciona correctamente en todos los sentidos.
- Referencia métrica: dado que de estas fotografías se obtendrá un producto cuya función es brindar medidas de lo existente en campo, es sano colocar una regla o un objeto en el sitio como referencia para conocer la longitud.
- Conectar el UAV a PIX4D Capture: previamente hay que configurar la aplicación y dron, para mayor información consultar el manual de uso de PIX4D Capture.
- Abrir el proyecto que se planificó con anterioridad y revisar que se cumplen con todos los requisitos: dron conectado, dron calibrado, zona de despegue aterrizaje seleccionada, tarjeta SD en el dron con suficiente espacio, misión cargada al dron, cámara lista, misión en rango y número de Satélites GPS conectados, mínimo 6. Si una de ellas falla, el vuelo no puede realizarse.
- Ejecutar el vuelo: el dron despegará automáticamente, subirá a la altura asignada, y se dirigirá a una esquina de la grilla para luego seguir la ruta planeada sobre la cual tomará fotografías automáticamente con la cámara en ángulo cenital. En la pantalla del celular se observará la ubicación de la aeronave, el recorrido realizado por la misma, las ubicaciones de las fotografías, la ubicación del control en tierra y el punto de aterrizaje.



Figura 22. Fotografía cenital tomada en piloto automático
Fuente: El autor.

- Aterrizaje: cuando el UAV culmina su labor, tomará rumbo al punto de aterrizaje, y empezará a descender lentamente. Debe tenerse en cuenta que puede aterrizar varios metros fuera del punto establecido por motivo de interferencias e inexactitudes del sistema GPS. En caso de que el piloto observe que el aterrizaje no es posible en el punto, se debe aterrizar manualmente para evitar un accidente.

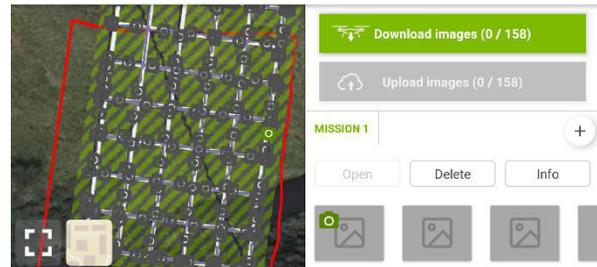


Figura 23. Recorrido a realizar por el UAV y ubicación de las fotografías. Pix4D Capture listo para empezar la descarga de las imágenes.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

- Descarga de fotografías: automáticamente se empiezan a transferir las fotografías del dron al Celular, vía wifi. Otra opción es cancelar la transferencia y extraer las imágenes de la tarjeta SD del cuadracóptero.
- Vuelo manual de apoyo: se ejecuta con DJI GO. Se realiza un recorrido pilotando manualmente, en el cual se coloca la cámara en ángulo oblicuo para detallar aquellos elementos que no pudo captar la cámara en el recorrido automático. Este paso es muy útil cuando se fotografían muros, por ejemplo, debido a que se pueden detallar mejor las elevaciones con estas fotos de apoyo. Si no se capturan estas imágenes oblicuas, se generan vacíos de información y distorsiones en las texturas de las secciones verticales.



Figura 24. Fotografía oblicua tomada con RPAS, se pueden observar los detalles en elevación, como muros, ventanas, etc.
Fuente: El autor.

Procesamiento de datos

Una vez tomadas todas las fotografías necesarias del área de estudio, corresponde procesar las imágenes para que se puedan obtener productos de utilidad. Para esta fase, es necesario contar con un *software* de fotogrametría digital automatizada como Agisoft Photoscan Professional.

- Se cargan las fotos al programa: una vez en oficina, se deben descargar las fotografías al computador. Posteriormente en la pestaña de 'Flujo de trabajo', se selecciona 'Añadir Fotografías' y se escogen las fotografías realizadas en campo para la generación del modelo.



Figura 25. Agisoft Photoscan con fotografías cargadas.

Fuente: El autor.

Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Selección preliminar de fotografías: en esta etapa, se descartan aquellas fotografías que incumplan con la calidad esperada, por ejemplo, aquellas que estén borrosas o que salgan oscuras. Según

Agisoft (s. f. A) también hay que considerar suprimir aquellas que no enfoquen al menos un 60 % de la imagen al objeto de estudio.



Figura 26. Fotografía eliminada del proceso por no tener más del 60 % del edificio en estudio dentro de la imagen.

Fuente: El autor.

- Máscaras: si hay una fotografía que enmarque en ella menos del 60 % del objeto de estudio, entonces lo correcto es enmascarar las secciones que no son de utilidad para el modelo y que solamente aportarán datos basura que finalmente solo ralentizarán el proceso. En caso de fotografías oblicuas en las que se retrate el horizonte, este debe ser enmascarado, pues este aporta ruido al proceso y el *software* busca la manera de modelar esos puntos alejados, resultando en modelos extraños que no reflejan la realidad. En general, es una buena práctica enmascarar en las fotografías todas aquellas áreas que no son representativa para el modelo, con ello se agilizarán los procesos siguientes.



Figura 27. Fotografía oblicua con fondo enmascarado, el río y la vegetación no aportan datos relevantes al modelo.

Fuente: El autor.

Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Alinear fotografías: es el siguiente paso del flujo de trabajo, tiene como resultado una nube esparcida de puntos.

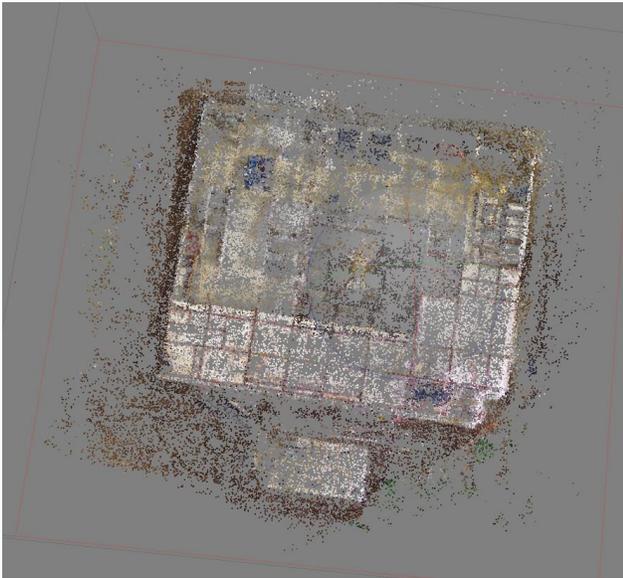


Figura 28. Nube de puntos esparcida.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Densificar la nube de puntos: densifica la nube de puntos esparcida y resulta en una nube de puntos densa. Esta por sí sola es un producto con mucha utilidad, del cual se pueden extraer curvas de nivel, por ejemplo.



Figura 29. Nube de puntos densificada.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Triangulación: es un paso intermedio antes de la generación de otros productos, se triangula la nube de puntos para formar una superficie, aplica los mismos fundamentos que la creación de curvas de nivel a mano, en las que se triangula e interpola.

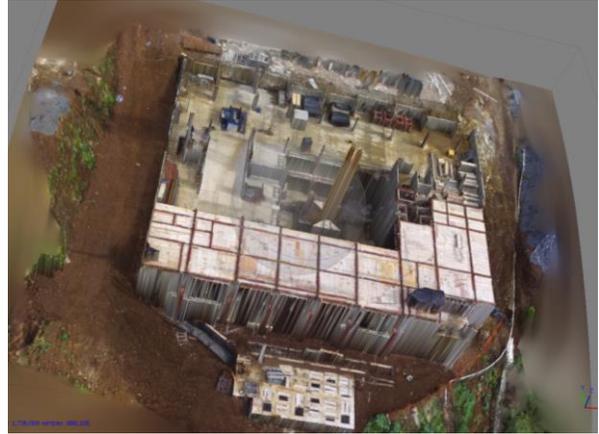


Figura 30. Superficie triangulada.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Generar textura: a partir de la superficie triangulada se genera una capa texturizada en la cual se puede detallar el objeto de estudio. Es una buena práctica medir en este ortomosaico tridimensional la regla o el objeto con longitud conocida para saber si el modelo logró la precisión geométrica esperada (al menos geoméricamente).



Figura 31. Superficie texturizada.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Crear el modelo de elevación digital: se debe seleccionar el sistema de coordenadas e inmediatamente generar el ráster de elevaciones. Un producto sumamente valioso como se explica más adelante (es más sano utilizar esta información solo si se tienen puntos de control en tierra que estén georreferenciados de manera precisa).

- Generar curvas de nivel: en la pestaña de herramientas, se escogen los límites superiores e inferiores, así como la equidistancia. Luego al presionar el botón 'Enseñar Formas', se muestran las curvas y sus etiquetas (es más sano utilizar esta información solo si se tienen puntos de control en tierra que estén georreferenciados de manera precisa).

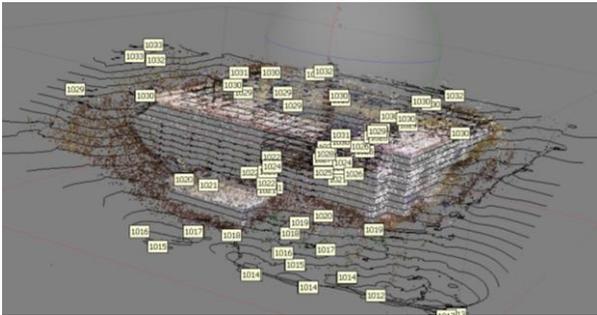


Figura 32. Curvas de nivel.

Fuente: El autor.

Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

- Formar ortomosaico: se debe seleccionar el sistema de coordenadas y después generar el ortomosaico. En Costa Rica debe utilizarse el CRTM 05.
- Generar reporte: en este se plasman los resultados del proceso, las precisiones logradas, la resolución, la cantidad de puntos por unidad de área, desviaciones, etc.
- Exportación de productos: en la pestaña de 'Archivo' se pueden exportar:
 - Las nubes de puntos: el formato recomendado es .LAS que es el nativo del programa.
 - El ortomosaico: formato .TIFF, es una fotografía ortorectificada y georeferenciada.
 - Modelo de elevación digital: ráster de elevaciones, también en formato .TIFF.
- Otras exportaciones: en la pestaña de 'Herramientas', se pueden exportar las formas como las curvas de nivel. Las texturas 3D, entre otros.

Productos, utilización y postprocesos

Los productos resultantes del procesamiento de las imágenes con Agisoft Photoscan Professional tienen diversas utilidades. A continuación, se expondrán algunas de ellas utilizando el sistema de posicionamiento geográfico QGIS:

- Vectorización de elementos y obtención de propiedades geométricas: se logra al superponer una capa de vectores de polígonos sobre el ortomosaico, en el que se aproximarán las formas de los elementos mostrados en el ortomosaico con los polígonos. También se pueden utilizar líneas para demarcar límites u objetos cartográficos como el paso de un río; asimismo, los vectores tipo punto pueden resultar de gran utilidad para marcar árboles, por ejemplo. La finalidad de vectorizar el ráster es que de estos elementos se pueden obtener características y medidas como distancias y áreas.



Figura 33. Ortomosaico con polígonos que representan el encofrado de fondo de las losas, cada polígono viene etiquetado con su respectiva área.

Fuente: El autor.

Obtenido de: Qgis.

- Usos del modelo de elevación digital: con este ráster se pueden generar curvas de nivel, se puede además conocer la pendiente del terreno y el flujo que tendría el agua al escurrir en la superficie. Sin embargo, para obtener un producto de este tipo realmente preciso hace falta un mayor procesamiento de las imágenes y además es importante considerar puntos

de control en tierra que sirvan de apoyo y referencia al modelo.

- Cubicación de tierra: después de un proceso en Civil 3D se pueden calcular la diferencia de volumen entre 2 superficies. Para que el resultado sea aceptable debería contarse con puntos de control en tierra que estén georreferenciados y que cuenten con una coordenada Z precisa.
- Visualización de avances: al superponer un ortomosaico anterior con uno más reciente se pueden observar los avances de la obra. Asimismo, es posible cuantificar el avance en términos de área con las herramientas de QGIS. Ahora bien, es necesario hacer correcciones en la georreferenciación por temas de precisión del GPS, sobretodo, porque cuando no se utilizan puntos de control en tierra, como es el caso de esta guía. Para ello se utiliza el *plug in* llamando Georeferencer GDAL que ofrece Qgis. El proceso es el siguiente:
 - Contar con un ráster (ortomosaico) georreferenciado que sirva cuyos datos sirvan como referencia de salida y donde los puntos de control sean observables o con las coordenadas de los puntos de control.
 - Tener un segundo ráster que no esté alineado con el primero y en el que los puntos de control sean visibles, este será el que se someterá a la transformación.
 - Cargar el primer ortomosaico.
 - Abrir el georreferenciador de Qgis y cargar el segundo ráster.
 - Ubicar los puntos de control en el segundo ráster y luego vincularlos con el primero.
 - Seleccionar el tipo de transformación, es recomendable utilizar la polinómica de primer orden o la transformación lineal, una de mayor calibre no es necesaria, y más bien puede ser contraproducente.
 - Ejecutar la transformación y guardar el ráster procesado.

- Ahora los dos rústeres se encuentran alineados.

- Usos comunicacionales: Los modelos 3D pueden ser una herramienta visual de peso a la hora de comunicarse con los clientes, con ella pueden tener una idea global del avance del proyecto en un espacio temporal determinado. Adicionalmente, puede ser utilizada para comunicar al personal de campo, cuales zonas requieren énfasis de atención o en donde se ha detectado algún error de calidad. Puede utilizarse con los consultores o con el equipo de ingenieros residentes para tomar decisiones también, el modelo 3D facilita la conceptualización del sitio.

Las anotaciones anteriores representan solo una pincelada de las posibilidades que brinda esta técnica. Se espera que esta guía sea un paso más para la tecnificación de la industria de la construcción y que sea de utilidad para los profesionales de esta área.

Se recomienda energicamente que el uso de esta guía se haga de manera responsable, bajo los lineamientos del país en materia de vuelo de drones. Por otro lado, se hace énfasis en que esta es solo una síntesis, un manual de bolsillo que permita que los interesados se inicien en el tema del uso de drones y fotogrametría en la industria de la construcción.

Se recomienda, sobretodo, que, antes de seguir esta guía el usuario, esté familiarizado con el pilotaje del equipo o que lo haga primero en zonas alejadas para evitar accidentes.

Caso

Se pusieron en práctica los pasos establecidos en la guía explicada en el punto anterior para la estimación del avance de obra en una actividad real.

La actividad seleccionada fue la colocación de encofrados Symons para la construcción de losas.

Se realizó una primera visita el 1 de octubre de 2017, con el fin de reconocer el sitio y recopilar los datos para la planificación de los vuelos. Se ejecutó un vuelo manual para tener una mejor visión del lugar, las evidencias se presentan en las fotografías luego del cuadro 4.

Cuadro 4. Anotaciones realizadas durante el reconocimiento del sitio

Elementos para reconocimiento del sitio	Anotaciones
Fecha	1/10/2017
Identificación del área de estudios	Edificio de parqueos (Figura 34)
Selección del área de aterrizaje/despegue	Planicie elevada cercana al área de estudio (Figura 35)
Ubicación del controlador en tierra	Planicie elevada cercana al área de estudio (Figura 35)
Obstáculos observados	2 grúas y 1 edificio cercano (Figura 36)
Existen objetos metálicos en la zona	Depende de la orientación de la pluma de la Grúa 2 (Figura 37)
Puntos de control escogidos	Esquinas del edificio en estudio, paneles y de la planta de tratamiento (Figuras 38 y 39)
Elementos de interés	Ninguno que requiera de mayor atención
Delimitación de área de estudio	Edificio de parqueos en Google Earth (Figura 40)

Fuente: El autor.



Figura 34. Identificación del área de estudio (zona enmarcada en el rectángulo rojo), edificio de parqueos. La actividad a monitorear es la colocación de los paneles Symons como fondo de losa.

Fuente: El autor.



Figura 35. Área de despegue/aterrizaje escogida (zona dentro del círculo rojo). También servirá como ubicación para el controlador. Este lugar permite una visión general del área de estudio.

Fuente: El autor.



Figura 36. Obstáculos encontrados en la zona de estudio. Grúa 1 de 60 m de altura, dependiendo de su orientación la pluma queda sobre el área de estudio. Edificio cercano, aunque no queda directamente sobre el área de estudio, dificulta la maniobrabilidad de la aeronave, obstaculiza el espacio para lograr fotografías en algunos ángulos oblicuos. Grúa 2 de 20 m de altura, ubicada en el centro del área de estudio.

Fuente: El autor.



Figura 37. No se observan objetos metálicos cercanos al área del controlador, que causen interferencia. Si la pluma de la Grúa 2 se ubicase directamente sobre el controlador, es posible que sí se generen interferencias electromagnéticas.

Fuente: El autor.



Figura 38. Ubicación de posibles puntos de control como: las esquinas del edificio en estudio o de la planta de tratamiento (Construcción pequeña a la izquierda de la fotografía).

Fuente: El autor.



Figura 39. Ubicación de otros posibles puntos de control, como la intersección de paneles fácilmente identificables.

Fuente: El autor.



Figura 40. Delimitación del área de estudio (huella del edificio de parqueos) e identificación de obstáculos (Grúa 2 y edificio adyacente) en Google Earth.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Google Earth.

Posteriormente, se ejecutaron otras dos visitas; una el 17 de octubre de 2017 y otra el 24 de octubre de 2017. La primera para recopilar los datos de base y la segunda para visualizar el avance una semana después.

Para cada visita, se planificaron y ejecutaron misiones de vuelo con Pix4D Capture. En ambos casos se hicieron vuelos manuales para complementar la información recopilada por los vuelos programados.

A continuación, se indican los parámetros utilizados durante la ejecución de cada vuelo y resultados de los mismos:

Cuadro 5. Datos del vuelo 1.1

Datos de vuelo	
Fecha de vuelo	17/10/2017
Hora de vuelo	12:34:30 p.m.
Tipo de proyecto	Grilla simple
Ángulo de cámara (°)	90
Traslape (%)	80
Dimensiones del área a levantar (m ²)	43x54
Altitud (m)	30
Tiempo de vuelo (mm:ss)	02:59
Fotografías tomadas (und)	32

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.



Figura 41. Ruta ejecutada en el Vuelo 1.1.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

Cuadro 6. Datos del vuelo 1.2

Datos de vuelo	
Fecha de vuelo	17/10/2017
Hora de vuelo	12:21:55 p.m.
Tipo de proyecto	Grilla simple
Ángulo de cámara (°)	90
Traslape (%)	80
Dimensiones del área a levantar (m ²)	67x34
Altitud (m)	30
Tiempo de vuelo (mm:ss)	03:00
Fotografías tomadas (und)	33

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

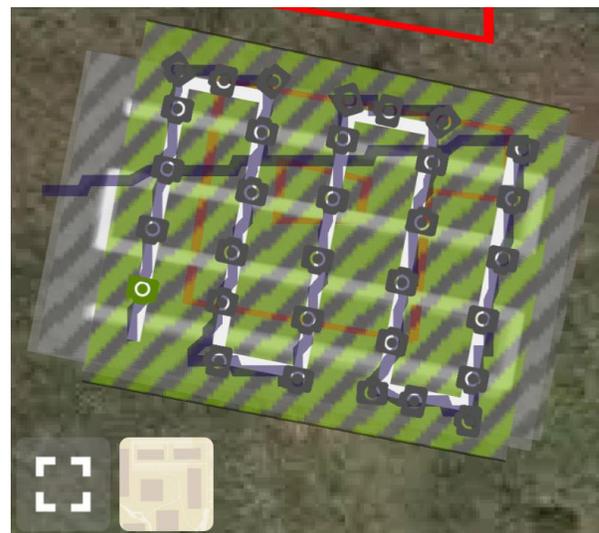


Figura 42. Ruta ejecutada en el Vuelo 1.2.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

Cuadro 7. Datos del vuelo 2

Datos de vuelo	
Fecha de vuelo	24/10/2017
Hora de vuelo	8:05:12 a.m.
Tipo de proyecto	Doble grilla
Ángulo de cámara (°)	80
Traslape (%)	80
Dimensiones del área a levantar (m ²)	68x43
Altitud (m)	30
Tiempo de vuelo (mm:ss)	05:51
Fotografías tomadas (und)	78

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.



Figura 43. Ruta ejecutada en el Vuelo 2.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Pix4D Capture.

Después se procesaron las fotografías en 2 sets de datos, aquellas tomadas el 17 de octubre de 2017 y las tomadas el 24 de octubre de 2017. Los productos principales fueron 2 ortomosaicos referenciados en el sistema CRTM-05.



Figura 44. Ortomosaico producto de las imágenes del 17/10/17.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.



Figura 45. Ortomosaico producto de las imágenes del 24/10/17.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

Al cargarse los ortomosaicos en Qgis como capas ráster, se obtuvo una diferencia espacial de aproximadamente 5,6 m, tal como se observa en la figura 46.

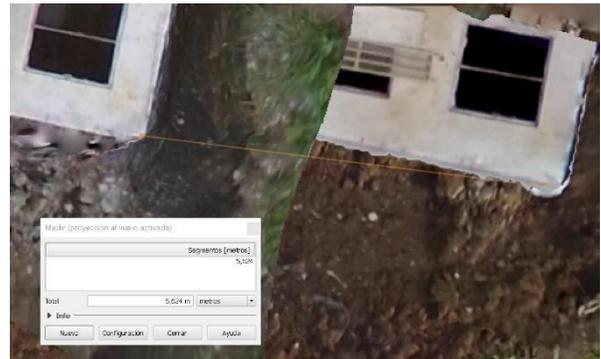


Figura 46. Diferencia espacial de 5,624m entre dos puntos comunes de los ortomosaicos.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

Se utilizó el *plug in* Georreferencer GDAL para solventar el problema, se aplicó el modelo polinómico de primer orden, con 11 puntos de control; para alinear los rásteres. Los puntos de control son intersecciones entre paneles fácilmente identificables, se ubican distribuidos sobre el área de interés principal, es decir; los encofrados de las losas. El ráster utilizado como base fue el del 17 de octubre y el transformado fue el del 24 de octubre.

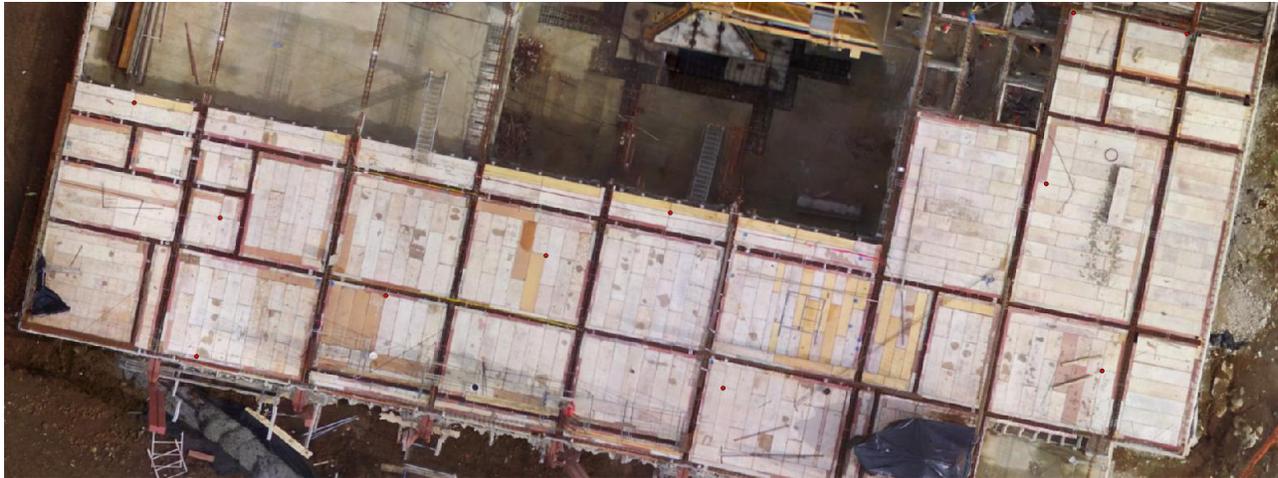


Figura 47. Puntos de control sobre el ortomosaico del 24/10/17 utilizados para la aplicación del modelo lineal de transformación con el fin de alinear el ortomosaico del 24/10/17 con el del 17/10/17. Los puntos son intersecciones entre paneles, fácilmente identificables en ambos ortomosaicos.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

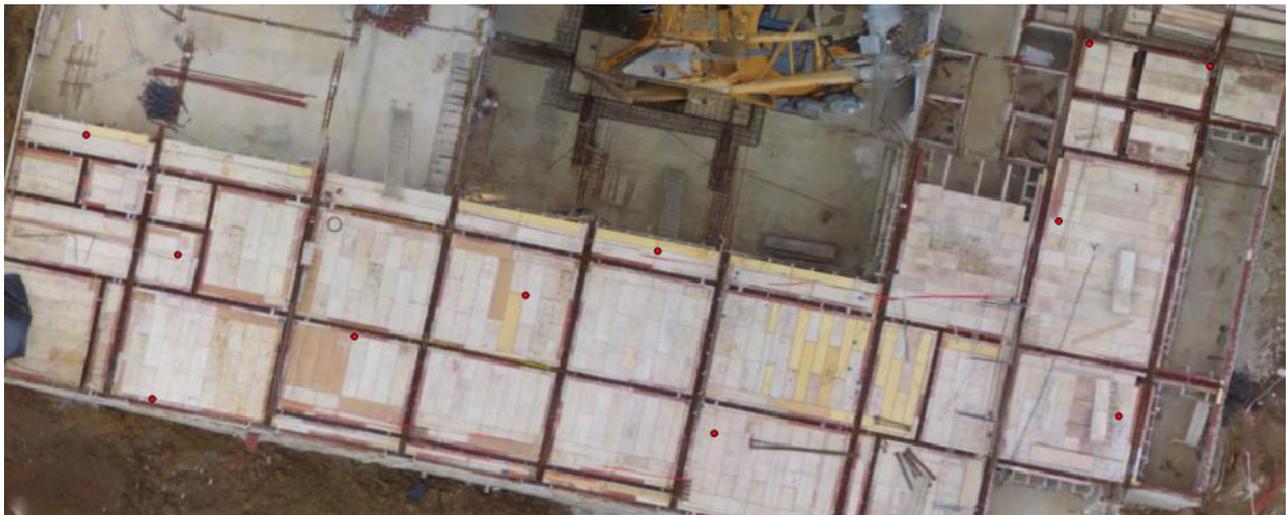


Figura 48. Puntos de control sobre el ortomosaico del 17/10/17 utilizados para la aplicación del modelo lineal de transformación con el fin de alinear el ortomosaico del 24/10/17 con el del 17/10/17. (Nótese que están en la misma ubicación física que los colocados en la figura 47).

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

En los reportes generados para cada modelo (ver Apéndices) se indica que el modelo del 17/10/17 tiene una resolución de 2,71 cm/px y en el del 24/10/17 se logran 2,8 cm/px.

Para validar cuán representativas de la realidad son las medidas tomadas en los ortomosaicos, se tomó como control una medida conocida y que se repite en ambos mosaicos, la longitud de un panel Symons estándar de 2,44 m.

Se midieron los laterales de 30 paneles seleccionados al azar, pero tomando en cuenta que las intersecciones entre paneles (que funcionaron como vértices) fueran visibles en ambos ortomosaicos para poder obtener las medidas en ambos rásteres y, con ello, poder cuantificar las diferencias entre medidas y calcular el nivel de correlación.

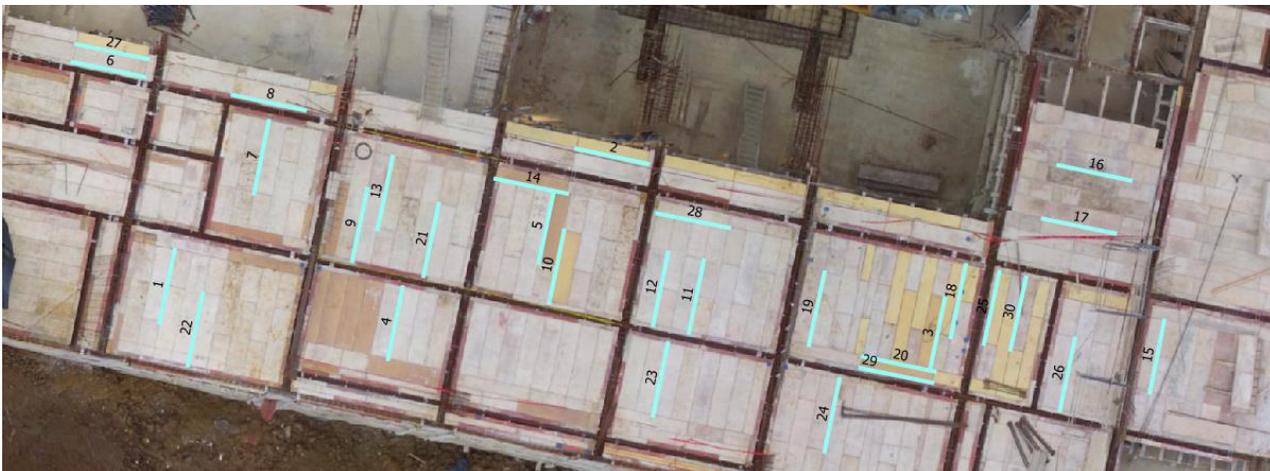


Figura 49. Medidas de los paneles de 2,44 m sobre el ortomosaico del 17/10/17.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

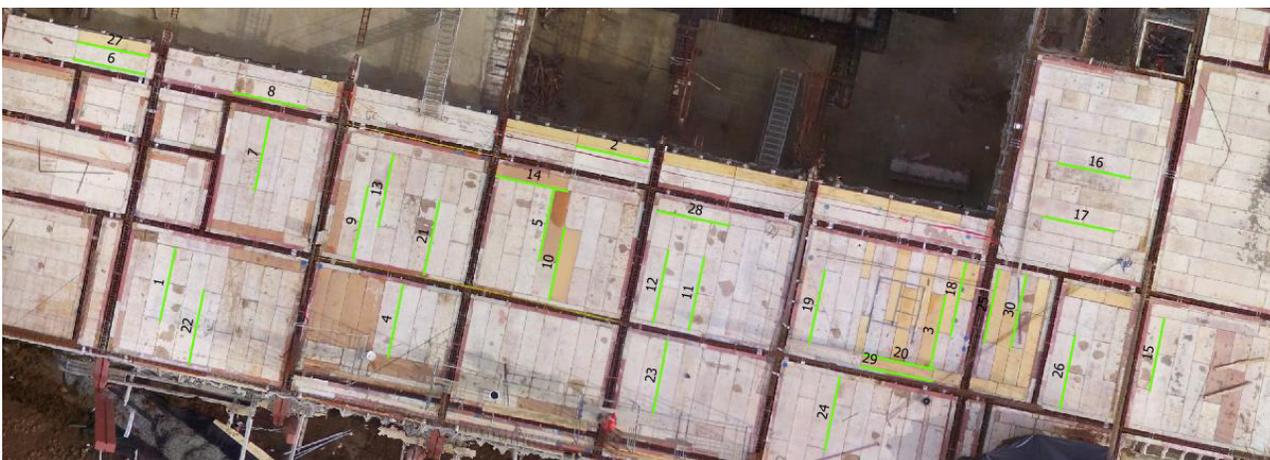


Figura 50. Medidas iniciales de los paneles de 2,44 m sobre el ortomosaico del 24/10/17. (Nótese que son los mismos que los de la figura 49).

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

Una vez colocados los vectores, se calcularon las medidas, en el cuadro 8 son visibles los resultados del ortomosaico del 17/10/17 llamados 'Longitud 1' y los del 24/10/17 con la etiqueta de 'Longitud 2'.

Aunado a esto, se muestran algunos datos estadísticos de cada set de datos como el promedio, el error absoluto de la magnitud, y el error relativo.

Asimismo, para cada medida particular se muestra el error absoluto de las medidas contra el valor exacto 2,44 m.

Por otro lado, se creó un gráfico de dispersión (figura 51) y se calculó la recta de mejor ajuste por mínimos cuadrados, finalmente se presenta el valor del coeficiente de correlación lineal R.

Cuadro 8. Longitudes tomadas sobre los ortomosaicos, resultados de datos estadísticos para determinación de la precisión

Identificación	Longitud 1 (m)	Longitud 2 (m)	Error absoluto 1 (m)	Error absoluto 2 (m)
1	2,47	2,46	0,04	0,03
2	2,41	2,41	0,02	0,02
3	2,43	2,43	0,00	0,00
4	2,43	2,43	0,00	0,00
5	2,43	2,42	0,00	0,01
6	2,43	2,43	0,00	0,00
7	2,45	2,44	0,02	0,01
8	2,43	2,43	0,00	0,00
9	2,43	2,43	0,00	0,00
10	2,44	2,44	0,01	0,01
11	2,44	2,43	0,01	0,00
12	2,44	2,44	0,01	0,01
13	2,45	2,45	0,02	0,02
14	2,41	2,41	0,02	0,02
15	2,43	2,43	0,00	0,00
16	2,43	2,44	0,00	0,01
17	2,43	2,43	0,00	0,00
18	2,44	2,44	0,01	0,01
19	2,46	2,45	0,03	0,02
20	2,41	2,41	0,02	0,02
21	2,44	2,45	0,01	0,02
22	2,46	2,46	0,03	0,03
23	2,43	2,43	0,00	0,00
24	2,44	2,44	0,01	0,01
25	2,43	2,43	0,00	0,00
26	2,44	2,44	0,01	0,01
27	2,42	2,42	0,01	0,01
28	2,42	2,42	0,01	0,01
29	2,43	2,42	0,00	0,01
30	2,44	2,43	0,01	0,00
Promedio (m)	2,43	2,43	0,01	0,01
Error absoluto de la magnitud (m)	2,57,E-03	2,40,E-03		
Presición	947	1012		
Error relativo	0,11%	0,10%		

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis y Excel.

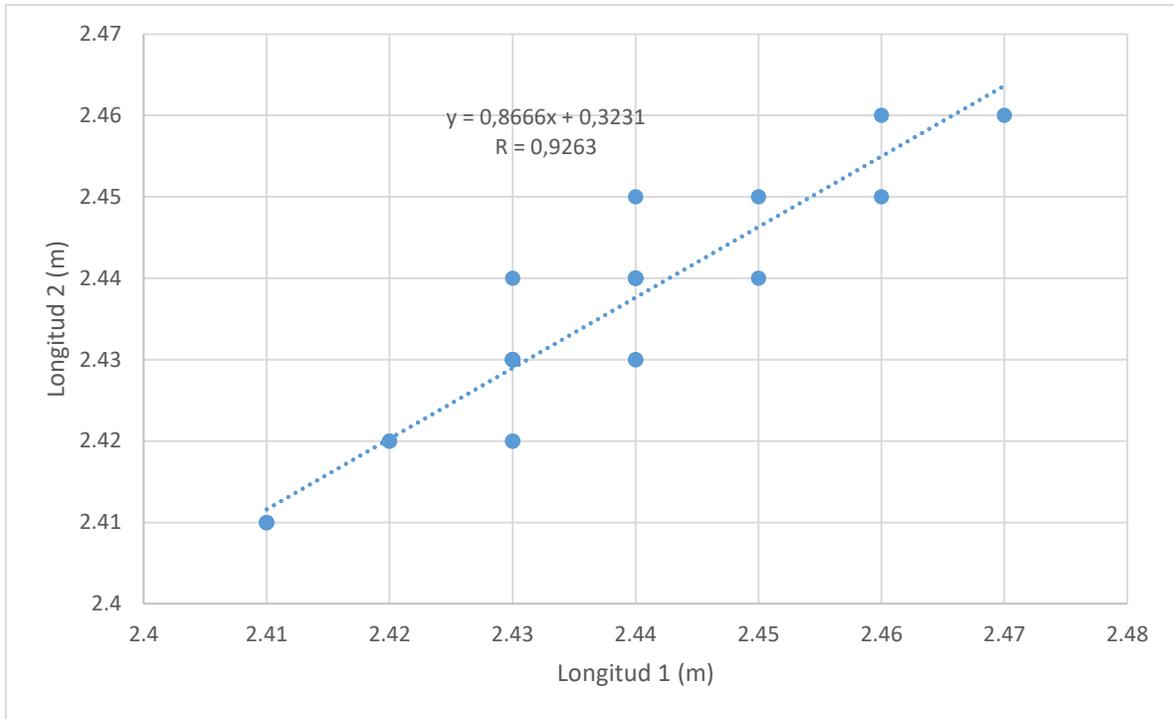


Figura 51. Longitud 1 (m) vs Longitud 2 (m). Línea recta de mejor ajuste y coeficiente de correlación lineal (R).

Fuente: El autor.
Obtenido de: Excel.

Habiendo determinado el error asociado a las magnitudes y la correlación entre ambos ortomosaicos, se procede a medir el avance en la actividad.

Primeramente, se calculan las áreas de los encofrados de fondo de losas que ya estaban colocadas al momento del primer vuelo mediante vectores tipo polígonos.

Estos fueron utilizados posteriormente como base o control y, sobre ellos, se observa y cuantifica el avance del siguiente corte, el del 24/10/17.

En la figura 52 se observan los encofrados armados al 17/10/17, en la figura 53 es notable el avance de obra al 24/10/17 y en la figura 54 se muestran los polígonos utilizados para medir el avance.

Al cuantificar las medidas de las áreas del 17/10/17 y las áreas al 24/10/17 (en los Apéndices se anexan los cuadros con los resultados de las medidas de cada polígono), se logró determinar el avance total de la actividad en ambas fechas. Por una parte, al restar los valores, se halló el avance de la obra durante la semana comprendida entre esas fechas. Por otra, se obtiene el porcentaje de avance tomando como referencia la medida total de losas en planos, la cual resulta en 1872 m. Los resultados pueden consultarse en el cuadro 9.

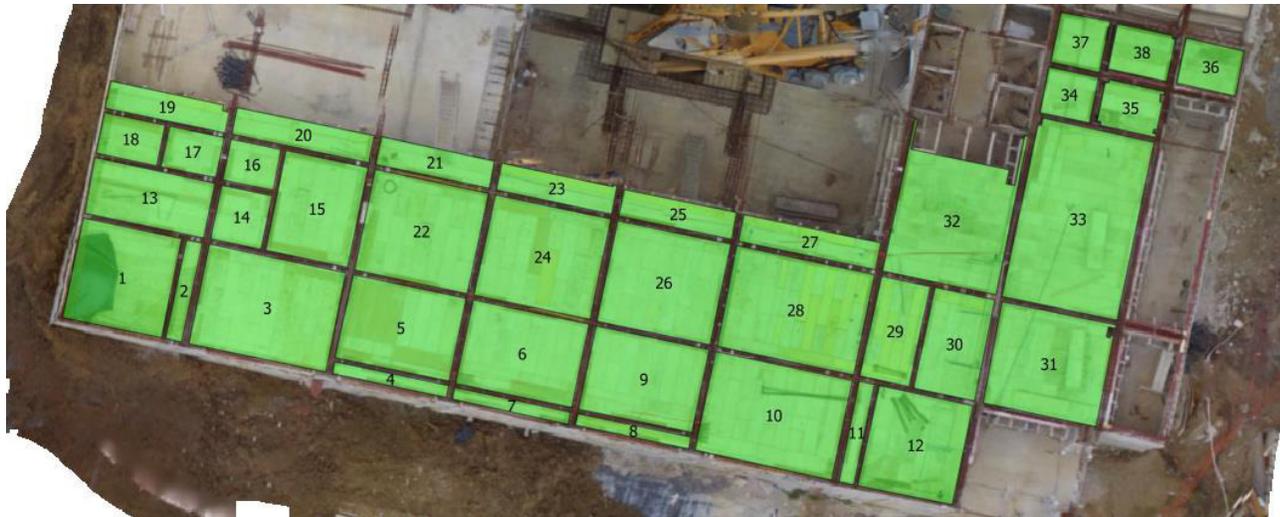


Figura 52. Encofrados de fondo de losa colocados al 17/10/17, identificación de losas por número.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.

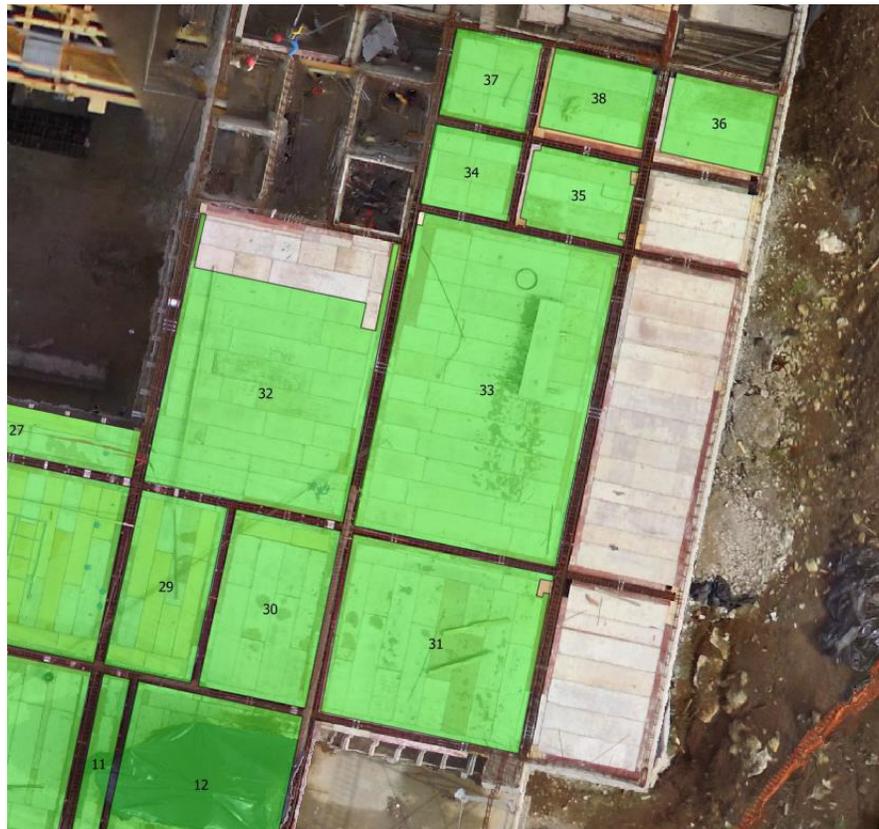


Figura 53. Zoom sobre el sector en el que se avanzó con la actividad. En verde, los paneles colocados al 17/10/17; se contraponen en la imagen del 24/10/17 para observar el avance.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis.



Figura 54. Zoom sobre el sector en el que se avanzó con la actividad. En verde, los paneles colocados al 17/10/17; en azul, los polígonos nuevos utilizados para medir el avance.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis

Cuadro 9. Avance en la colocación de encofrado de fondo para la construcción de losas

Identificación	Área (m ²)	Porcentaje de avance
Avance total al 17/10/17	469,01	25,05%
Avance total al 24/10/17	512,54	27,38%
Avance de la semana	43,53	2,33%

Fuente: El autor.
Obtenido de: Qgis y Excel.

De forma demostrativa, también se presentan otros productos y usos de esta técnica como una textura 3D del edificio estudiado, resultado de las fotografías del 24/10/17 en la figura 55. Por otro lado, se presentan las curvas de nivel de una ladera, sin embargo, los resultados no se pudieron validar, puesto que no existía una referencia con la cual comparar. Finalmente, se muestra el cálculo de volumen de un montículo de tierra, tampoco se conoce el nivel de precisión y exactitud logrados en este caso.



Figura 55. Modelo texturizado 3D del edificio, realizado con las fotografías del 24/10/17.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

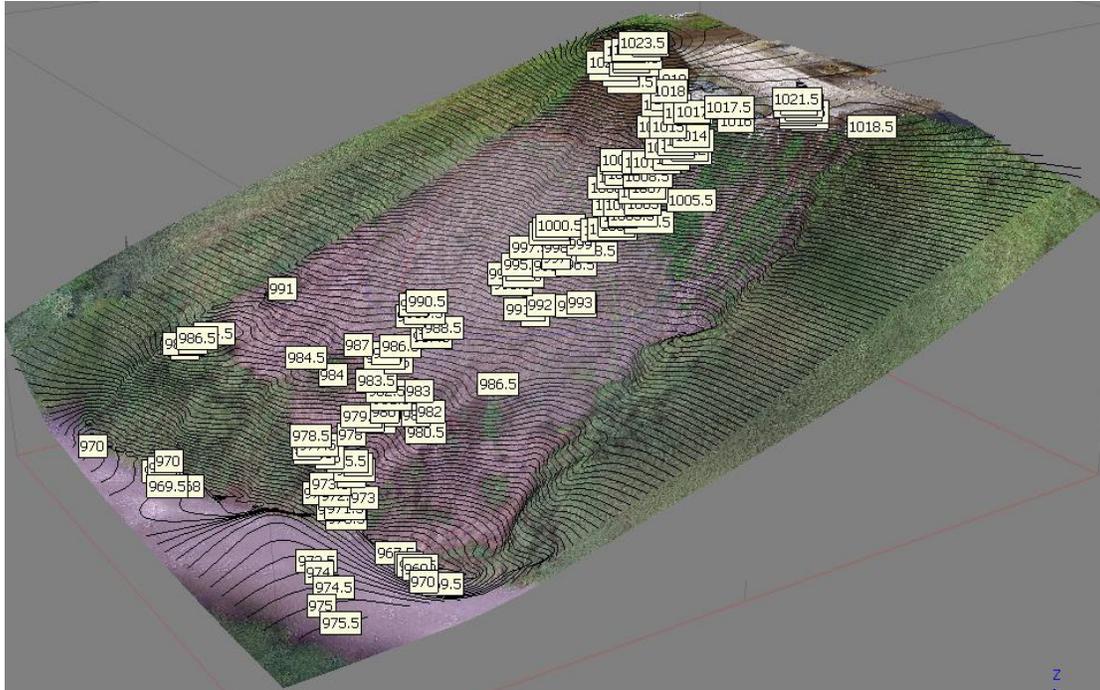


Figura 56. Curvas de nivel a cada 50 cm, ladera.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

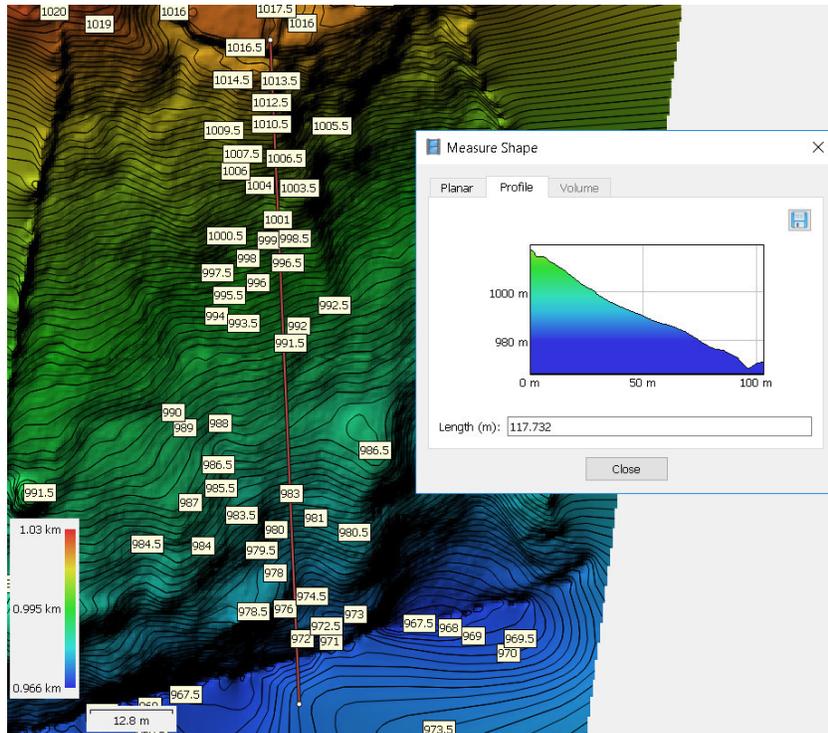


Figura 57. Modelo de elevación digital de la ladera con curvas de nivel y trazo de un perfil.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

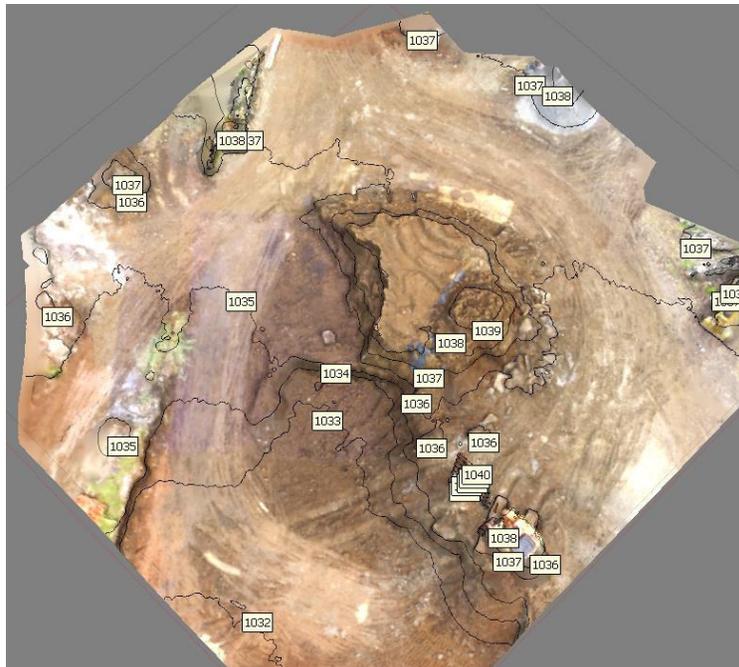


Figura 58. Textura y curvas de nivel del montículo de tierra.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

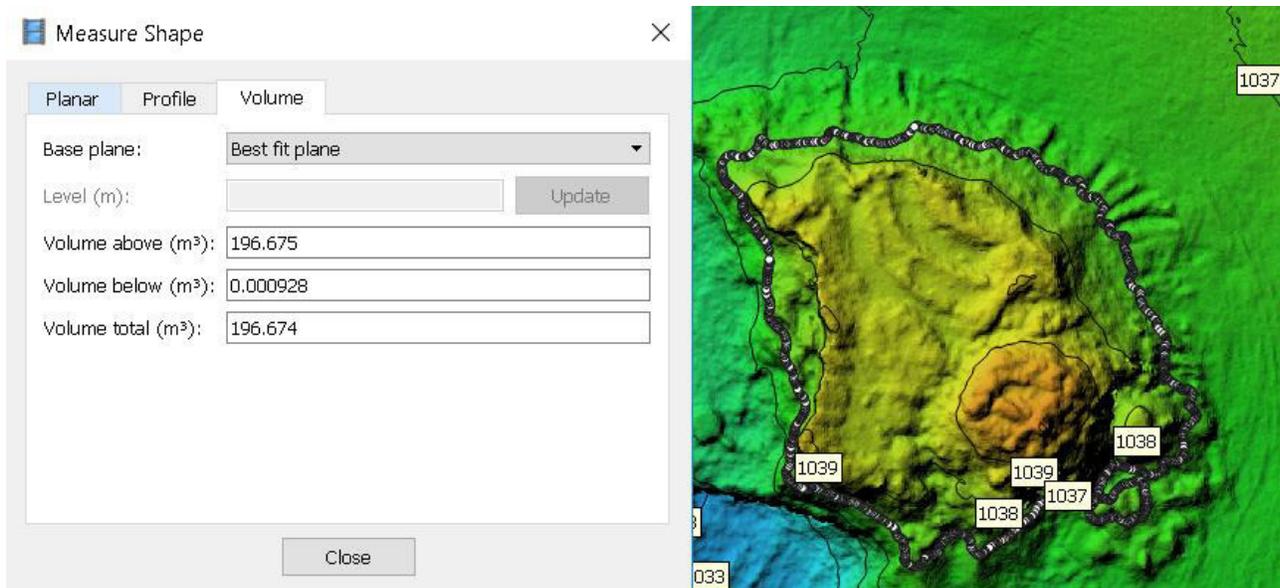


Figura 59. Modelo de elevación digital del apilamiento, cálculo de volumen del apilamiento sobre un plano establecido en la cota 1037 m.s.n.m.

Fuente: El autor.
Obtenido de: Agisoft Photoscan Professional.

Análisis de resultados

Selección de equipos y software

RPAS/UAS

El cuadracóptero escogido fue el DJI Phantom 3 Standard, cumplió con la mayoría de las características mínimas propuestas en los cuadros 1 y 2.

En el cuadro 3 se compara este equipo con otros más modernos de la misma casa, así como con otros similares de otras marcas. Su relación precio/calidad es excelente.

Inicialmente, se descartan las aeronaves tipo ala fija, pues se requería una aeronave capaz de despegar y aterrizar en áreas reducidas. Con ello se delimitó la escogencia solo a aparatos de ala rotatoria.

Aunque se consideraron plataformas de vuelo con mejores características técnicas que el escogido, se descartaron por no acoplarse al presupuesto del proyecto de 550 USD.

En general, las cualidades de estos equipos de mayor precio contra los aspectos técnicos del dron escogido son: sistemas de detección de obstáculos, sistema de posicionamiento global más preciso, mayor distancia de radiocontrol, cámara con mayor resolución y alrededor de 5 minutos más de tiempo de vuelo.

Equipos como el Phantom 4 Advance o el Walkera Vitus incluyen detectores de obstáculos, mientras que el Phantom 3 Standard no. Esta es una de las grandes debilidades del equipo escogido. Sin embargo, eso no significa que el Phantom 3 Standard no pueda utilizarse en una obra de construcción, solo se requiere una ruta de vuelo bien planificada y tomar las previsiones correctas para evitar accidentes, tal como se ha explicado en la guía del objetivo 2. Durante la

realización de este proyecto no ocurrió ningún accidente de este tipo.

Otra ventaja de los equipos más costosos es que incluyen en su configuración un sistema de posicionamiento global más preciso, el GPS/GLONASS, esto es beneficioso porque las fotografías tendrán una precisión espacial mayor. El Phantom 3 Standard cuenta solo con el sistema GPS, efectivamente la precisión espacial es menor y de entrada puede haber errores de hasta 10m en la ubicación de las fotografías, pero es un error sistemático (siempre que se utilice el mismo set de satélites), las dimensiones de los objetos captados en foto no van a variar.

Es la precisión geométrica la que realmente importa al utilizar estos equipos en el control de avances de obra. Solo esta diferencia en el sistema de posicionamiento geográfico implica una diferencia de 200 USD aproximadamente, el Phantom 3 SE es prácticamente igual al Phantom 3 Standard, solo diferenciados por el sistema de posicionamiento geográfico y la distancia máxima de radio control (que no afecta si el objeto de estudio es un edificio, el kilómetro dado por el Phantom 3 Standard es suficiente).

El Phantom 3 Standard viene equipado con una cámara de 12 megapíxeles. Esta resolución es suficiente para cumplir con el mínimo recomendado por Agisoft (s. f. B) para confeccionar ortomapas de calidad profesional. De las cámaras analizadas en el cuadro 3, es de las de menor resolución, sin embargo, cumple el mínimo establecido para el proyecto.

Aunque el Parrot Bebop es considerablemente más económico y tiene una cámara de mayor resolución (14 Mpx) se descartó por su pobre desempeño en tiempo de vuelo (12 min), es superado con creces por el Phantom 3 Standard (25 mins de vuelo). Asimismo, el equipo escogido tiene 9 minutos más de vuelo que el Spark (capaz de volar 16 min) y solo es superada

por 5 minutos extra que ofrece el Phantom 4 Advance, pero este triplica su precio.

Por otro lado, el Phantom 3 Standard es mucho más robusto en su configuración física que el Bebop (tanto el 1 como el 2) y que el DJI SPARK, aunque todos entran en la categoría de Pequeño RPAS de la clasificación de la DGAC (2017. B). al pesar menos de 2 kg y más de 100 g.

Todos los cuadracóptero revisados pueden volar en los 3 ejes y además cuentan con la capacidad del vuelo estacionario, requisitos indispensables para llegar a lugares de difícil acceso en una obra de construcción.

Aunado a lo anterior, todos son compatibles con asistentes de vuelo automático, lo que permite que sean utilizados como UAV, haciendo posible el trazado de rutas de vuelo y selección de aspectos importantes como el traslape de las fotografías tomadas automáticamente.

También todos los equipos cuentan con el modo de vuelo seguro. El modelo escogido es seguro en caso de perder la señal cuando está en modo RPAS, se programa con la aplicación DJI GO para que vuelva al punto de inicio, pero con una altura establecida; es conveniente utilizar una en la que no existan obstáculos, dado que no tiene detectores, como se comentó anteriormente.

El Parrot Bebop 2 hubiera sido una buena opción también, las características técnicas entre este y el Phantom 3 Standard son similares. Su diferencia radica en la resolución de la cámara (mayor la del Bebop 2), la robustez del equipo y la distancia de radiocontrol, en esta última el DJI triplica la capacidad del Parrot. Aun así, el Bebop 2 tiene un precio referencial que está \$186 sobre el Phantom 3 Standard. Se considera que el equipo seleccionado es el que tiene mejor relación calidad/precio, de los drones comparados.

El Phantom 3 Standard no es el modelo más nuevo de la casa DJI, ni el de mayor rendimiento, pero tiene un precio asequible de alrededor de 499 USD y sus características se consideraron suficientes para que fuera utilizado en el proyecto.

La autonomía de vuelo del Phantom 3 Standard efectivamente fue de alrededor de 25 minutos. Este tiempo es suficiente como para sobrevolar el área de estudio del caso, tomar las fotografías necesarias y volver al punto de despegue sin problemas. Incluso, quedaba batería para ejecutar vuelos manuales y obtener fotos oblicuas.

Este equipo es un RPAS por defecto, pues la aplicación recomendada por el fabricante es DJI GO, en la cual el piloto puede apreciar en tiempo real lo que pasa a través del lente de la cámara, ubicar el dispositivo en un mapa, hacer que el dron vuelva al punto de despegue, etc. Funcionó correctamente a la hora de realizar vuelos manuales.

El uso de la aplicación Pix4D Capture también fue un éxito, aunque en ocasiones no reconocía el dispositivo al primer intento y era necesario el reinicio de todos los equipos.

Antes de usar la aplicación anterior, es necesario que el piloto sepa controlar el dron de manera manual, sobre todo al momento del aterrizaje esta habilidad se hizo necesaria, el aparato empieza a descender automáticamente, por las imprecisiones del GPS, lo hacía a un par de metros de donde se había marcado la zona de aterrizaje, fue necesaria la intervención del piloto en todas las maniobras de aterrizaje al utilizar esta aplicación.

Se considera que la elección del equipo y las aplicaciones de manejo fue aceptable para lograr los resultados esperados, los equipos y programas se comportaron según lo esperado.

Software de fotogrametría digital automatizada

El Agisoft Photoscan Professional es el utilizado por los expertos consultados, además por un tema de precio final resulta más económico que sus contendientes, considerando que los 3 tienen capacidades similares para el uso que se les daría en la aplicación de este método.

Si bien cualquiera de estos *software* resulta en una inversión, los productos que se logran con ellos son de valor a veces incalculable, como puede serlo el mostrar un modelo 3D de la construcción a un cliente, o al personal de campo para organizarlo de mejor manera, o generar rápidamente curvas de nivel.

Si no se le va a dar un uso continuo, valdría la pena considerar utilizar uno de los otros *software* con licencias temporales.

Guía para la toma y procesamiento de datos

Con esta guía se pretende explicar de manera sencilla todo el procedimiento desde el reconocimiento inicial del sitio y la planificación, hasta el procesado de las imágenes y el uso de los productos. Asimismo, se ofrecen indicaciones softwares para la correcta ejecución del vuelo y la consideración de las regulaciones nacionales en cuanto al uso de drones.

La primera parte de la guía se basa en experiencias propias del autor al utilizar el equipo y las aplicaciones en un proyecto de construcción real. Ahora bien, Pix4D Capture solo tiene instrucciones de uso general, de allí la importancia de esta sección, su enfoque en el ámbito de la construcción.

Los parámetros de vuelo y la ruta de vuelo e, incluso, la hora en la que se ejecutaría tienen múltiples implicaciones en los resultados, se sintetizaron en palabras sencillas de modo que no hiciera falta que el lector ahonde en el tema de fotogrametría y que aun así pueda obtener buenos resultados. El aporte de Piña (2017) fue muy significativo para esta sección.

Se dieron recomendaciones importantes, que solo pueden ser producto de la experiencia, como cargar los equipos antes de ir al sitio. Puede parecer algo lógico. Sin embargo, no hacerlo puede implicar un enorme atraso o gastos imprevistos.

En relación con la sección de ejecución de vuelo, lo más importante es tener una referencia métrica en sitio si se pretende hacer fotogrametría, con ella se podrá validar la precisión geométrica del modelo posteriormente. Este paso es de suma importancia, sobre todo si no se cuentan con puntos de control en tierra con coordenadas que cuenten con una alta precisión.

Otro aspecto al que se le da importancia en la guía, y se considera vital para que no ocurra un accidente es el aterrizaje. Es necesario que el piloto sepa aterrizar manualmente. Esta recomendación viene también en la guía de Pix4D Capture.

Aunque la guía es un resumen sintético de los pasos a seguir para el correcto vuelo y toma de datos, es necesario que primero se practique en espacios abiertos para evitar accidentes y para familiarizarse con el equipo y su manejo.

El procesamiento de las fotografías se realizó con el programa Agisoft Photoscan, Piña (2017) indicó que hay otros programas similares como Pix4D y DroneDeploy, por lo que se considera que esta sección aplica para cualquiera de estos programas en términos generales. Selección de imágenes, enmascarado, etc.

Es de suma importancia la recomendación que se hace de que los productos estén referenciados en coordenadas proyectadas si se pretende obtener mediciones a partir de estos, las coordenadas geográficas simplemente no aplican en este caso, porque no proporcionan unidades de medición uniformes. Esta opinión es compartida por Piña (2017) y por Esri (s. f. C).

En esta guía se deja de lado el uso de puntos de control con coordenadas precisas, en la realidad estos son un gran apoyo en cuanto a precisión del modelo, de hecho, es recomendable contar con al menos 3 mojones en los límites del sitio de trabajo, con ello no sería necesaria la transformación polinómica de primer orden en Qgis pero sería necesaria su identificación en el procesamiento de las imágenes en Agisoft Photoscan e implica mayor tiempo de oficina en el procesamiento.

El problema con las transformaciones de ráster de Qgis es que son modelos matemáticos útiles cuando no existe información espacial o cuando esta no es precisa, soluciona un problema, pero introduce errores aleatorios en las imágenes. Dependiendo del uso que vaya a dársele a la técnica son tolerados o no, se considera que si la técnica va a ser empleada en el control de obra no hace falta una precisión milimétrica y que los errores de este tipo son tolerables. Pero, el hecho es que, si se requiere un levantamiento de mayor precisión, es necesario contar con los puntos de control en tierra.

Se hace la salvedad que, en productos como las curvas de nivel, el modelo de elevación digital y la cubicación de tierra, se debe contar con puntos de control en sitio y un mayor tiempo de procesamiento en oficina; sería irresponsable afirmar que sin ellos se obtendrán resultados con una buena precisión geométrica, aunque en esta investigación no se valida qué tan desviados de la realidad estarían estos productos sin considerar puntos de control.

Los modelos 3D que se obtienen de esta labor son especialmente útiles como material de apoyo en la comunicación con consultores, clientes y el personal de campo. Es una

herramienta que permite una visión global del proyecto en un instante de tiempo determinado. No debe despreciarse este potencial cualitativo.

Caso

Con el caso ejecutado se validó uno de los posibles usos de los drones en construcción: el registro y medida de avances de actividades de la obra, el ejemplo ejecutado es bastante corto y sencillo. Pero, en contraste, es muy rico en las posibilidades que deja abiertas para el uso de estas tecnologías en el ámbito de la construcción.

En el cuadro 4 se observan las anotaciones realizadas durante el reconocimiento del sitio, se realizaron siguiendo lo indicado en la guía del objetivo 2.

Además de las anotaciones, se muestran las evidencias de las observaciones mediante fotografías tomadas en un vuelo manual, con este se obtuvo la figura 34, en la cual se tiene una visión global del área de interés.

Por otro lado, en la figura 35 se observa el punto que sirvió como zona de despegue/aterrizaje y como estación de control. Desde este punto, fue posible observar al dron en todo momento. Además, las losetas de concreto en el sitio daban una superficie estable sobre la cual despegar y aterrizar, el único obstáculo consistía en el espacio disponible, dado que fue un tanto dificultoso el aterrizaje, aunque se logró con éxito en todas las ocasiones.

Se barajaron otras posibilidades para la zona de despegue/aterrizaje, sin embargo, se descartaron. Un ejemplo de ello era despegar desde la superficie que ofrece el encofrado colocado, el problema radicó en que se generaban interferencias electromagnéticas producto de las varillas armadas para la construcción de vigas, muros y columnas, asimismo, se descarta por la cercanía con la grúa 2.

En la figura 36 se observan los obstáculos identificados en la zona. Para evitarlos, se utilizó una altura de vuelo de 30 m, de modo que la aeronave pudiera maniobrar el espacio libre entre las grúas. Respecto al edificio cercano, la consideración tomada fue en la ruta de vuelo, se procuró que el dron no volara tan cerca de esta zona. Lo anterior produjo un problema de nitidez en los modelos, a falta de información el programa no texturiza bien las paredes y elementos de esta

parte del edificio de parqueo, se podría solucionar con vuelos manuales de baja altura, empero, no se consideró necesario en el momento debido a que la actividad de interés (colocación de formaletas de fondo para losa) aun no llegaba a ese sector del edificio.

Al analizar la figura 37 se prefirió volar solo cuando la grúa estuviera estática y preferiblemente con la pluma lejos del sitio de control.

En la figura 38 se presentan los puntos que usualmente se utilizan como control. Las esquinas de los edificios suelen mantenerse en la misma ubicación siempre. Sin embargo, en el desarrollo del trabajo, no se utilizaron, se prefirió la opción ofrecida por la figura 39, es así por una cuestión de nitidez en las imágenes, resultaba fácil identificar estos puntos entre paneles.

Asimismo, era necesario que los puntos fueran visibles en ambos ortomosaicos, sin embargo, había casos en los que las esquinas de los edificios estaban tapadas con algún objeto (como lo podía ser un toldo improvisado para cubrir una mesa en la que se apoyan los planos) y, por tanto, no eran observables en las fotografías. Son detalles que a veces se pasan por alto en el sitio, de allí la importancia de contar con puntos fácilmente identificables y de los que se tenga certeza que prevalecerán, como lo fueron estos cruces entre paneles, al menos para este caso.

El problema de utilizar los puntos de la figura 39 es que luego de que se cole el concreto en las losas, se perderán. Haciendo imposible georreferenciar un ortomosaico más nuevo sobre estos, por ello es más sano contar con puntos externos como mojones.

La figura 40, en la que se muestra la delimitación del área de estudio, fue especialmente útil a la hora de trazar la ruta de vuelo. Esto porque en el mapa base que trae por defecto la aplicación Pix4D Capture, no se visualiza el edificio, lo que indica una resolución temporal baja, por otro lado, en Google Earth sí se visualizaba el edificio y fue posible hacer un croquis sobre esta imagen y que fue exportable al Pix4D Capture, esto permitió trazar una ruta de vuelo en la que se evitaban cercanías potencialmente peligrosas del edificio aledaño.

En la visita del 17/10/17 se ejecutaron dos vuelos tipo grilla simple en direcciones ortogonales (datos de vuelo registrados en los Cuadros 5 y 6), las rutas son visibles en las figuras 41 y 42, se

tomó esta decisión en el momento por inexperiencia del piloto con la aplicación. No obstante, se optimizó la toma de datos en la segunda fecha, por recomendación de Piña (2017), al planearse un vuelo de grilla doble y, además, se buscó una mejora del texturizado al tomar fotos oblicuas en un vuelo manual.

En los 3 vuelos se utilizó un traslape del 80 % tal como lo recomienda la literatura. Otro parámetro igual en ellos es la altura de vuelo 30 m. Cabe destacar que estos se miden desde la zona de despegue y ocurre que ella se encontraba sobre el nivel del edificio fotografiado, de allí que los informes se registren alturas de vuelo diferentes.

La suma de tiempos de los vuelos 1.1 y 1.2 es 5 minutos 59 segundos, muy similar al tiempo del vuelo 2 de 5 minutos con 51 segundos. Ambos dentro de los 25 minutos que es capaz de soportar el equipo utilizado.

Un aspecto que diferencia a los vuelos del 17 con el del 24 es el ángulo de la cámara, los vuelos en grilla simple permiten que la cámara tome un ángulo cenital, porque de hecho este vuelo es el que se recomienda para levantamientos 2D. Por otro lado, el vuelo en doble grilla llega hasta 80°, lo que logra con esto es poder levantar un poco más de información de las elevaciones (el vuelo en doble grilla es recomendado para levantamientos 3D).

Otro aspecto por analizar es que los vuelos del 17/10/17 se hicieron a medio día, mientras que los del 24/10/17 se hicieron a las 8:05 a. m. por recomendación de Piña (2017). La diferencia es notable en las imágenes, las de la segunda fecha tienen mayor color que las de la primera, debido a los efectos de la luz del sol (la evidencia de esta percepción es visible en los ortomosaicos de las figuras 44 y 45). No obstante, dejando de lado este factor estético, no hubo problemas en el procesamiento de datos en ninguno de los casos y se cumple con la restricción, dada en la guía, de no volar en horas de la tarde.

El día 17/10/17 se tomaron 65 fotografías en modo UAV. El día 24/10/17 se tomaron 78, la diferencia está en el tipo de vuelo. Además, se tomaron otras oblicuas para ayudar al texturizado.

Se esperaba que los ortomosaicos tuvieran diferencias fuertes entre ellos por la forma en que se tomaron las fotografías y por la cantidad de imágenes. No obstante, en el área de interés real, donde se ubicaban los paneles Symons la

densidad de fotografías fue suficiente como para que esta sección del edificio fuera nítida en ambos productos. Según los informes (ver en Apéndices), se lograron resoluciones de 2,71 cm/px en el modelo del 17/10/17 y 2,8 cm/px en el del 24/10/17, esto es suficiente como para que sea observable en la imagen una moneda de 100 colones en el suelo (estas miden 3 cm aproximadamente). Aunque la cantidad de fotos en el segundo modelo es mayor, la resolución es de menor calidad que la primera, probablemente se deba al enmascarado de las fotografías o a las fotografías de apoyo oblicuas de apoyo utilizadas; en cualquier caso, la diferencia es casi imperceptible, con estas resoluciones es más sencillo para el investigador poder ubicar los vectores de manera exacta y precisa, si bien la resolución no implica ninguna de las dos, implícitamente ayuda porque los contornos de los objetos en la imagen se definen mejor.

Ahora bien, sí hubo una diferencia espacial entre modelos (figura 46), fue de 5,6 metros aproximadamente, pero era esperable y corregible. Es producto de las imprecisiones del GPS y la no utilización de puntos de control en tierra con coordenadas precisas. Es un error sistemático que no afecta la geometría del modelo.

Fue necesaria la ejecución de la transformación del ortomosaico del 24/10/17 para que se alineara con la capa de control (el ortomosaico del 17/10/17) se hizo utilizando un modelo polinómico de primer orden. La utilización de estos modelos agrega errores aleatorios al modelo; sin embargo, se tendrán que aceptar para alinear las imágenes, en caso contrario se requerirían puntos de control en tierra, los cuales son obtenidos solo con el equipo topográfico adecuado.

Este modelo se escogió sobre los otros por acoplarse mejor a los requerimientos de la actividad a realizar con los rásteres. Un modelo lineal solo se amarra a un punto, puede ocasionar que la capa transformada se vea rotada sobre la de control, normalmente esta se utiliza cuando el arreglo necesario para el alineamiento es pequeño.

Se prefirió la transformación polinómica de primer orden porque “preserva la colinealidad y permite escalado, traslación y rotación solamente” (Qgis, 2014).

Para la ejecución de este caso, se requiere que el alineamiento entre capas sea óptimo, pues se busca medir un avance, hay que

partir de la premisa de que el avance visualizado en la capa de control también estará en la capa de avance y por lo que servirá de amarre.

De entrada, se aceptan los errores espaciales que en ella pueda haber en la capa de control, lo cual es de poca importancia para este caso de estudio porque lo que se busca es precisión geométrica y que ambos rásteres estén alineados.

El modelo matemático acomoda la capa de avance sobre la de avance, incluso deformando su configuración inicial pues la imagen en este modelo matemático puede ser escalada, trasladada y rotada, pero esto asegura un buen alineamiento entre capas y dado que el ortomosaico de base mantiene su configuración inicial, el transformado no debería distorsionarse excesivamente, pues inicialmente sus geometrías deberían ser similares.

Un modelo de mayor orden no es necesario en este caso, porque no se requiere curvar o doblar el set de datos. Asimismo, un modelo polinómico de bajo orden implica menor tiempo de procesamiento que los de mayor orden.

Otros modelos matemáticos como el *spline*, el de ajuste y el de proyección correctiva, sencillamente no se ajustan a la necesidad de esta transformación, tienen otros usos como la georreferenciación de mapas escaneados.

En las figuras 47 y 48 se observan los puntos de control utilizados, puede notarse que están esparcidos en el área de interés (las losas), lo anterior es válido, puesto que para el caso no interesa medir nada más, Esri (s. f. D) explica sobre las concentraciones de puntos lo siguiente: “si sus datos de destino solo ocupan un cuarto del área de su *dataset* ráster, los puntos (...) se confinarían a esa área de superposición. Así, no es probable que las áreas situadas fuera del área de superposición se alinearan correctamente”.

Este modelo requiere de mínimo 3 puntos según Esri (s. f. D), y de 4, según Qgis (2014). Se utilizaron 11 puntos en total, con el fin de que la zona de estudio se alineara de la mejor forma posible. La adición de mayor cantidad de puntos implica mayor precisión en el alineamiento, pero también trae consigo errores residuales. Sobre esto se indica:

La presencia de más de tres vínculos introduce errores, o errores residuales, que se distribuyen por todos los vínculos. Sin embargo, debería agregar más de tres

vínculos, porque si uno se coloca mal, tiene un impacto mucho mayor en la transformación. Así, aunque el error de transformación matemática pueda aumentar al crear más vínculos, la precisión general de la transformación también aumentará. (Esri, s. f. D)

Es mejor colocar mayor cantidad de puntos, puesto que la colocación de los mismos queda a interpretación del experimentador y siempre que hay intervención humana hay errores.

Queda a criterio del experimentador cual es el punto, al hacer acercamientos en la imagen se aprecian los píxeles y queda al ojo determinar cuál es el punto con coordenadas conocidas, el error se aumenta cuando la colocación de la referencia se hace de forma manual sobre el plano base (como se hizo en este caso), es un error humano, por ello debe hacerlo la misma persona, con el fin de que sea sistemático, la resolución es un factor que puede influir en este caso, pues reduce el área donde puede ubicarse el punto en cuestión, aunque finalmente el error siempre existe.

Una vez que las capas se alinearon y superpusieron, se procedió a cuantificar el error entre estos modelos y la realidad, se hizo al comparar una medida conocida en la realidad con las medidas obtenidas sobre los ortomosaicos en Qgis.

Agisoft (s. f. B) recomienda que en el sitio del levantamiento se coloque una regla o que se conozca la distancia de 2 puntos fijos, con el fin de validar cuan representativo, de la realidad; es el modelo.

La medida de control escogida fue la longitud de los paneles Symons tipo estándar (2,44 m), es una medida arbitraria de la que se conoce el valor exacto, teóricamente 2,44 m es el valor exacto, sin embargo, cabe la posibilidad de que algún panel se encuentre golpeado y que la su longitud se vea afectada, en esta labor se supuso que todos los paneles medidos estaban en perfecto estado y por ende que el valor teórico de su longitud es el valor real de la misma, en sitio, esto incide en el experimento pues incluye errores aleatorios.

Estos paneles aparecen en ambos ortomosaicos, y en su mayoría permanecen en la misma posición. Se escogieron paneles al azar para realizar las mediciones, pero considerando

sus esquinas fueran visibles en ambos ortomosaicos.

Se tomaron 30 medidas en cada ortomosaico para tener una diferencia mínima observable del 30 % y un 95 % de confianza (Lozano-Rivas, 2011). Con este número de muestra se logró un peso estadístico aceptable. Los resultados se observan en el cuadro 8.

Los errores absolutos de cada medida se promedian en 1cm en ambos casos, aunque hay observaciones de hasta 4 cm.

En ambos casos el promedio de las medidas fue de 2,43 m, 1 cm bajo el valor real.

Se calculó el error absoluto de la magnitud para ambos casos, siendo menores a 1 cm en ambos casos. Ello representa 0,11 % de error relativo en el primer caso y 0,10 % en el segundo. Es decir que según estos modelos la medida de longitud de los paneles es de 2,43 m \pm 0,11 % (en el peor caso), lo que significa que la medida real está entre 2,44 m y 2,43 m, lo cual es cierto y valida que el modelo es representativo de la realidad, aunque obviamente tiene incertidumbres producto de errores sistemáticos y aleatorios. El rango incluye al valor exacto en su límite superior.

Ahora, en cuanto a precisión los resultados son satisfactorios, en ambos casos son similares a los que se puede lograr con una cinta métrica 1/1000, la precisión lograda en el primer ortomosaico es de 1/947 y la del segundo 1/1012.

En ambos casos la precisión lograda es casi 5 veces mayor que los resultados logrados con un odómetro, puesto que su precisión es de 1/200, según Lozano-Rivas (2011). Por supuesto también se supera a las medidas que se logran por pasos que rondan precisiones de 1/50 y 1/200.

Entonces, se considera que la precisión lograda en ambos casos es suficiente como para utilizar este producto en la cuantificación de avances de obra.

En la figura 51 se muestra un gráfico de dispersión y la línea recta de mejor ajuste calculada por mínimos cuadrados, el caso perfecto hubiera sido una recta con ecuación $y=x$, donde todas las medidas realizadas en el primer ortomosaico dieran el mismo resultado en el segundo; el coeficiente de correlación (R) en este caso hipotético hubiera sido igual a 1, el hecho es que existen diferencias lo que indica que existen errores de aleatorios y sistemáticos.

No todos los pares tenían coordenadas en los que X y Y fueran iguales, ni se alinearon perfectamente sobre la recta. Aun así, el

coeficiente de correlación lineal registrado es de 0,9263 bastante cercano a la unidad, y demostrando que efectivamente existe una correlación positiva muy fuerte entre los datos.

Habiendo cuantificado la precisión de las mediciones es tan alta como la de los instrumentos utilizados para realizar estimaciones de avance (pasos, odómetro, cinta métrica) y que los resultados promedio difieren en 1 cm de realidad, pero viendo que la desviación media incluye en su rango a la medida teórica, se considera que las medidas logradas son exactas.

Conjuntamente, se nota que existe una correlación muy fuerte entre los datos de ambos ortomosaicos.

Por ello, se valida que la precisión y exactitud son suficientes para cuantificar avances de obra civil (con productos de 2D como lo son estos ortomosaicos en los que no se requiere precisión milimétrica.

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a analizar los resultados aplicados a un ejemplo corto y sencillo, que no deja de ser poderoso pues muestra una posibilidad de aplicación de los UAS, esta técnica gana ventaja cuando lo que se quiere medir queda en lugares peligrosos o de difícil acceso, también abre la puerta a personas con capacidades disminuidas para que puedan realizar chequeos de avance y se disminuya así la brecha de accesibilidad que existe en la industria de la construcción.

En primer lugar, se observa la figura 52 en la que se delimitan con polígonos cada set de encofrados vistos el día 17/10/17, luego en la Figura 53 se observan los mismos polígonos, pero sobre el ortomosaico del 24/10/17. El avance es notable a simple vista, al tomarse como base los polígonos anteriores y colocando polígonos nuevos sobre las áreas de avance se obtiene el resultado de la figura 54. A partir de estos polígonos se obtiene la cuantificación de área avanzada al momento de cada corte, estos resultados se visualizan en el cuadro 9, y también se observa el avance de la semana al efectuar una resta entre el total avanzado el 24/10/17 y el total avanzado el 17/10/17, se logra cuantificar un avance de 2,33 % en la semana.

En este caso, se añadan errores puesto que algunas esquinas no son visibles por objetos en medio como un toldo que protege una mesa de planos, por ello quedó a criterio del observador ubicar las esquinas, en este caso al ser una

estimación de avance de obras estos errores pueden tolerarse.

Siguiendo la lógica de este ejercicio esta técnica podría aplicarse en una variedad de actividades como medir el avance en colocación de techos o la colocación de enchapes, la determinación de áreas que en sitio son complicadas como piscinas o fuentes sin bordes rectos, asimismo podría ser útil para medir monitoreo de colocación de zacate, entre otros.

A modo de ejemplo se presentan otros productos cuyo uso puede tener mucho valor para el Ingeniero encargado de la obra. El caso es un modelo 3D texturizado del edificio estudiado en el caso de los ortomosaicos, fue creado a partir de las fotografías del 24/10/17 (figura 55). Se observa que las paredes frontales se encuentran un tanto distorsionadas, se podría resolver mediante la adición de más fotografías oblicuas en ese plano, sin embargo, este no era el objetivo del vuelo realizado, si o la superficie de encofrados, cuya nitidez es buena. Este producto puede tener grandes beneficios a la hora de comunicarse con el personal de campo, puede funcionar como material de apoyo cuando se asignan tareas, es más fácil también localizar errores constructivos y ubicar a las personas en el espacio.

Presentar esta herramienta a los consultores también puede ser beneficioso para comunicación de las partes y la conceptualización de lo que se tiene en sitio. Otra ganancia de estos modelos 3D puede obtenerse al momento de interactuar con los clientes, puesto que se presenta de modo gráfico el avance de la construcción en un momento del tiempo determinado, incluso se puede exportar a software de renderizado y hacer proyecciones o plantear cambios y visualizar a modo de anteproyecto como quedarían las extras, facilitando la toma de decisiones.

Posteriormente, se muestra que es posible también obtener curvas de nivel, modelos de elevación digital y hasta perfiles como se ejemplifica en las figuras 56 y 57, en este caso se presenta la ladera que se encuentra frente a la planta de tratamiento del proyecto estudiado, las incertidumbres asociadas a este resultado no se calcularon, por lo que este queda como un producto demostrativo para darse una idea de lo que hay en campo o bien para tomar alguna decisión rápida en la que la precisión y exactitud

no sea vital. Dado que para obtener resultados finos deben utilizarse puntos de control en tierra, eliminarse los árboles y la vegetación y clasificarse los puntos que representan el suelo, en general optimizar el modelo. Lo cual, es un proceso más laborioso, que corresponde a otras disciplinas como la topografía.

El análisis anterior también aplica para la estimación de volúmenes como se muestra en el apilamiento de las figuras 58 y 59, pero no se contaba con una referencia por lo cual no se pudo validar el caso.

También es posible determinar el volumen entre dos capas en herramientas como Civil 3D, algo que tiene aplicaciones en el control de movimientos de tierra y en el inventario de apilamiento de agregados.

El modelo como se plantea en esta investigación aplicaría para ejercicios en los que se admite obtener una estimación gruesa, puesto que un número fino requiere de mayor trabajo, pero esfuerzos anteriores de otros investigadores demostraron que es posible como Neitzel y Klonowski (2011).

En general, la técnica presentada es útil para el control reactivo y proactivo, cuya principal fuente de información viene de sitio. Esta es una manera de obtener información continua y de paso llevar un registro fotográfico y 3D de los exteriores de la obra, puede verse el avance general.

Asimismo, funciona en el control físico y financiero, puesto que se puede calcular la cantidad de obra avanzada y correlacionarla con el dinero invertido en material y planilla en la ejecución de esa actividad. Por otro lado, también funciona para el inventario de materiales de apilamiento como los agregados.

Conclusiones

La finalidad de esta investigación fue crear una metodología que facilite y agilice la toma de datos, para determinar de manera cuantificable los avances de obra de construcción, mediante el uso de drones (con precios que pueden rondar de 500 USD a 1000 USD), *software* comerciales para la fotogrametría digital automatizada y sistemas de información geográfica, de modo que sea asequible para pequeñas y medianas empresas constructoras.

El aporte principal es hacer que el método sea sencillo económico y apto para el uso cotidiano de los ingenieros en construcción en proyectos como edificios habitacionales, sin dejar de lado la seguridad; es el principal aporte de esta investigación.

Para alcanzar este propósito, se tenían 3 objetivos específicos:

- Definir el equipo y *software* requerido para realizar las mediciones fotogramétricas.
- Generar una guía del método de toma de información y su procesamiento fotogramétrico.
- Dar validez al método fotogramétrico mediante un caso real donde se cuantifique el avance de actividades específicas.

Del primero se concluye que el Phantom 3 Standard y, en general, los drones de uso personal que cumplan con las características mínimas expuestas en este trabajo, pueden ser una herramienta útil para el ingeniero en construcción. Los resultados y el desempeño obtenidos de este equipo fueron los esperados.

Asimismo, se escogió el Agisoft Photoscan Professional como programa de fotogrametría digital automatizada porque la relación entre sus características y su precio superan las de otros programas, al menos para la actividad que se plantea en este proyecto. Se pudo usar el *software* a satisfacción. La limitación de

este *software* respecto a los otros analizados es que no cuenta con licencias temporales, que resultan una opción viable si se ejecutan trabajos de este tipo solo esporádicamente.

El producto obtenido del segundo objetivo fue una guía en la cual se explica al lector de manera sencilla la forma de ejecutar esta técnica en un ambiente de construcción, aunque se utiliza el equipo y *software* definidos en el primer objetivo, en el fondo la técnica es adaptable a otras herramientas.

El método presentado resulta satisfactorio para estimar avances en actividades como la colocación de encofrados de fondo de losa, se demostró con la validación realizada en el caso del objetivo 3, a partir del cual se concluye que si lo que se quiere medir admite errores de hasta el 1/1000, esta técnica es aplicable, siempre que la medida sea realizada en un ortomosaico. Se logra cuantificar un avance de 2,33 % en la semana, unos 43,53 m².

Aplicaciones en 3D como la obtención de curvas de nivel y el cálculo de movimiento de tierras quedan relegadas a estimaciones gruesas en este análisis, puesto que no fue demostrable el nivel de precisión que se podía obtener y es conocido que otros autores lo han logrado, pero por medio de procesos más laboriosos; queda abierto para otra investigación el tema de validación de la metodología presentada a productos 3D.

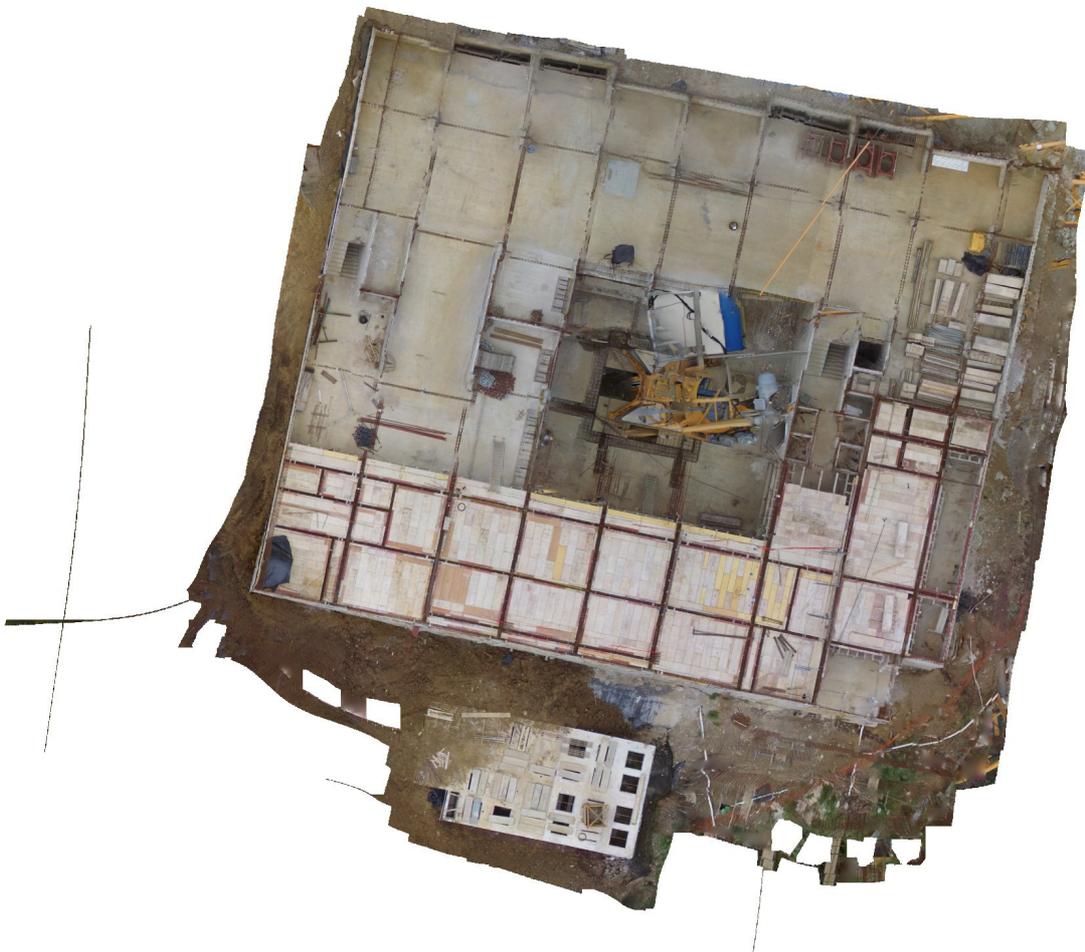
Apéndices

Se ajuntan como apéndices las siguientes producciones:

1. Reporte del ortomosaico 17/10/17
2. Reporte del ortomosaico 24/10/17
3. Cuadro de las áreas de encofrados medidas sobre el ortomosaico del 17/10/17
4. Cuadro de las áreas de encofrados medidas sobre el ortomosaico del 24/10/17

Reporte 17/10/17

Reporte: Edificio de parques 17/10/17
17 November 2017



Survey Data

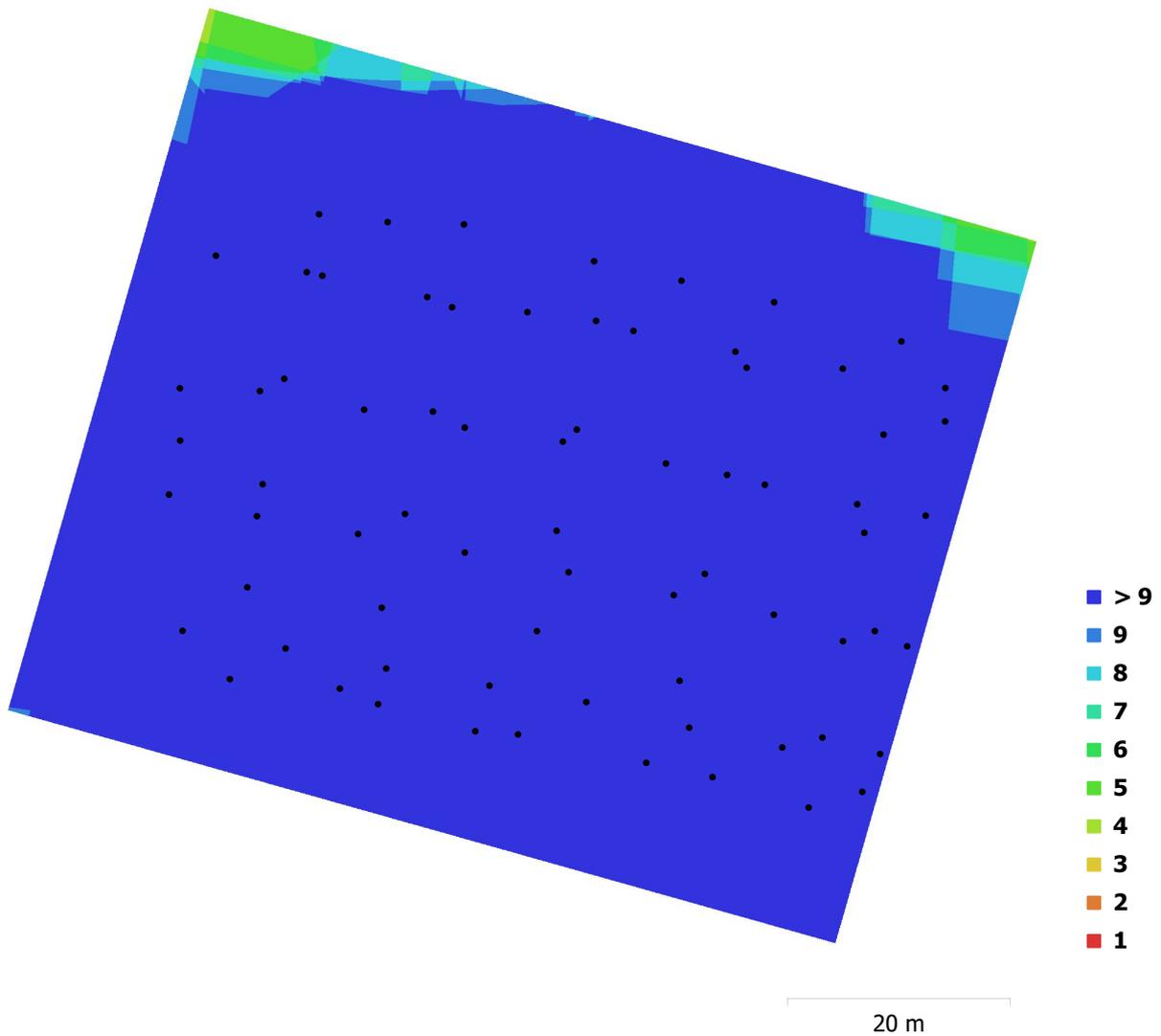


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	72	Camera stations:	72
Flying altitude:	39.8 m	Tie points:	36,231
Ground resolution:	1.36 cm/pix	Projections:	181,387
Coverage area:	5.07e+03 m ²	Reprojection error:	1.07 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC300C (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

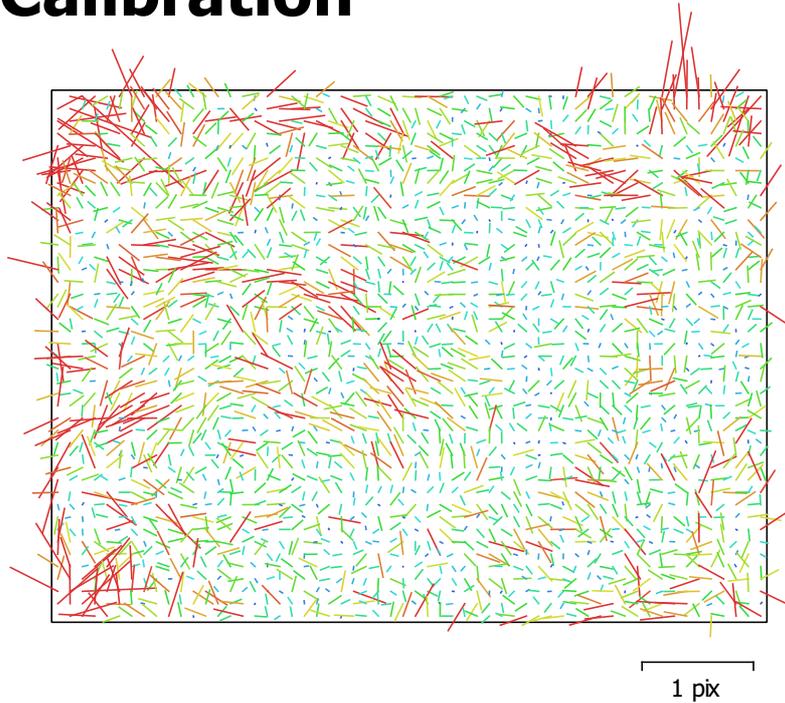


Fig. 2. Image residuals for FC300C (3.61 mm).

FC300C (3.61 mm)

72 images

Type
Frame

Resolution
4000 x 3000

Focal Length
3.61 mm

Pixel Size
1.56 x 1.56 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2675.16	0.71	1.00	0.62	0.27	-0.14	-0.06	-0.17	0.50	-0.18	0.08	0.07
Cx	-0.0152433	0.077		1.00	0.18	-0.14	-0.01	-0.15	0.31	-0.11	0.57	0.03
Cy	73.4206	0.06			1.00	-0.03	-0.05	-0.03	0.15	-0.08	0.04	0.74
B1	-7.14142	0.013				1.00	0.01	0.03	-0.10	0.06	-0.08	-0.03
B2	-0.840582	0.013					1.00	0.02	-0.02	0.01	0.05	-0.07
K1	-0.13761	0.00012						1.00	-0.76	0.78	0.29	0.07
K2	0.128098	0.00024							1.00	-0.93	-0.02	0.02
K3	-0.0317629	0.00017								1.00	0.08	-0.00
P1	-0.000190653	7e-06									1.00	0.04
P2	-0.000205324	5.4e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

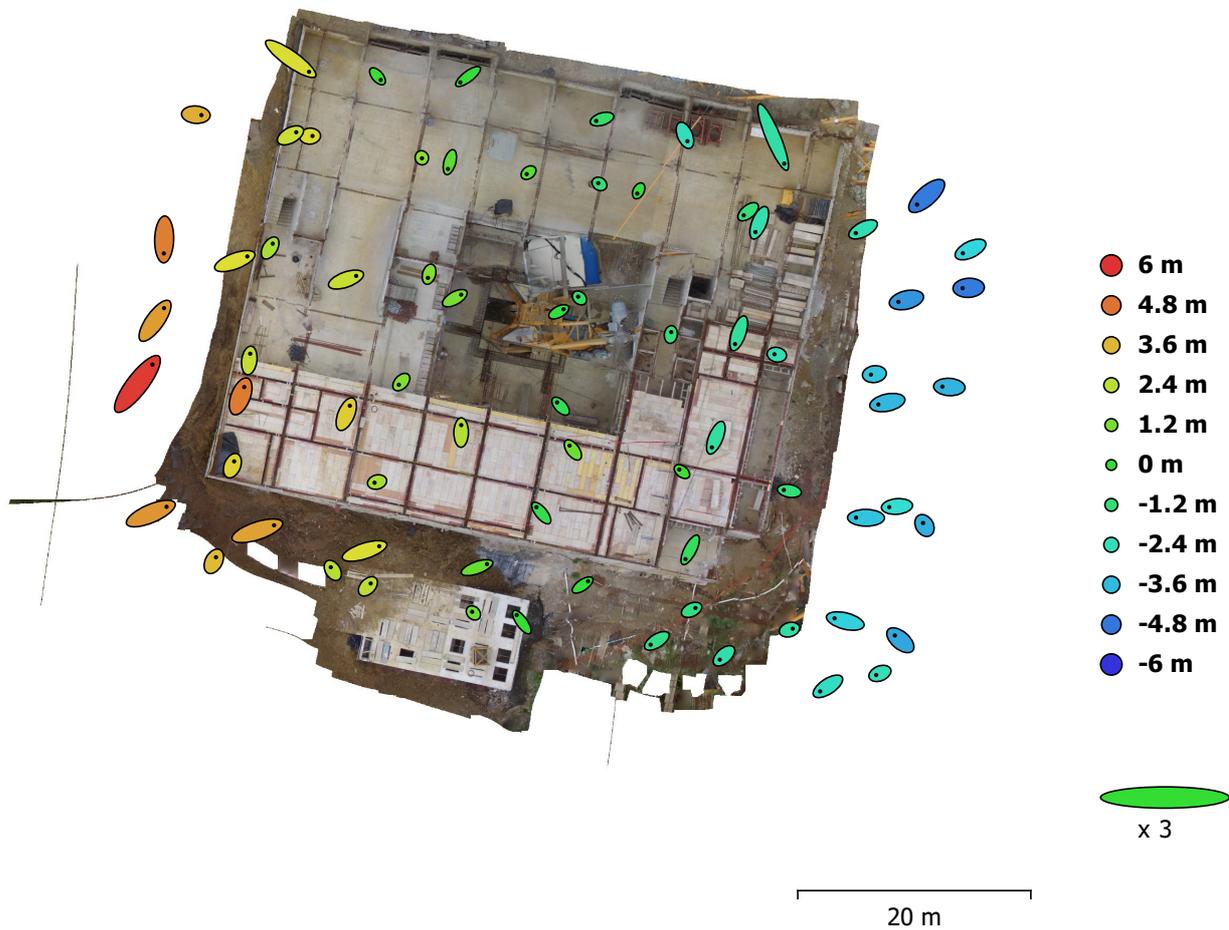


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
 Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.389046	0.373565	2.65373	0.539359	2.70798

Table 3. Average camera location error.
 X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Camera Orientations

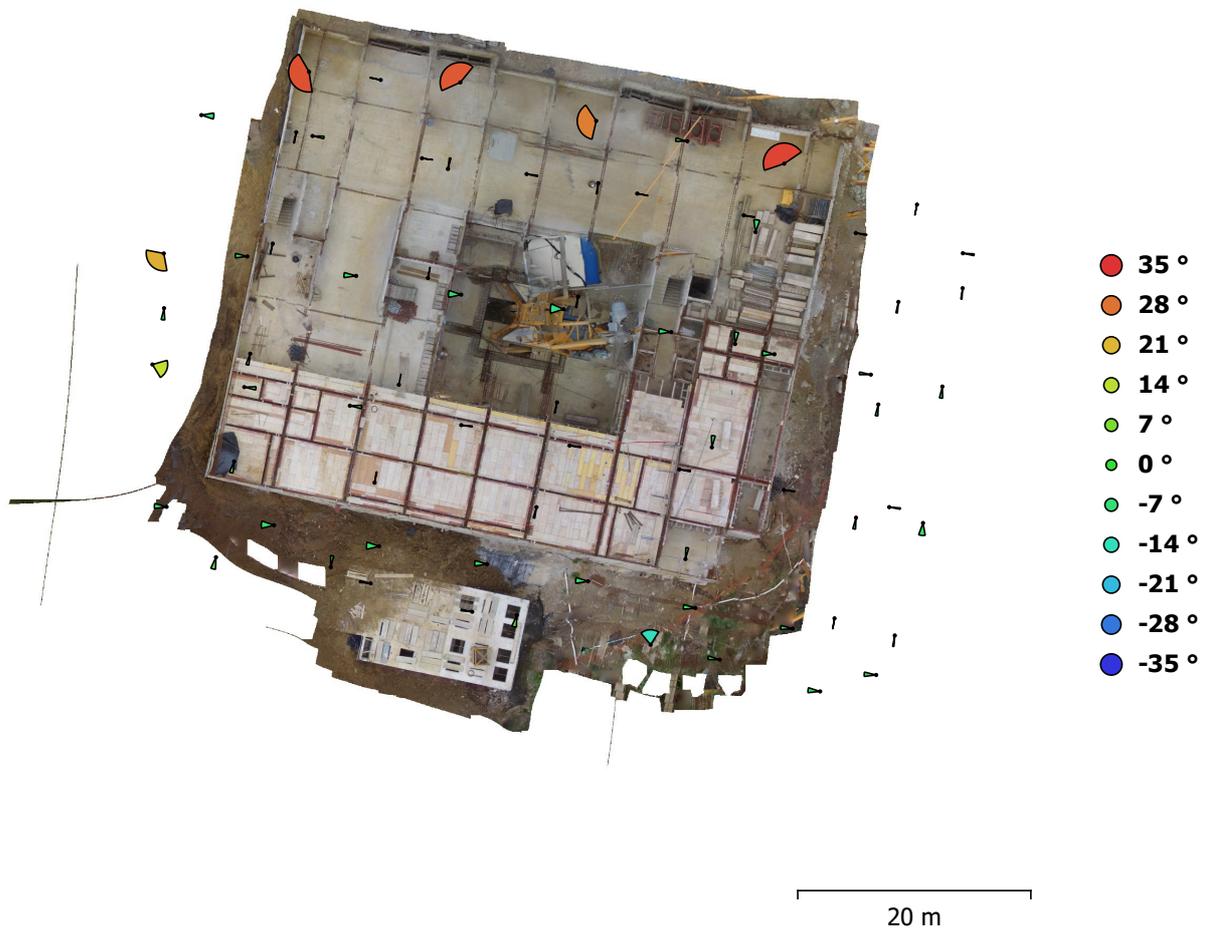


Fig. 4. Camera orientations and error estimates.
Arcs represent yaw error estimates.

Yaw error (°)	Pitch error (°)	Roll error (°)	Total error (°)
8.72133	6.05807	5.53971	11.9771

Table 4. Average camera rotation error.

Digital Elevation Model

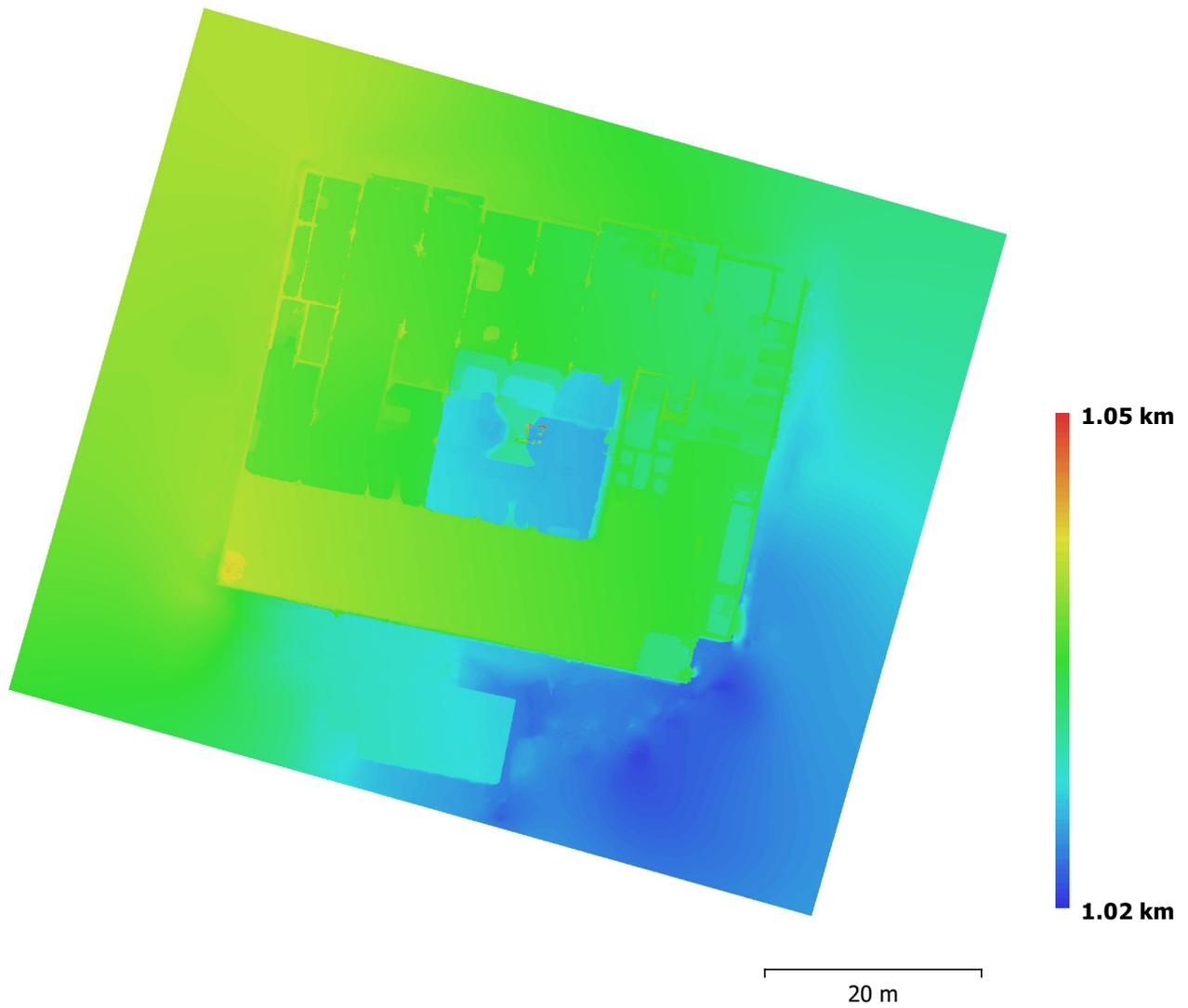


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.71 cm/pix
Point density: 13.6 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	72
Aligned cameras	72

Shapes

Points	1
Polylines	18
Polygons	1746
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	36,231 of 54,897
RMS reprojection error	0.246951 (1.06715 pix)
Max reprojection error	0.763455 (39.6729 pix)
Mean key point size	4.07687 pix
Effective overlap	6.92373

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	Yes
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	10 minutes 36 seconds
Alignment time	50 seconds

Dense Point Cloud

Points	6,197,121
--------	-----------

Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	2 hours 51 minutes
Dense cloud generation time	10 minutes 28 seconds

Model

Faces	1,239,114
Vertices	619,712
Texture	4,096 x 4,096, uint8

Reconstruction parameters

Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	1,239,424
Processing time	17 seconds

Texturing parameters

Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
UV mapping time	12 seconds
Blending time	1 minutes 59 seconds

Tiled Model

Reconstruction parameters

Source data	Mesh
Tile size	4096

Processing time	10 minutes 13 seconds
DEM	
Size	3,394 x 3,113
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	7 seconds
Orthomosaic	
Size	6,788 x 6,226
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Channels	3, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 minutes 7 seconds
Software	
Version	1.3.4 build 5067
Platform	Windows 64

Reporte 24/10/17

Reporte: Edificio de parques 24/10/17
17 November 2017



Survey Data

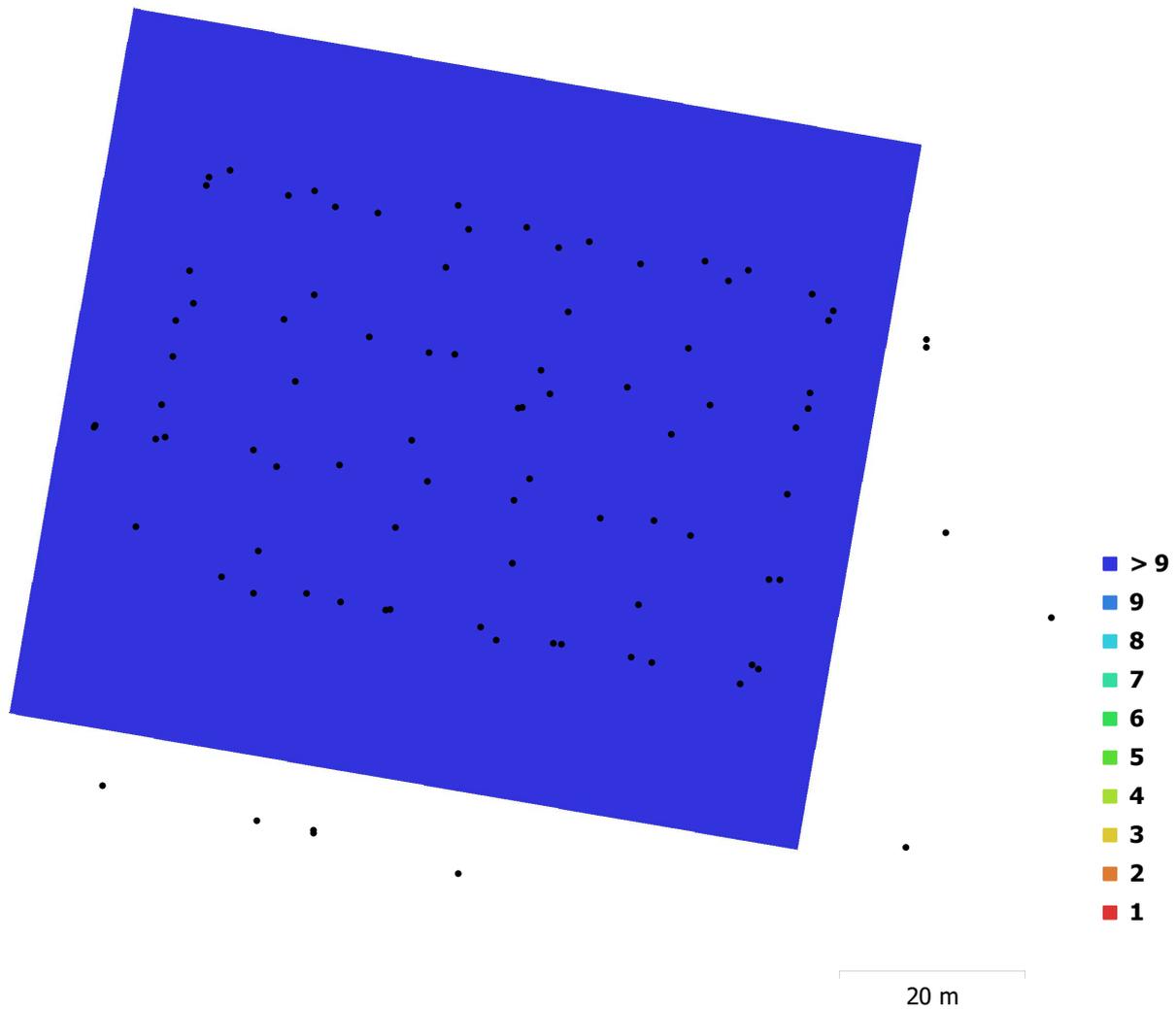


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	90	Camera stations:	90
Flying altitude:	40.7 m	Tie points:	63,136
Ground resolution:	1.4 cm/pix	Projections:	243,056
Coverage area:	6.69e+03 m ²	Reprojection error:	0.948 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC300C (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56 x 1.56 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

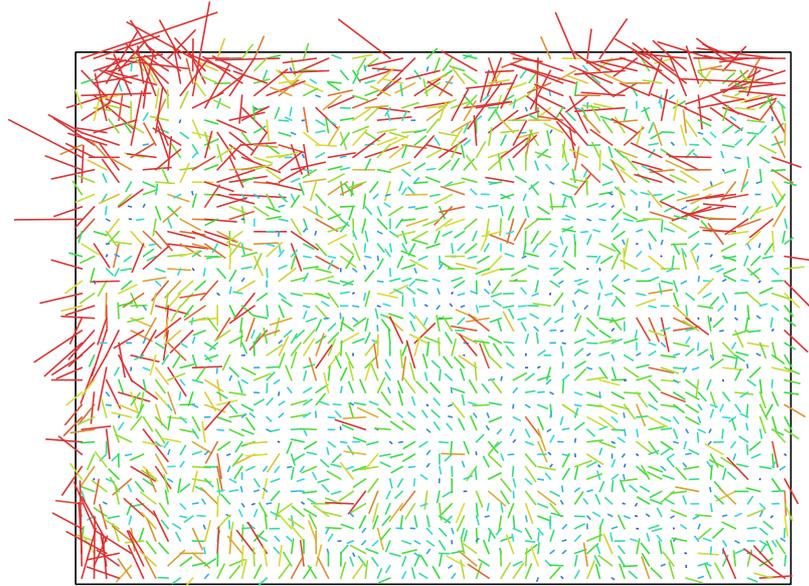


Fig. 2. Image residuals for FC300C (3.61 mm).

FC300C (3.61 mm)

90 images

Type
Frame

Resolution
4000 x 3000

Focal Length
3.61 mm

Pixel Size
1.56 x 1.56 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2707.8	0.24	1.00	0.25	-0.79	0.12	0.06	-0.02	0.18	-0.04	0.07	-0.16
Cx	0.813682	0.056		1.00	-0.20	0.02	0.21	-0.01	0.02	0.03	0.72	-0.01
Cy	72.7388	0.086			1.00	-0.22	-0.10	-0.04	-0.06	-0.04	-0.04	0.33
B1	-7.31966	0.014				1.00	0.13	-0.19	0.02	-0.01	-0.07	0.36
B2	-0.802297	0.012					1.00	-0.11	0.03	-0.03	-0.09	0.19
K1	-0.137522	7.6e-05						1.00	-0.88	0.85	0.10	-0.39
K2	0.131999	0.00019							1.00	-0.97	-0.03	0.08
K3	-0.0314532	0.00015								1.00	0.05	-0.11
P1	-0.000312591	5.3e-06									1.00	-0.18
P2	-0.000197773	7.2e-06										1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

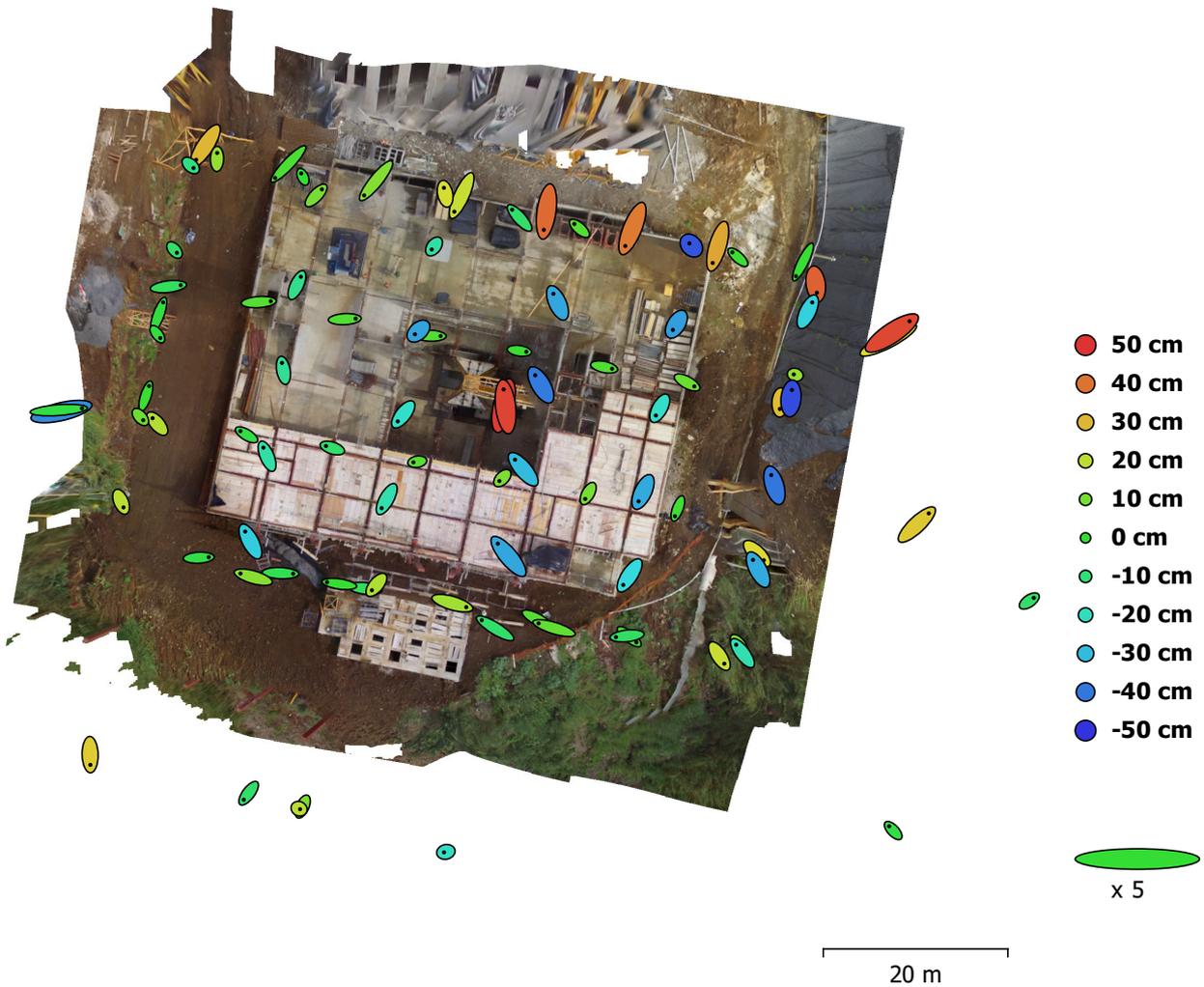


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
34.9523	35.4994	22.3051	49.8184	54.5837

Table 3. Average camera location error.

X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

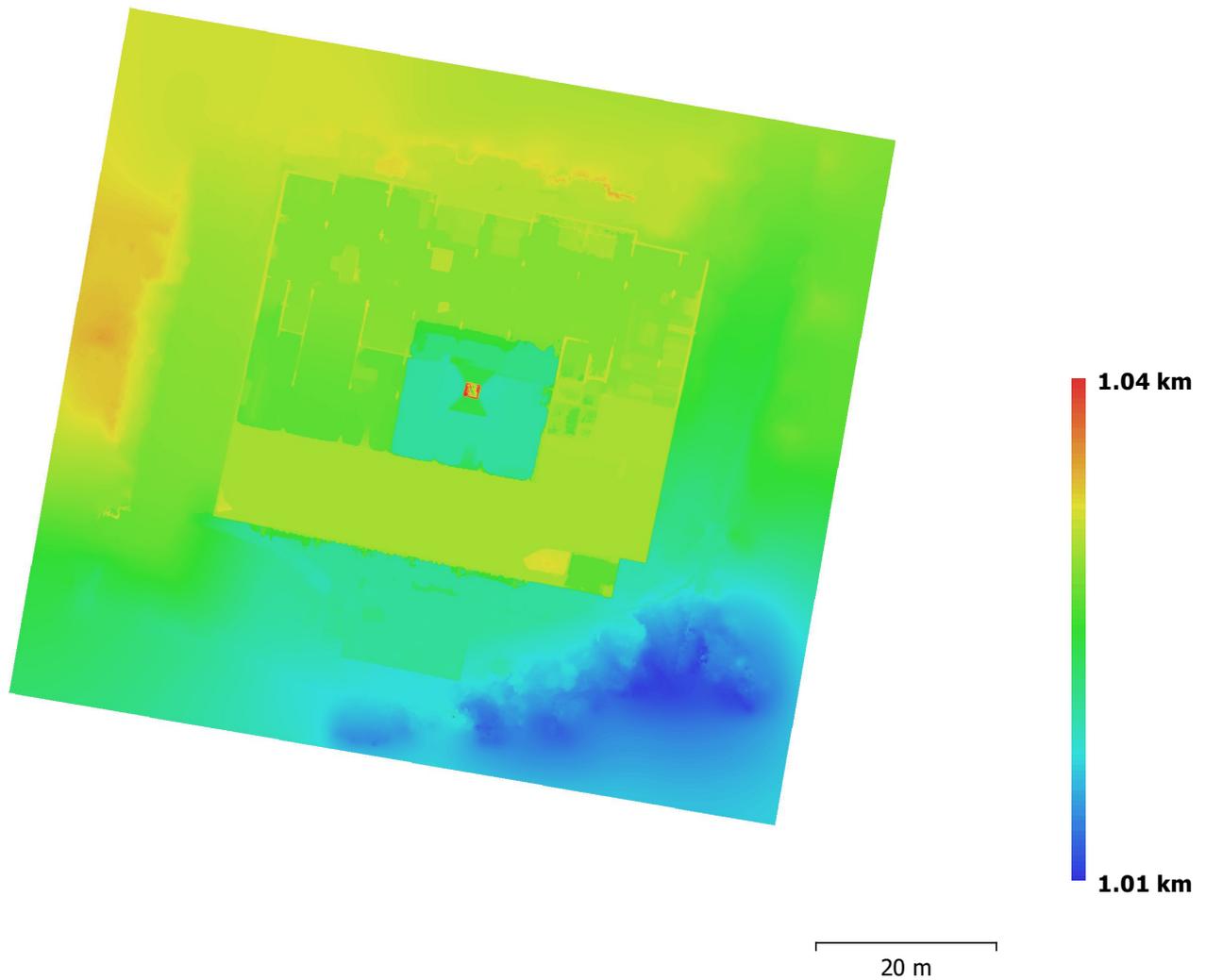


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.8 cm/pix
Point density: 12.8 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	90
Aligned cameras	90

Shapes

Points	1
Polylines	24
Polygons	1971
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	63,136 of 78,747
RMS reprojection error	0.21933 (0.948297 pix)
Max reprojection error	0.67358 (31.882 pix)
Mean key point size	4.10816 pix
Effective overlap	5.19179

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Constrain features by mask	Yes
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	13 minutes 4 seconds
Alignment time	51 seconds

Dense Point Cloud

Points	8,681,699
--------	-----------

Reconstruction parameters

Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	2 hours 54 minutes
Dense cloud generation time	18 minutes 37 seconds

Model

Faces	1,736,009
Vertices	868,168
Texture	4,096 x 4,096, uint8

Reconstruction parameters

Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	1,736,336
Processing time	19 seconds

Texturing parameters

Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	No
Enable hole filling	No
UV mapping time	17 seconds
Blending time	2 minutes 52 seconds

Tiled Model

Reconstruction parameters

Source data	Mesh
Tile size	4096

Processing time	12 minutes 40 seconds
DEM	
Size	3,509 x 3,264
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	8 seconds
Orthomosaic	
Size	7,018 x 6,528
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Channels	3, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
Processing time	1 minutes 43 seconds
Software	
Version	1.3.4 build 5067
Platform	Windows 64

Cuadro de las áreas de encofrados medidas sobre el ortomosaico del 17/10/17

Identificación	Área
1	18,79
2	3,03
3	26,10
4	2,64
5	18,15
6	18,65
7	2,70
8	2,56
9	18,13
10	26,15
11	2,92
12	18,08
13	12,73
14	5,23
15	15,78
16	3,93
17	4,26
18	4,75
19	6,16
20	7,10
21	5,90
22	21,88
23	5,96
24	22,36
25	5,78
26	21,88
27	7,06
28	26,51
29	9,46
30	11,75
31	21,96
32	26,79
33	39,48
34	4,37
35	5,09
36	5,08
37	4,74
38	5,12
Sumatoria	469,01

Cuadro de las áreas de encofrados medidas sobre el ortomosaico del 24/10/17

Identificación	Área
1	18,79
2	3,03
3	26,10
4	2,64
5	18,15
6	18,65
7	2,70
8	2,56
9	18,13
10	26,15
11	2,92
12	18,08
13	12,73
14	5,23
15	15,78
16	3,93
17	4,26
18	4,75
19	6,16
20	7,10
21	5,90
22	21,88
23	5,96
24	22,36
25	5,78
26	21,88
27	7,06
28	26,51
29	9,46
30	11,75
31	21,96
32	26,79
33	39,48
34	4,37
35	5,09
36	5,08
37	4,74
38	5,12
39	0,77
40	0,81
41	0,31
42	7,81

43	0,11
44	12,42
45	21,46
46	5,26
47	0,05
Sumatoria	518,01

Anexos

Se incluyeron 8 anexos en este documento, en primer lugar, se presenta las especificaciones técnicas de los drones que se tuvieron en cuenta a la hora de la selección. Fueron obtenidas de los manuales de usuario de los equipos o directamente de las páginas web de los fabricantes.

Posteriormente se adjunta la transcripción de la entrevista realizada al Ingeniero Geodesta Alexis Piña (2017).

Finalmente se anexa la normativa nacional vigente en Costa Rica, la Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS. Operaciones con sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS). En ella se presentan las regulaciones establecidas por la Dirección General de Aviación Civil.

Estos documentos sirvieron de apoyo a la hora de realizar la investigación y podrían resultar de interés para el lector.

Especificaciones del DJI Phantom 3 Standard

Especificaciones	
Aeronave	
Peso (incl. batería y hélices)	1216 g
Velocidad de ascenso máx.	5 m/s
Velocidad de descenso máx.	3 m/s
Velocidad máx.	16 m/s (modo A, sin viento)
Altitud máxima sobre el nivel del mar	6000 m
Tiempo de vuelo máx.	Aprox. 25 minutos
Temperatura de funcionamiento	De 0° a 40° C
Sistema GPS	GPS incorporado
Gimbal	
Intervalo controlable	Inclinación: De -90° a +30°
Intervalo de vibración angular	±0,02°
Cámara	
Sensor	1/2.3"
Resolución de fotos	12 megapíxeles
Objetivo	94° FOV, 20 mm (equivalente a formato de 35 mm) enfoque f/2.8 a ∞
Intervalo de ISO	100-3200 (vídeo) 100-1600 (fotos)
Velocidad obturador electrónico	8 s - 1/8000 s
Tamaño de imagen máximo	4000 x 3000 píxeles
Modos de fotografía fija	Un disparo
	Modo de ráfaga de fotos: 3/5/7 disparos
	Horquilla de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas horquillados con sesgo de 0,7 EV
	Disparo a intervalos
Modos de grabación de vídeo	2,7 K: 2704x1520p30
	FHD: 1920x1080p 24/25/30 HD: 1280x720p 24/25/30/48/50/60
Tasa de bits máx. de vídeo	40 Mbps
Formatos de archivo admitidos	FAT32/exFAT
	Fotografía: JPEG, DNG Vídeo: MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Tipos de tarjetas SD admitidas	MicroSD, Capacidad máxima: 64 GB Clase 6 o superior
Temperatura de funcionamiento	De 0° a 40° C
WiFi	
Frecuencia de funcionamiento	De 2400 GHz a 2483 GHz
Distancia máxima de transmisión	FCC: 1000 M; CE: 500 m (al aire libre y sin obstáculos, altitud de la aeronave a 120 m/400 pies)
Potencia de transmisión (EIRP)	FCC: 27 dBmCE: 20 dBm

Especificaciones de los drones DJI Spark, Phantom 4 Advance y Phantom 3 SE

Price	USD \$499	USD \$1199	USD \$599
Dimensions	143×143×55 mm(L×W×H)	289.5× 289.5 ×196 mm(L×W×H)	289.5× 289.5 ×196 mm(L×W×H)
Weight	300g	1368g	1236g
Flight Performance	Max Flight Time: 16 minutes Max Speed: 50kph(S - mode) ¹⁾ 21 kph(P - mode)	Max Flight Time: 30 minutes Max Speed: 72kph(S - mode) 50kph(P - mode)	Max Flight Time: 25 minutes Max Speed:57 kph(P - mode)
Intelligent Flight Modes	Advanced Gesture QuickShot ActiveTrack TapFly Tripod	ActiveTrack Tapfly Tripod Mode Draw Gesture Mode Point of Interest Course Lock Home Lock Follow me Waypoints	Point of Interest Course Lock Home Lock Follow me Waypoints
Photography	2-Axis Mechanical Gimbal + UltraSmooth 1/2.3" CMOS Max Video Resolution: 1080p Max Photo Resolution: 12MP	3-Axis Mechanical Gimbal 1" CMOS Mechanical Shutter Max Video Resolution: 4K@60fps Max Image Size: 30MP	3-Axis Mechanical Gimbal 1/2.3" CMOS Max Video Resolution: 4K@30fps Max Image Size: 12MP
Obstacle Sensing	Forward Obstacle Sensing: 0.2- 5 m.	Forward obstacle sensing: 0.7- 15 m	/
Control Modes	Gesture Intelligent Mobile Device Remote controller	Remote Controller	Remote Controller
Max Transmission Distance (Unobstructed, Free Of Interference)	Intelligent Mobile Device: 100 m Remote Controller: 2.412- 2.462 GHz FCC: 2000 m CE: 500 m SRR: 500 m 5.745- 5.825 GHz FCC: 2000 m CE: 300 m SRR: 1200 m	Remote Controller : 2.400- 2.483 GHz FCC: 7000 m CE: 3500 m SRR: 4000 m	2.400- 2.483 GHz FCC: 4000 m CE: 500 m SRR: 500 m 5.725- 5.825 GHz FCC: 4000 m CE: 400 m SRR: 3000 m

Especificaciones del Parrot Disco

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

DIMENSIONES

- Tamaño: 1.150 mm x 580 mm x 120 mm
- Envergadura: 1.150 mm

RENDIMIENTO

- Motor 1.280 kV
- Servomotor 5 V
- Receptor de RF disponible SBUS, SUMD

SENSORES

- Ultrasonido
- Altimetro
- Cámara con desenfoque óptico
- Sensor Airspeed (Pitot tube)

WI-FI Y TRANSMISIONES

- Redes de puntos de acceso
- Wi-Fi AC-type (2,4 GHz), MIMO*
- Hasta 2 km con Parrot Skycontroller 2

PESO

- 750 g
- Espuma PPE y tubo de carbono
-

VÍDEO E IMAGEN

- Cámara 1.080p Full HD
- Video streaming: 360p / 720p

SISTEMA DE NAVEGACIÓN DE INERCIA

- giroscopio de 3 ejes
- acelerómetro de 3 ejes

BATERÍA DESMONTABLE

- 2.700 mAh / Batería 3 células Lipo
- Duración de la batería: 45 minutos

PERFORMANCE

- GPS integrado: GPS + GLONASS
-

SOFTWARE

- SDK Linux Open Source para el desarrollo de la aplicación

HARDWARE

- CPU Dual core A9
- Memoria flash interna: 32 GB

Especificaciones del Walkera Vitus

Aircraft

Main Rotor Dia.:	177mm
Dimensions (L x W x H) :	229x279x133mm
Weight:	890g(batteries included)
Remote Controller :	DEVO F8S
Main board:	VITUS 320
Brushless Motor:	WK-WS-28-017A
Brushless ESC:	VITUS 320
Battery:	11.4V 5200mAh LiPo 3S
Flight Time:	22minutes for positioning flight (with10% battery level residual) 25minutes for ultimate flight
Working temperature:	-10°C~+40°C

Gimbal

Controllable turn range:	-90°~ 0° pitch
---------------------------------	----------------

Optical flow visual positioning system

Operating environment:	Surfaces with rich patterns, and sufficient illumination (more than15 lux, indoor lights are on)
-------------------------------	--

Camera

Image Sensor:	SONY: 1/2.3" CMOS; pixel 12MP
Lens:	FOV 85° ; 4.4mm; f/2.8 aperture
ISO Scope:	100-12800
E-shutter:	1/2-1/8000
Photo resolution:	4000x3000(12MP) 3840x2160(8MP)
Record resolution:	UHD: 3840x2160(4k) 30fps FHD: 1920x1080 30fps/60fps
Max. code rate of video storage:	64Mbit/s
Supported file system & format:	Fat32; exFat
Picture format:	JPEG
Video format:	MP4
Memory card supported:	Micro SD card , max. 64G

Especificaciones del Parrot Bebop

Connectivity	Wi-Fi 802.11a/b/g/n/ac
<p>Wi-Fi antennas: MIMO dual-band with 2 double-sets of dipole antennas for 2.4 and 5 GHz (fig.7)</p> <p>Sending power: Up to 21dBm</p> <p>Signal range: Up to 250 meters</p>	
Structure	High-resistance
<p>4 Brushless Outrunner motors (fig.3)</p> <p>Glass fiber reinforced (15%) ABS structure (fig.4)</p> <p>High-resistance EPP outdoor hull: Clip and unclip easily to adapt to indoor and outdoor flight, protects the propellers against potential bumps, can be removed to reduce wind factor (fig.9)</p> <p>Three-blade auto-block propellers in Polycarbonate with fast disassembly system (fig.5)</p> <p>Anti-vibration bumpers (fig.10)</p>	
Speed	13 m/s
Camera	CMOS 14Mpx, 1/2.3"
<p>*Camera with "Fisheye" lens 180° 1/2,2": 6 optical elements and 14 Mega pixels sensor (fig.2)</p> <p>Video stabilization: Digital on 3-axes</p> <p>Video definition: 1920x1080p (30fps)</p> <p>Photo definition: 4096x3072 px</p> <p>Video encoding: H264</p> <p>Photo file format: JPEG, RAW, DNG</p> <p>Internal memory: Flash 8 GB</p>	
Battery	Lithium Polymer
<p>Lithium Polymer 1200 mAh</p> <p>Flight time: 22 minutes with 2 batteries included</p>	

Processor	CPU: Dual-Core
<p>Motherboard: (fig.1)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Parrot P7 dual-core CPU Cortex 9 - Quad core GPU - 8Gb flash memory <p>All fixed on a magnesium shelf that acts as electromagnetic shielding and as a radiator</p> <p>Operating system: Linux</p> <p>Developping: Open-source SDK</p>	
Sensors	3-axes
<ul style="list-style-type: none"> 3-axes magnetometer 3-axes gyroscope 3-axes accelerometer (fig.6) Optical-flow sensor (fig.8): Vertical stabilization camera (Every 16 milliseconds, an image of the ground is taken and compared to the previous one to determine the speed of the Bebop Drone) Ultrasound sensor (Analyzes the flight altitude up to 8 meters) Pressure sensor 	
Geo-location	GNSS
<p>GNSS (GPS + GLONASS) (fig.6)</p>	
Dimensions	28x32x3.6cm
<p>28x32x3.6cm without the hull</p> <p>33x38x3.6cm with the hull</p>	
Weight	400g
<p>With battery, 400g without the hull and 420g with the hull</p>	
Compatibility	
<p>iOS, Android, Windows Phone Smartphones/tablets</p>	

Especificaciones del Parrot Bebop 2

PARROT BEBOP 2 POWER

PESO:

- 525g

SENSORES:

- **Ultrasonidos**
- **Altímetro**
- **Sistema de posicionamiento óptico (VPS)**

SISTEMA DE NAVEGACIÓN INERCIAL:

- **Giroscopio de 3 ejes**
- **Acelerómetro de 3 ejes**
- **Magnetómetro de 3 ejes**

WI-FI Y TRANSMISIONES:

- **Wi-Fi 802,11 a/b/n/ac**
- **Wi-Fi MIMO con antenas 2,4 GHz**
- **Alcance de la señal: hasta 2 km con el Parrot Skycontroller 2, sin obstáculos ni interferencias.**

BATERÍA EXTRAÍBLE:

- **Batería de 3350 mAh**
- **Autonomía de la batería: 30 minutos**

MATERIAL:

- **Procesador Parrot P7 Dual Core**
- **Memoria flash interna de 8 GB**
- **Sistema de localización vía satélite: GPS + GLONASS**

RENDIMIENTO:

- **Motor de 1280 kV**

VÍDEO Y FOTO:

- Cámara **CMOS** gran angular de **14 megapíxeles** con 2 formatos de imagen: **JPEG** y **Adobe DNG RAW**
- Grabación de vídeo **Full HD 1080p** con sistema de **estabilización digital** de imagen

ESTRUCTURA:

- **4** motores
- Estructura reforzada en fibra de **vidrio** y **Grilamid**
- Sistema de **bloqueo** automático de **las hélices** en caso de emergencia

Entrevista al Ingeniero Geodesta Alexis Piña (2017)

Fecha: 18/10/2017

Entrevistado: M. Sc. Ing. Alexis Piña

Profesión: Ingeniero Geodesta

Empresa: Geoinn Geospatial Innovations

Años de experiencia: 3 años con drones, 10 con fotogrametría.

¿Es posible hacer levantamientos sin puntos de control en tierra georreferenciados y que se logre una precisión geométrica aceptable? ¿Qué implicaciones tiene no utilizarlos?

Si usas el dron sin puntos de control en tierra vas a tener un error espacial de entrada de 2 a 3 metros a incluso 5m, o hasta 10.

Acuérdate que estos sistemas son GNSS, lo que anteriormente era el GPS.

Y por ejemplo yo me acuerdo que en los años 2006-2008, más o menos como por la guerra de Irak, todo el posicionamiento de los satélites estaba enfocado en el área de guerra, acuérdate que todos estos sistemas son estadounidenses. De por sí, el GPS es un sistema militar; pero abierto al público.

¿Qué es lo que paso? Cuando todos los satélites estaban ubicados en el Golfo Pérsico, en Venezuela teníamos errores de hasta 30 m, cuando mucho conectabas con 4-6 satélites.

Pero él te mide en absoluto. ¿Qué dron tienes tú?

Un Phantom 3 Standard

Ese viene con GPS, pero lo que es el Phantom 3 Pro y los Phantom 4 ya vienen con GNSS. Pero igualito, puedes tener el mejor dron del mundo que siempre te va a dar ese error, en posición.

Puede oscilar de 2 a 3 m, pero con una buena configuración de satélites puedes obtener hasta centímetros, son muchas las variables que intervienen.

El error absoluto es de desplazamiento, lo que quiere decir es que, si el GPS toma un punto aquí y otro acá, con la misma configuración de satélites, la medida geométrica entre esos puntos debe ser muy precisa. No exacta pero sí muy precisa.

Al medir dos puntos con la misma configuración de satélites, el error registrado en posición, en uno se traslada al otro, es decir que es sistemático.

Pero si vuelves al día siguiente, la configuración satelital puede ser diferente y ahí el error puede quedarte en otro lado.

¿Pero entonces la medida geométrica sí va a ser la misma siempre?

Siempre va a ser la misma, por lo que yo te decía, el dron está tomando fotos.

El Agisoft, es un modelo matemático muy inteligente que hicieron los rusos. Él tiene para hacer esta configuración fotogramétrica. porque esto también es viejo, esto es fotogrametría de la que antes se hacía con aviones y después con satélites, de los años 2006-2008 para acá y ahorita con drones.

El Agisoft es un software muy bueno, en el sentido de que te correlaciona las fotos, toda esa serie de fotos que se tomaron, y te las correlaciona por una serie de factores.

El primero es la posición, el dron tiene un sistema integrado que se llama IMU. El IMU junto con el GPS son sistemas electrónicos que se conectan. El IMU le manda una señal al GPS, el GPS se la devuelve y le toma un punto en el centro de la fotografía. Normalmente, él lo que hace es eso, toma puntos en el centro de cada fotografía. Con ese punto el Agisoft correlaciona, ah bueno esta es la coordenada tal, tal, bueno tu sabes X, Y y Z. Va colocando, va colocando y va colocando.

Esa es una de las maneras de como el relaciona, la segunda manera en como el correlaciona es por tiempo. El dron además de tener un GPS tiene un reloj. Entonces, el viene y toma la foto, a tal hora, en tantos minutos y segundos tomó la otra y así. Si el GPS está fallando por ejemplo como tú lo ves que de repente está una más acá y otra más allá, si el GPS falló entonces el las correlaciona por tiempo, ah bueno ¿cuál es

el siguiente tiempo que viene? 2 horas 1 minuto, 2 horas 2 minutos, 2 horas 3 minutos, 2 horas 4 minutos. El no viene y dice 2:03 y luego viene 2:05. No él no hace eso, es un modelo matemático muy riguroso. Esa es otra de las maneras en como el correlaciona las imágenes.

Y la tercera, es la de correlación, él sabe cuál es la foto 1, la 2, la 3. Cuando tú las vas descargando vas a ver el correlativo, entonces él ya sabe cuál es la foto.

¿El usa las 3 por defecto?

El utiliza las 3 por defecto. O sea que prácticamente es imposible que ese ortomosaico tenga algún tipo de error geométrico, porque él hace esa correlación, porque si falla una agarra la otra y si fallan esas dos agarra la otra. Es muy difícil que una de las 3 vaya a fallar.

Ya cuando él tiene esta posición, esta correlación, él te saca todo este ortomosaico, porque lo que hace es que pega todas esas imágenes y busca todos los puntos comunes.

El software, en este no se puede ver, pero cuando tú ves un software de fotogrametría, él automáticamente te detecta, por correlación de variables, bueno si este punto de esta foto corresponde con este punto de esta otra foto. Además de los puntos GPS el también hace correlación con estos puntos que el dictamina que sus modelos matemáticos lo pueden generar.

Ya llegándote a este punto, lo que te quiero indicar es que geoméricamente todos esos lados que tienes ahí deben ser muy precisos.

Ahora es que tú me dices que el problema es que no está georreferenciado. No, sí están georreferenciados porque tienes el GPS, ya hay una georreferenciación inicial. Ahora bien, que tiene un error, sí, pero es un error absoluto. Es un error que como te estoy diciendo, este es el bloque de fotos, pero el error los arrastra a todos al mismo lugar. Pero geoméricamente el comportamiento debería ser el mismo.

Esto ya está georreferenciado, ya tiene coordenadas, normalmente WGS 84 geográficas o la UTM que tú le vayas a colocar, para cuestiones de mediciones geométricas como esta pared o este techo que tú vayas a medir, te recomiendo que utilices la UTM que es la métrica.

¿Alguna recomendación a la hora de volar para mejorar el texturizado?

Después de que tú haces un vuelo programado ¿Cuánto le estas colocando de solape y traslape?

80%

Ok, por ahí está bien, cuando vas a trabajar con paredes o con todo lo que es vertical, después de tú haces el vuelo programado y tomas todas las fotos. Tú tienes que agarrar y hacer un vuelo manual, tuyo, oblicuo.

¿Qué ángulo?

No importa, puede oscilar entre 15 y 60°, pero si es importante. Depende de la altura de la vertical y si no es muy arriesgado volar, el ángulo es lo de menos.

Si es muy alto tienes que tomar varias fotos, si es posible hacer un círculo, si por ejemplo que sea un edificio de 20 pisos, vuelas en círculo, luego otro en el medio y luego uno más arriba del topo final para que te pueden salir situaciones en el centro y después haces el vuelo en perpendicular y saques las fotos sean una o dos dependiendo de lo que te vaya a salir. Pero es importante que tomes esa parte oblicua.

¿Es mejor en grilla simple o en grilla doble?

Para levantamientos 3D y para sitios con estructuras como los edificios es mejor doble grilla y así se aseguras que cumple el solape y el traslape de la foto. Grilla simple es para terrenos solos. Si el edificio es muy alto requieres también los vuelos circular para tomar fotos oblicuas, el necesita esa información.

¿Qué altura de vuelo me recomiendas?

Nosotros en vuelo lo mínimo que utilizamos es 90 m, de 90 a 120 m. Lo que pasa es que nosotros hacemos levantamientos de áreas grandes, de 20 hectáreas para arriba.

La situación de volar muy bajo es que el cono de observación es menor, si lo subes el cono es mucho mayor, entre más altura más área registrada.

Volar a 30m puedes obtener 3 cm/px, si lo subes a 90m subes a 5 cm/px, pierdes 2 cm en resolución ¿eso es qué? La cabeza de un clavo grande.

Nosotros con un dron de ala fija levantamos 200-400 hectáreas en un vuelo de 20 mins, pero lo volamos a 300 m.

¿Eso no lo prohíbe la normativa?

Pero nosotros tenemos licencia, tenemos permisos porque ese es nuestro trabajo.

¿Cuál es la mejor hora para tomar las fotografías?

En la mañana, porque ahí hay otro efecto. En la tarde, cuando tomas una foto te hace como un efecto retrovisor, entonces se ve al revés. En la tarde te hace un oscurecimiento raro de la imagen, es un efecto que antes se tenía que corregir cuando se hacían vuelos después de las 3 de la tarde. Se recomienda desde las 6 am hasta las 10 am tranquilamente, porque es un sol bastante claro, no es un sol tan horizontal como si salieras a las 5 am, te elimina un poco la sombra, te da mayor claridad y nitidez.

¿Y a mediodía?

También se puede, pero el problema del mediodía es que esos equipos no funcionan bien en zonas de mucho calor como en México o en la misma Venezuela, se recalientan mucho, hasta el mismo control o el iPad.

A nosotros una vez el sol, el calor nos quemó un control. Había como 42°C allá en Salvador y nos quemó el control.

¿Qué programa usan para manejar el dron?

Pix4D Capture, pero hay otros como el mismo de DJI GO. Hay otros como el de DroneDeploy que también es bueno, pero nosotros usamos el Pix4D Capture y el GO.

¿Qué software recomienda para procesar las imágenes? ¿Por qué? ¿Qué costo tienen las licencias?

El Pix4D lo puedes comprar por hora, por día. El Agisoft va para esa vía, de también aplicarse por hora.

Dependiendo de la necesidad, Pix4D es el mejor en la parte agrícola, nadie se lo va a quitar, pero el Agisoft es el mejor en 3D, en la parte digamos para hacer modelo BIM, estructuras de estas antiguas, iglesias, esas cosas. Todo eso en 3D es Agisoft, Pix4D no es no lo haga, solo que el texturizado es menos riguroso que el Agisoft.

Entonces ahí es donde está la situación, ahora hacer trabajos agrícolas en Agisoft si es verdad que no, ahí es mejor Pix4D.

El DroneDeploy es otro que puedes comprar por tiempo, sale muy económico.

Pero te pones a ver los precios son irrisorios, y tienes otras licencias de Agisoft como la educacional que anda por 500 USD. Pero es un costo demasiado bajo para los proyectos.

Nosotros usamos el Agisoft, porque es el más robusto en cuanto a texturizado y por nuestra relación de trabajo no podemos admitir fallas en eso. Nosotros usamos el Pix4D y probamos otros, pero como el Agisoft no hay.

¿Qué productos aplicables al control de obra se pueden lograr?

Con esto del principio al final puedes llevar el movimiento de tierras, avance de obras, etc.

Una vez que termino con Agisoft me lo llevo a Global Mapper y ahí ya saco perfiles, curvas de nivel, etc.

Puedes volar el dron en la mañana y luego al día siguiente, procesas en la noche y ya tienes un informe del avance en un movimiento de tierras, por ejemplo.

Te puede ayudar también a ver cuánto estas gastando de partida en una actividad.

Además, tiene beneficios en seguridad porque no tienes que subirte ni tu ni a tu personal a las zonas de riegos para realizar mediciones.

¿Usar puntos de control en el suelo me mejora la precisión?

La posición, bueno geometría también pero no debería haber problema con ella.

Depende también de la cantidad de puntos, con uno logras arrastrar todo, pero eres susceptible Al efecto abanico, o sea se te rota.

Con dos puntos aseguras el plano, pero te puede rotar en Z. Por eso mínimo para amarrar un terreno, 3 puntos.

¿Qué método de georreferenciación recomienda para este caso?

Puedes usar los modelos polinómicos o el lineal.

¿Se puede utilizar el Georreferenciador GDAL de Qgis?

No es recomendable, pero dependiendo de lo que vayas a hacer se puede.

¿Qué drones y cámaras utilizan? ¿Qué precio tienen estos equipos?

Inspire 1 por la cámara térmica y un Phantom 4 Standard

Como ya nosotros conocemos y hemos pasado por todo lo que es ala fija. El que tenemos lo construimos nosotros mismos, como ya sabemos que con el equipo más caro de DJI y el más barato vas a obtener lo mismo, porque en realidad es un instrumento de medición como agarrar un teodolito, una estación total o un GPS, el proceso ya es aquí con la situación de los *softwaresoftware*, como vas a utilizar la técnica para sacar el procedimiento, ahí es donde está el meollo del asunto.

Como te digo tenemos el Phantom 4 Standard, que funciona relativamente bien y el Inspire 1, por la cámara térmica, nos gustaría meternos ahorita con un Matrice 200 porque ya es un equipo más para ingeniería, lo queremos para situaciones más térmica y es aprueba de agua. Si supieras que no es tan caro, el equipo anda por los 3000 USD, pero los sensores sí son más caros las térmicas andan entre 9000 USD y 12000 USD, la multiespectral como la secoya a 4 bandas por el orden de los 3500 USD, ya las hiperespectrales pueden costar 40000 USD. Pero depende del trabajo que vayas a hacer.

¿A qué precisiones geométricas se puede llegar utilizando el Phantom 3 Standard y Agisoft Photoscan sin puntos de control en tierra?

Conservadoramente, como de 3 a 5 cm, geoméricamente.

Ahora por pixel es otra cosa, eso te quiere decir que cada pixel de la computadora es un círculo con diámetro de 3 cm, 5 cm o lo que te haya dado. Con eso puedes observar una moneda de 500 colones y cosas así. Eso es resolución, según la altura o la cámara, ahí entra el eje focal de las cámaras, el de estas es pequeñito.

Bueno los puntos de control pueden ser objetos que no se vayan a mover como las esquinas de los edificios cercanos, necesitas mínimo 3 y siempre tratando de formar un triángulo. Puedes tomar como base tu primer vuelo y al segundo le asignas los puntos de control y ya con eso deberías poder alinearlos con los métodos que te había explicado.

**DIRECTIVA
OPERACIONAL
DO-001-OPS-RPAS**

**OPERACIONES CON SISTEMA DE
AERONAVE PILOTEADA A DISTANCIA
(RPAS)**

Dirigido a:

LA INDUSTRIA AERONÁUTICA EN GENERAL

**San Jose Costa Rica
-2017-**



**DIRECCIÓN GENERAL DE
AVIACIÓN CIVIL
COSTA RICA**

1. GENERALIDADES

1.1 TABLA DE CONTENIDO

PORTADA DIRECTIVA OPERACIONAL	0
1. GENERALIDADES	GEN-1
1.1TABLA DE CONTENIDO	TC-1
1.2PREAMBULO	PR-3
1.3REGISTRO DE EDICIONES Y ENMIENDAS.....	REE-4
1.4LISTADO DE PÁGINAS EFECTIVAS.....	LPE-5
2. APLICABILIDAD	APL-6
3. EFECTIVIDAD Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	EDR-7
4. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	D&A-8
5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS).....	13
5.1CLASIFICACIÓN DE LOS RPAS	13
5.2COMPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS	13
5.3REGISTRO, IDENTIFICACIÓN Y MATRICULA.....	13
5.4REGISTRO DE EQUIPO A BORDO DE COMUNICACIÓN	14
6. REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN CON (RPAS).....	15
6.1OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS).	15
6.1.1 OPERACIONES COMERCIALES	17
6.1.2 OPERACIONES NO COMERCIALES.....	18
6.1.3 LOS PILOTOS DEBEN ACREDITAR LOS SIGUIENTES REQUISITOS:.....	19
6.1.4 SOLICITUD FORMAL PARA OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS) CONFORME LA SECCIÓN 6.1.1. (OPERACIONES COMERCIALES)	20
6.1.5 SOLICITUD FORMAL PARA LA AUTORIZACIÓN DE OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS) CONFORME 6.1.2. (OPERACIONES NO COMERCIALES)	21
6.2DESVIACIÓN DE LA DIRECTIVA OPERACIONAL.....	22
6.3MEDIOS ACEPTABLES DE CUMPLIMIENTO.....	22
7. REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO CON (RPAS)	23

7.1PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO.....	23
7.2PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	23
7.3REGISTRO DE MANTENIMIENTO.....	23
8. ÁREAS AUTORIZADAS PARA LA OPERACIÓN DE AERONAVES NO TRIPULADAS.....	24
8.1OPERACIÓN EN ZONA PROHIBIDA O RESTRINGIDA.....	24
8.2OPERACIÓN EN ESPACIO AÉREO CONTROLADO.....	24
8.3OPERACIÓN CERCA DE LOS AERÓDROMOS.....	24
8.4ÁREAS AUTORIZADAS PARA LA OPERACIÓN DE AERONAVES NO.....	25
TRIPULADAS (SOLICITUD DE NOTAM).....	25
9. REQUISITOS DE INSPECCIÓN.....	26
10.NOTIFICACIÓN SOBRE SEGURIDAD OPERACIONAL.....	27
11.PROTECCIÓN DE DATOS Y PRIVACIDAD.....	28
12.SEGURIDAD.....	30
13.APROBACION Y VIGENCIA.....	31

APÉNDICES		
	DESCRIPCIÓN	PAGINAS
<u>Apéndice A1</u>	Solicitud Formal Operaciones Comerciales	3
<u>Apéndice A2</u>	Solicitud Formal Operaciones No Comerciales	3
<u>Apéndice B1</u>	CO y Habilitaciones y especificaciones de Operación	2
<u>Apéndice B2</u>	Condición y limitaciones de operación	2
<u>Apéndice C</u>	Brochure Limitaciones en la Operación	2
<u>Apéndice D</u>	Características Técnicas del sistema RPAS	2
<u>Apéndice E</u>	Contenido del Manual de Operaciones RPAS	5
<u>Apéndice F</u>	Seguridad operacional en la operación sistemas de aeronaves pilotadas a distancia RPAS	13
<u>Apéndice G</u>	Vuelos de Prueba RPAS	1
<u>Apéndice H</u>	Programa de Mantenimiento RPAS	2
<u>Apéndice I</u>	Curso Teórico y Práctico RPAS	5

1.2 PREAMBULO

Los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) son un nuevo componente del sistema aeronáutico. Estos sistemas se basan en innovaciones tecnológicas aeroespaciales de última generación, que ofrecen avances que pueden abrir nuevas y mejores aplicaciones comerciales o civiles así como mejoras de la seguridad operacional y eficiencia de toda la aviación civil. La integración segura de los (RPAS) en el espacio aéreo no segregado será una actividad a largo plazo en la que muchos participantes interesados contribuirán con su experiencia y conocimientos en tópicos diversos como el otorgamiento de licencias y la calificación médica de la tripulación (RPAS), tecnologías para sistemas de detectar y evitar, espectros de frecuencias (incluyendo su protección respecto de la interferencia no intencional o ilícita), normas de separación respecto de otras aeronaves y el desarrollo de un marco normativo robusto que integre todo el sistema aeronáutico.

No obstante mientras OACI como órgano rector mundial en la aviación Civil establezca los parámetros de integración dentro del espectro aeronáutico global, la DGAC en base a sus facultades y atribuciones emite la presente Directiva Operacional (DO) donde establece las normas básicas para la operación con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), para garantizar que la actividad mantenga una seguridad operacional parecida a la actividad de la aviación civil convencional y como así lo ha manifestado la OACI.

La presente Directiva Operacional (DO) establece las bases para un futuro marco jurídico con relación a las condiciones de explotación de estas aeronaves para la realización de los diferentes trabajos aéreos, incluyendo los trabajos técnicos o científicos, así como para vuelos de prueba de producción y de mantenimiento, de demostración, para programas de investigación sobre la viabilidad para realizar determinada actividad con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), en el desarrollo de nuevos productos o para demostrar la seguridad de las operaciones específicas de trabajos técnicos o científicos. Además de la formación y acreditación del personal responsable tanto en las operaciones remotas como en el mantenimiento, los procesos de certificación de las empresas comerciales, la notificación de emergencias y contingencias

2. APLICABILIDAD

2.1. La presente Directiva Operacional (DO), aplica exclusivamente para las operaciones con:

- a) Sistemas de aeronaves Pilotadas a distancia (RPAS) civiles; (por sus siglas en inglés, Remotely Piloted Aircraft), de los RPA con peso inferior a los 150 kg “Peso máximo de despegue”.
- b) RPA de peso superior destinadas a la realización de actividades de lucha contra incendios, búsqueda y salvamento y otras actividades con la debida aprobación de la DGAC.
- c) Aeronaves no tripuladas de aeromodelismo recreacional le aplica el siguiente capítulo de la DO-001-OPS-RPAS: Capítulo 11 (Protección de datos y Privacidad), el Apéndice C (Limitaciones de Operación) y el AIC N° 05 Serie C del 08 de mayo de 2015 (ver página web www.dgac.go.cr para más información).

Esta Regulación no aplica a la operación de:

- a) Aeronaves pequeñas de aeromodelismo que vuelan en un círculo, y se controla en la actitud y la altitud, por medio de cable limitado unido a un mango o cabo por la persona que opera la aeronave.
 - b) Aeronaves de aeromodelismo operadas en el interior de una instalación y/o estructura; además aeronaves no tripuladas de radio control limitadas a un alcance máximo de 40 metros (130pies) para uso recreacional.
 - c) Aeronaves no tripuladas a gran escala más de 150 Kg (grandes RPA).
 - d) Aeronaves no tripuladas del Estado para operaciones de seguridad.
- 2.2.** Adicionalmente proporcionan orientación para los inspectores de la DGAC para la autorización e implantación de las operaciones. Los métodos aceptables de cumplimiento no son los únicos, un operador puede proponer métodos alternativos de cumplimiento siempre y cuando los mismos consideren como mínimo los requisitos contenidos en la presente directiva operacional y sean aprobados por la DGAC, el Estado de Diseño /Fabricación, según corresponda.
- 2.3.** Este documento incluye el proceso de autorización por parte de la DGAC de las Operaciones con sistemas de aeronaves Pilotadas a distancia (RPAS), conforme a las diferentes modalidades operacionales.
- 2.4.** Esta DO se encuentra en cumplimiento con los principios de la Circular Cir. 328 AN/190 de la OACI, el Doc.10019 AN/507, los Anexos 2 y 7 del Convenio de Aviación Civil Internacional, lo que permite la armonización de las operaciones, según las recomendaciones OACI.

3. EFECTIVIDAD Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA

- 3.1.** Hasta tanto se produzca la entrada en vigor de la disposición reglamentaria prevista para la emisión de un Reglamento Aeronáutico Costarricense (RAC) denominado RAC RPAS las Operaciones con sistemas de aeronaves Pilotadas a distancia quedan sujetas a lo establecido en esta Directiva Operacional.
- 3.2.** El cumplimiento de lo dispuesto en esta disposición no exime al operador, que es, en todo caso, el responsable de la aeronave y de la operación, del cumplimiento del resto de la normativa aplicable, en particular en relación con el uso del espectro radioeléctrico, la protección de datos o la toma de imágenes aéreas, ni de su responsabilidad por los daños causados por la operación o la aeronave.
- 3.3.** La presente Directiva Operacional (DO) entra en vigencia a partir de su aprobación por parte del Director General de Aviación Civil.

3.4. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Organización	Código	Título
OACI	Cir 328 AN /190	Sistema de aeronaves no tripuladas.
DGAC de Guatemala	RAC 101	Regulaciones de Aeronaves no tripuladas, Aeronaves de modelismo y fuegos artificiales
AESA España	Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio	Aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia.
OACI	Doc10019	Manual RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)
DGAC Costa Rica	RAC 119	Certificados Operativos para Escuelas de Enseñanza Aeronáutica, Trabajos Aéreos, Servicios de naturaleza Técnica Aeronáutica y autorizaciones para Operadores Aéreos Extranjeros

4. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

4.1. ABREVIATURAS

AAC	Autoridad de Aviación Civil
AC	Corriente alterna
ACAS	Sistema anticolidión de a bordo
ACP	Panel de comunicaciones Aeronáuticas
ACSA	Agencia Centroamericana para la Seguridad Aeronáutica
ADS-B	Vigilancia dependiente automática — radiodifusión
AFIS	Servicio de información de vuelo de Aeródromo
AGL	Sobre el nivel de la superficie
AM(R)S	Servicio móvil aeronáutico (r)
ARNS	Servicio de radionavegación aeronáutica
ARNSS	Servicio de radionavegación aeronáutica por satélite
ATC	Control del tránsito aéreo
ATM	Gestión de tránsito aéreo
ATS	Servicios de tránsito aéreo
BRLOS	Más allá de la línea de radio
BVLOS	Más allá de la línea de vista
C2	Mando y control
C3	Mando, control y comunicaciones
CofA	Certificado de Aeronavegabilidad
CMR	Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones
CPDLC	Comunicaciones por enlace de datos controlador-piloto
DGAC	Dirección General de Aviación Civil
EASA	Agencia Europea de Seguridad Aérea
EUROCAE	Organización europea para el equipamiento de la aviación civil
FCC	Computadora de control de vuelos
HF	Alta frecuencia
IFR	Reglas de vuelo por instrumentos
kg	Kilogramo
km	kilómetro
km/h	Kilómetro por hora
kN	Kilonewton
kt	Nudo
m	Metro
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
PANS	Procedimientos para los servicios de navegación aérea

QOS	Calidad de servicio
RPA	Aeronave pilotada a distancia
RPAS	Sistema de aeronave pilotada a distancia
RTCA	RTCA, Inc.
SAR	Búsqueda y salvamento
SARPS	Normas y métodos recomendados
SATCOM	Comunicación por satélite
SMAS(R)	Servicio móvil aeronáutico (R) por satélite
SMS	Sistema de gestión de la seguridad operacional
SSP	Programa estatal de seguridad operacional
UA	Aeronave no tripulada
UAS	Sistema(s) de aeronave(s) no tripulada(s)
UAV	Vehículo aéreo no tripulado (término obsoleto)
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
ROC	Certificado de Operador RPAS
VDL	Enlace digital en VHF
VFR	Reglas de vuelo visual
VHF	Muy alta frecuencia
VLOS	Visibilidad directa visual
VMC	Condiciones meteorológicas de vuelo visual

4.2. DEFINICIONES

- 4.2.1. Aeromodelismo:** Comúnmente llamado así a las aeronaves modelo, nombre que le dan en el ámbito internacional, aeronaves modelo el peso total de los cuales no exceda de 25 kg (55 libras), que es impulsada mecánicamente o lanzados al vuelo para fines recreativos y que no está diseñado para el transporte de personas u otros seres vivos.
- 4.2.2. Aeronave*.** Toda máquina que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra.
- 4.2.3. Aeronave autónoma.** Aeronave no tripulada que no permite la intervención del piloto en la gestión del vuelo.
- 4.2.4. Aeronave (categoría de)*.** Clasificación de las aeronaves de acuerdo con características básicas especificadas, por ejemplo: avión, helicóptero, planeador, globo libre.
- 4.2.5. Aeronave no tripulada.** Aeronave destinada a volar sin piloto a bordo.

4.2.6. Aeronave pilotada a distancia. Aeronave que no lleva a bordo un piloto a los mandos.

Nota.— Esta es una subcategoría de las aeronaves no tripuladas.

4.2.7. Aeronave pilotada a distancia (RPA). Aeronave no tripulada que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia.

4.2.8. Área Aprobada: significa un área para la operación de vehículos aéreos no tripulados.

4.2.9. Control operacional*. Autoridad ejercida respecto a la iniciación, continuación, desviación o terminación de un vuelo en interés de la seguridad de la aeronave y de la regularidad y eficacia del vuelo.

4.2.10. Detectar y evitar. Capacidad de ver, captar o detectar tránsito en conflicto u otros peligros y adoptar las medidas apropiadas para cumplir con las reglas de vuelo aplicables.

4.2.11. Enlace de mando y control. Enlace de datos entre la aeronave pilotada a distancia y la estación de piloto remoto para fines de dirigir el vuelo.

4.2.12. Enlace perdido. Pérdida de contacto del enlace de mando y control con la aeronave pilotada a distancia que impide al piloto remoto dirigir el vuelo de la aeronave.

4.2.13. Espacio aéreo segregado. Espacio aéreo de dimensiones especificadas asignado a usuarios específicos para su uso exclusivo.

4.2.14. Estación de piloto remoto. Estación en la cual el piloto remoto dirige el vuelo de una aeronave no tripulada.

4.2.15. Explotador*. Persona, organización o empresa que se dedica, o propone dedicarse, a la explotación de aeronaves.

4.2.16. Miembro de la tripulación*. Persona a quien el explotador asigna obligaciones que ha de cumplir a bordo, durante el período de servicio de vuelo.

- 4.2.17. Miembro de la tripulación de vuelo*.** Miembro de la tripulación, titular de la correspondiente licencia, a quien se asignan obligaciones esenciales para la operación de una aeronave durante el período de servicio de vuelo.
- 4.2.18. Miembro de la tripulación remoto.** Miembro de la tripulación, titular de una licencia, encargado de tareas esenciales para la operación de una aeronave pilotada a distancia durante el tiempo de vuelo.
- 4.2.19. Observador de RPA.** Miembro de la tripulación remoto quien, mediante observación visual de la aeronave pilotada a distancia, ayuda al piloto remoto en la realización segura del vuelo.
- 4.2.20. Operación autónoma.** Una operación durante la cual una aeronave pilotada a distancia vuela sin intervención de piloto en la gestión del vuelo.
- 4.2.21. Operación comercial.** Operación de aeronave realizada con fines comerciales (relevamiento topográfico, vigilancia de la seguridad, estudio de fauna, fumigación, etc.) distinta del transporte aéreo comercial, remunerada o por arrendamiento.
- 4.2.22. Operación con visibilidad directa visual.** Operación en la cual la tripulación remota mantiene contacto visual directo con la aeronave para dirigir su vuelo y satisfacer las responsabilidades de separación y anticolisión.
- 4.2.23. Pilotada a distancia.** Control de una aeronave desde una estación de piloto que no está a bordo de la aeronave.
- 4.2.24. Pilotar*.** Manipular los mandos de una aeronave durante el tiempo de vuelo.
- 4.2.25. Piloto a los mandos.** Persona que manipula los mandos de vuelo de una aeronave y es responsable de la trayectoria del vuelo de la misma.
- 4.2.26. Piloto al mando*.** Piloto designado por el explotador, o por el propietario en el caso de la aviación general, para estar al mando y encargarse de la realización segura de un vuelo.
- 4.2.27. Piloto remoto.** Persona que manipula los controles de vuelo de una aeronave pilotada a distancia durante el tiempo de vuelo.
- 4.2.28. Registrador de vuelo**.** Cualquier tipo de registrador instalado en la aeronave a fin de facilitar la investigación de accidentes o incidentes. En el caso de las aeronaves pilotadas a distancia, también comprende todo

tipo de registrador instalado en una estación de piloto remoto para fines de facilitar la investigación de accidentes o incidentes.

- 4.2.29. Sistema de aeronave no tripulada.** Aeronave y sus elementos conexos que operan sin piloto a bordo.
- 4.2.30. Sistema de aeronave pilotada a distancia.** Conjunto de elementos configurables integrado por una aeronave pilotada a distancia, sus estaciones de piloto remoto conexas, los necesarios enlaces de mando y control y cualquier otro elemento de sistema que pueda requerirse en cualquier punto durante la operación de vuelo.
- 4.2.31. Tiempo de vuelo — aviones*.** Tiempo total transcurrido desde que el avión comienza a moverse con el propósito de despegar, hasta que se detiene completamente al finalizar el vuelo.
- 4.2.32. Tiempo de vuelo — helicópteros*.** Tiempo total transcurrido desde que las palas del rotor comienzan a girar hasta que el helicóptero se detiene completamente al finalizar el vuelo y se paran las palas del rotor.
- 4.2.33. Tiempo de vuelo por instrumentos*.** Tiempo durante el cual se pilota una aeronave solamente por medio de instrumentos sin referencia a puntos externos.
- 4.2.34. Transferencia.** Acción de trasladar el control del pilotaje de una estación de piloto remoto a otra.
- 4.2.35. Visibilidad directa de radio.** Contacto directo electrónico punto a punto entre un transmisor y un receptor.
- 4.2.36. Zona o área poblada:** Zona o área poblada es una zona relacionada con la operación de un avión no tripulado, si la zona tiene una densidad de población suficiente para algunos aspectos de la operación, o algún evento que pueda ocurrir durante la operación, en particular; una falla en la aeronave que pueda poner en riesgo excesivo la vida, la seguridad o la propiedad de alguien o algo que está en dicha zona y que no está relacionado con la operación.

5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS)

5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS RPAS

Las aeronaves se clasificarán en base a su peso de conformidad con la Tabla 1.

CLASIFICACIÓN	PESO
Micro RPAS	≤100 gramos
Pequeños RPAS	≤ 2 Kg
Livianos RPAS	≤ 25 Kg
Grandes RPAS	≤ 150 Kg

Tabla 1

5.2 COMPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS

Los sistemas de aeronaves Pilotadas a distancia (RPAS). Se componen de cuatro elementos fundamentales:

- a) El Piloto/observador
- b) La Estación de Control
- c) El enlace (Data Link)
- d) La Aeronave

5.3 REGISTRO, IDENTIFICACIÓN Y MATRICULA

5.3.1 Todas las Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) con peso menor a 25 Kg deben llevar fijada a su estructura una placa de identificación en la que debe constar, de forma legible a simple vista si es posible e indeleble, la identificación de la aeronave, mediante la designación específica establecida por el operador que como mínimo incluya, número de serie, así como el nombre de la empresa operadora o propietario y los datos necesarios para ponerse en contacto con la misma.

5.3.2 Las Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) cuya masa máxima al despegue exceda de 25 Kg., deben cumplir con lo establecido en el Anexo 07 última revisión, (estar inscritas en el Registro de matrícula de aeronaves y disponer de certificado de aeronavegabilidad), quedando exentas del cumplimiento de tales requisitos las aeronaves civiles pilotadas a distancia con una masa máxima al despegue igual o inferior.

5.4 REGISTRO DE EQUIPO A BORDO DE COMUNICACIÓN

- 5.4.1** Todas las Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) con peso menor a 25 kg y cuyos mandos operen en las bandas de uso libre de acuerdo con lo establecido en el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias deben cumplir con el *“Procedimiento de homologación de dispositivos que operan en las bandas de uso libre”*, esta homologación se realiza ante la Superintendencia de Telecomunicaciones, el certificado de homologación debe ser presentado a la Dirección General de Aviación Civil.
- 5.4.2** Las Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg y cuyos mandos operen en las bandas de uso libre de acuerdo con lo establecido en el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias, deben cumplir con el *“Procedimiento de homologación de dispositivos que operan en las bandas de uso libre”*, esta homologación se realiza ante la Superintendencia de Telecomunicaciones, el certificado de la homologación debe ser presentado a la Dirección General de Aviación Civil
- 5.4.3** Las Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) cuya masa máxima al despegue exceda de 25 kg y cuyos mandos operen por medio de la asignación específica de un frecuencia, deben llevar a cabo un proceso con el Ministerio de Ciencia Tecnología y Telecomunicaciones y el respectivo título habilitante debe ser presentado a la Dirección General de Aviación Civil

6. REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN CON (RPAS)

6.1 OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS).

Las operaciones con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancias sobre el Territorio Nacional están sujetas a los siguientes requisitos:

- a) **OPERACIONES VLOS:** Las aeronaves civiles pilotadas a Distancia cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 Kg., sólo pueden operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, dentro del alcance visual del piloto (**VLOS**), a una distancia de éste no mayor de 500 metros, y a una altura sobre el terreno no mayor de 120 metros (400 pies).
- b) **OPERACIONES BVLOS:** Las aeronaves civiles pilotadas a Distancia cuya masa máxima al despegue no exceda de 25 Kg., sólo pueden operar en zonas fuera de aglomeraciones de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre, en espacio aéreo no controlado, más allá del alcance visual del piloto (**BVLOS**), dentro del alcance de la emisión por radio de la estación de control y a una altura máxima sobre el terreno no mayor de 120 metros (400 pies), siempre que cuenten con medios para poder conocer la posición de la aeronave. La realización de los vuelos debe estar condicionada a la emisión de un NOTAM por AIS en la DGAC, a solicitud del operador o propietario debidamente habilitado, para informar de la operación al resto de los usuarios del espacio aéreo de la zona en que ésta vaya a tener lugar.
- c) **OPERACIONES ESPECIALES:** DGAC basado en estudios de análisis de riesgo y procedimientos operacionales establecidos por el operador o propietario puede permitir operaciones en el espacio aéreo no controlado en los siguientes casos:
 - Vuelos con Aeronaves Civiles Pilotadas a Distancia más allá de la línea de radio (**BRLOS**).
 - Vuelos con Aeronaves Civiles Pilotadas a Distancia en operaciones nocturnas o IFR.
 - Vuelos con Aeronaves Civiles Pilotadas a Distancia cuya masa máxima al despegue exceda de 25 Kg.

- Vuelos con RPAS a distancias menores de 30 metros de edificios en ciudades, pueblos o lugares habitados o de reuniones de personas al aire libre,

La DGAC debe establecer las aprobaciones de operaciones para los vuelos especiales en las Habilitaciones y Especificaciones de operación o Condiciones y limitaciones de Operación, según sea el caso.

- d) Además, las operaciones previstas en los literales anteriores deben requerir:
 1. Que el operador o propietario disponga de la documentación relativa a las características técnicas del Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia que vaya a utilizar, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones (Apéndice D).
 2. Que se disponga de un Manual de operaciones del operador o propietario (Apéndice E) donde se establezcan los procedimientos de la operación.
 3. Que haya realizado un Análisis de riesgo aeronáutico de seguridad de la operación u operaciones, en el que se constate que la misma puede realizarse con seguridad. Este Análisis, que puede ser genérico o específico para un área geográfica o tipo de operación determinado, se debe tener en cuenta las características básicas de la aeronave o aeronaves a utilizar y sus equipos y sistemas (Apéndice F).
 4. Que se hayan realizado, con resultado satisfactorio, los vuelos de prueba que resulten necesarios para demostrar que la operación pretendida puede realizarse con seguridad (Apéndice G).
 5. Que se haya establecido un programa de mantenimiento del Sistema de Aeronave Piloteada a Distancia, ajustado a las recomendaciones del fabricante. (Ver Apéndice H)
 6. Que los pilotos a cargo del Sistema de la aeronave pilotada a Distancia cumplan los requisitos establecidos en esta Directiva y en Apéndice I.
 7. Se deben exigir a los operadores o propietarios de los Sistemas de la aeronave pilotadas a Distancia, una póliza de seguro vigente que cubra la responsabilidad civil frente a terceros por daños que puedan surgir durante y por causa de la ejecución del vuelo, las pólizas deben formalizarse de conformidad con las coberturas previstas por las diferentes empresas de Seguros respecto de la responsabilidad civil, cuando corresponda en orden a esta Directiva operacional.

8. Que se hayan adoptado las medidas adecuadas para proteger a los Sistemas de Aeronave Pilotadas a Distancia de actos de interferencia ilícita durante las operaciones, incluyendo la interferencia deliberada del enlace de radio y establecido los procedimientos necesarios para evitar el acceso de personal no autorizado a la estación de control y a la ubicación de almacenamiento de la aeronave, así como la notificación a la dependencia ATS pertinente de este hecho cuando ocurriese.
9. Que se hayan adoptado las medidas adicionales necesarias para garantizar la seguridad de la operación y para la protección de las personas y bienes subyacentes.
10. Que la operación se realice a una distancia mínima de 8 km. respecto de cualquier aeropuerto o aeródromo, la realización de vuelos a menos de 8km debe estar condicionada a la aprobación de los procedimientos por la Dirección General de Aviación Civil e incluirá la emisión del respectivo NOTAM.
11. Pueden realizarse actividades aéreas con aeronaves civiles pilotadas a distancia solo de día y en condiciones meteorológicas visuales, la realización de vuelos nocturnos esta sujeta a la aprobación de la DGAC.
12. Que se haya establecido un sistema de registro con el historial de la operación del RPAS, incluyendo números de vuelos, horas de vuelos, piloto al mando, cualquier falla de los sistemas, emergencias, incidentes o accidentes y las modificaciones correctivas tomadas sobre el sistema.
13. El operador o propietario debe demostrar que el RPAS posee datos de telemetría (indicaciones de altura, satélites, velocidad, uso batería, etc), deben poseer un escáner de frecuencias aeronáuticas, y deben homologar el equipo de comunicación del RPA en SUTEL conforme lo establecido en 5.4. de la presente Directiva Operacional.

6.1.1 OPERACIONES COMERCIALES

Las Operaciones con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), destinadas a servicios de trabajos aéreos de comercialización de productos o servicios obtenidos de los RPAS por remuneración solo podrán ser efectuadas por personas naturales o jurídicas que cuenten con un certificado de explotación y que cumplan con lo establecido en el RAC119 específicamente con el RAC 119.3 (b)(2), y además cumpla con lo establecido en la presente Directiva.

6.1.2 OPERACIONES NO COMERCIALES

Pueden realizarse actividades aéreas con aeronaves civiles pilotadas a distancia de parte de su propietario sean estas personas naturales o jurídicas.

Dentro de las operaciones no comerciales se encuentran las actividades destinadas exclusivamente a fines particulares, que no conlleven a la divulgación pública o masiva de la información obtenida a través del uso del RPAS. Además otras actividades tales como: científicas, investigación, búsqueda y salvamento, lucha contra incendio, u otras actividades de interés y que sean avaladas por la DGAC.

Estas actividades solo se podrán llevar de día y en condiciones meteorológicas visuales, y con sujeción a los requisitos establecidos en la sección 6.1 a) y b), para que efectúen:

- a) Vuelos de búsqueda y salvamento en áreas.
- b) Vuelo de evaluación de desastres naturales efectuados con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS).
- c) Vuelos de prueba de producción y de mantenimiento, realizados por fabricantes u organizaciones dedicadas al mantenimiento.
- d) Vuelos de demostración no abiertos al público, dirigidos a grupos cerrados de asistentes a un determinado evento o de clientes potenciales de un fabricante u operador.
- e) Vuelos para programas de investigación, nacionales o internacionales, en los que se trate de demostrar la viabilidad de realizar determinada actividad con aeronaves civiles pilotadas a distancia.
- f) Vuelos de I+D (vuelos de investigación y desarrollo) realizados por fabricantes para el desarrollo de nuevos productos.
- g) Vuelos de prueba necesarios para demostrar de que las actividades solicitadas conforme la sección 6.1 pueden realizarse con seguridad.
- h) Vuelos Relacionados con la Organización.
- i) Otros Vuelos Especiales no contemplados en esta lista y que en base a una evaluación por parte de la DGAC pueden ser aprobados.

La realización de estos vuelos debe requerir además, presentar a la DGAC una solicitud formal apéndice A2 adjuntando, el cumplimiento de los requisitos establecidos en la sección 6.1, literal d), numerales 1., 3., 6., 7., 8., 9, 10, 11, 12, 13 y, además, establecer una zona de seguridad en relación con la zona de realización del vuelo.

En los casos en que la operación se vaya a realizar por un operador o propietario no sujeto a la supervisión de la DGAC, deber disponer de la autorización de la autoridad aeronáutica del país de origen para la realización de la actividad de que se trate y acreditar ante la DGAC que los requisitos de aquella autoridad son al menos equivalentes a los establecidos en esta sección.

6.1.3 LOS PILOTOS DEBEN ACREDITAR LOS SIGUIENTES REQUISITOS: (CERTIFICADO DE IDONEIDAD PARA RPAS)

Para operar un RPAS para fines privados o comerciales, se requiere de un certificado de idoneidad expedido por la Dirección General de Aviación Civil.

Para su expedición, una persona es elegible para ser certificado como operador de RPAS si él o ella:

- a) Tiene una edad mínima de 18 años y título de Bachillerato secundaria.
- b) Poseer un certificado médico equivalente a la Clase 2 del RAC-LPTA, extendido por alguno de los médicos designados de la DGAC, y renovarlo cada 60 meses, que se reducirá a 24 meses una vez que el solicitante cumpla los 40 años
- c) Que demuestre que ha completado un curso teórico y práctico de capacitación en la operación del tipo de RPAS que él o ella propone operar, llevado a cabo por el fabricante del RPAS, un operador autorizado por el fabricante del RPAS o por un centro de instrucción aeronáutica o por un instructor calificado. Que contemple como mínimo lo estipulada en el apéndice I de esta directiva operacional.
- d) Tiene por lo menos 10 horas experiencia en la operación de vehículos aéreos no tripulados fuera del espacio aéreo controlado, estas horas serán anotadas y certificadas en una bitácora de vuelo.
- e) Se podrá convalidar los cursos y la licencia que otorguen otros países, para esto deberán presentar todos los atestados que corroboren que han sido certificados como piloto de RPAS por Organizaciones de Enseñanza y Autoridades de Aviación Civil de otros países, en estos casos el examen teórico siempre será un requisito obligatorio para la convalidación.

- f) Cancelar el costo y aprobar los exámenes teórico-prácticos que disponga la DGAC.
- g) Para la emisión del certificado de idoneidad se debe efectuar el pago correspondiente según el apéndice tarifario aplicable.
- h) Los instructores prácticos de RPAS, deberán contar con el certificado de idoneidad para RPAS y deben realizar el examen de fundamentos de instrucción (FOI) en la DGAC.

Una vez cumplido con lo anterior la Unidad de Licencias de la DGAC emitirá el Certificado de Idoneidad, especificando la habilitación (multirotor o ala fija) y clasificación (micro, pequeño, liviano o grande) del o los tipos de RPAS autorizados a volar.

6.1.4 SOLICITUD FORMAL PARA OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS) CONFORME LA SECCIÓN 6.1.1. (OPERACIONES COMERCIALES)

Para realizar operaciones con Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA) en actividades comerciales, es requerido obtener un certificado operativo (CO), de acuerdo con lo establecido por el RAC 119 (Regulación de Certificados Operativos y Autorizaciones de Operación), según corresponda, y un certificado de explotación de acuerdo a lo establecido en la ley General de Aviación Civil, los requisitos específicos del departamento de Transporte Aéreo y los requerimientos de pago conforme al Apéndice tarifario y/o sus modificaciones.

El operador o propietario debe presentar la solicitud formal (apéndice A1) para someterse al proceso de certificación la solicitud debe contener:

- a) Las calidades del operador o propietario, de las aeronaves que vayan a utilizarse en la operación y de los pilotos que la realicen, así como las condiciones en que cada uno de ellos acredita los requisitos exigibles conforme a la sección 6.1.3.
- b) La descripción de las características técnicas (apéndice D) de las aeronaves, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones.
- c) El tipo de trabajos aéreos que se vayan a desarrollar o, así como de las características de la operación.
- d) Las condiciones o limitaciones que se va a aplicar a la operación para garantizar la seguridad.

- e) Debe contar con un Gerente Responsable de la empresa y un Jefe o Responsable Técnico el cual debe contar con un Certificado de Idoneidad para RPAS y demostrar conocimientos en la Ley General de Aviación Civil, Reglamentos Aeronáuticos Costarricenses y el Manual General de Operaciones, una persona puede asumir ambos puestos si cumple con los requisitos aplicables. (RAC 119.65 f.)

Junto con la solicitud formal, el operador debe presentar una declaración jurada en el que manifieste, bajo su compromiso que cumple con cada uno de los requisitos exigibles conforme a lo previsto en esta directiva para la realización de las actividades, que dispone de la documentación que así lo acredita y que debe mantener el cumplimiento de dichos requisitos en el período de tiempo inherente a la realización de la actividad. Además de esta declaración jurada el operador o propietario debe presentar o cumplir con lo solicitado la sección 6.1 Lateral d) del numeral 1 al 13.

Si el operador o propietario cumple con los requisitos, la DGAC emitirá un Certificado de Operador RPAS, con las respectivas Especificaciones y Limitaciones de Operación conforme lo establecido en La Ley General de Aviación Civil de Costa Rica número 5150 y el RAC 119.

Cualquier modificación de a la solicitud formal debe ser comunicada a la DGAC con una antelación mínima de 5 días de implementar la modificación, en el formato establecido en el apéndice A1, presentando actualizada la declaración responsable y, en su caso, la documentación acreditativa complementaria prevista en esta Sección.

6.1.5 SOLICITUD FORMAL PARA LA AUTORIZACIÓN DE OPERACIÓN CON SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS) CONFORME 6.1.2. (OPERACIONES NO COMERCIALES)

Para realizar actividades aéreas con Sistemas de aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS), conforme la sección 6.1.2 se debe presentar a la DGAC una Solicitud Formal de Autorización de operación conforme apéndice A2.

- a) Las calidades del operador o propietario, de las aeronaves que vayan a utilizarse en la operación y de los pilotos que la realicen, así como las condiciones en que cada uno de ellos acredita los requisitos exigibles conforme a la sección 6.1.3.
- b) La descripción de las características técnicas (apéndice D) de las aeronaves, incluyendo la definición de su configuración, características y prestaciones.
- c) El tipo de trabajos aéreos que se vayan a desarrollar o, así como de las características de la operación.

- d) Las condiciones o limitaciones que se va a aplicar a la operación para garantizar la seguridad.

Junto con la solicitud formal, el operador debe presentar una declaración jurada en el que manifieste, bajo su compromiso que cumple con cada uno de los requisitos aplicables conforme a lo previsto en esta directiva para la realización de las actividades, que dispone de la documentación que así lo acredita y que debe mantener el cumplimiento de dichos requisitos en el período de tiempo inherente a la realización de la actividad. Además de esta declaración jurada el operador o propietario debe presentar o cumplir con lo solicitado la sección 6.1 Literal d), numerales 1., 3., 6., 7., 8., 9, 10, 11, 12, 13 y, además, establecer una zona de seguridad en relación con la zona de realización del vuelo, conforme aplique.

La Dirección General de Aviación Civil debe revisar la documentación presentada y si el operador o propietario cumple con los requisitos, la DGAC debe emitir en un lapso no mayor de 30 días hábiles una Autorización de Operación para sistemas de Aeronaves pilotadas a distancian (RPAS), incluyendo las Condiciones y Limitaciones de Operación (Apéndice B2) en donde se establece la Fecha, hora(s) y lugar así como el tipo de operación entre otras obligaciones.

Cualquier modificación de a la solicitud formal debe ser comunicada a la DGAC con una antelación mínima de 15 días hábiles de implementar la modificación, en el formato establecido en el apéndice A2, presentando actualizada la declaración responsable y, en su caso, la documentación acreditativa complementaria prevista en este apartado.

6.2 DESVIACIÓN DE LA DIRECTIVA OPERACIONAL

Los operadores habilitados conforme a lo previsto en esta disposición para el ejercicio de las actividades aéreas a que se refiere la sección 6.1.1 y 6.1.2 pueden realizar, bajo su responsabilidad, vuelos que no se ajusten a las condiciones y limitaciones previstas en los secciones 6.1.1 y 6.1.2 en situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, así como para la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan, cuando les sea requerido por las autoridades responsables de la gestión de dichas situaciones, no obstante deben presentar un informe sobre estos eventos.

6.3 MEDIOS ACEPTABLES DE CUMPLIMIENTO

La D.G.A.C. puede establecer los medios aceptables de cumplimiento cuya observancia acredita el cumplimiento de los requisitos establecidos en esta disposición.

7. REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO CON (RPAS)

7.1 PROCEDIMIENTOS DE MANTENIMIENTO.

El operador o propietario de una aeronave no tripulada debe establecer dentro de la estructura del manual de Operaciones (ver Apéndice E) los procedimientos de mantenimiento para sus aeronaves.

7.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.

Las aeronaves no tripuladas no deben ser operadas a menos que sean inspeccionadas y mantenidas de acuerdo a un programa de mantenimiento elaborado por el fabricante y/o desarrollado por el propietario u operador y que esté debidamente aceptado por la Dirección General de Aviación Civil. (En el apéndice H se establecer recomendaciones mínimas que se deben incluir en un programa de mantenimiento)

7.3 REGISTRO DE MANTENIMIENTO.

El operador o propietario de una aeronave no tripulada debe establecer y mantener un registro de mantenimiento o bitácora en el cual se lleve toda la información referente servicios de mantenimiento, cambio de partes y actualizaciones software.

8. ÁREAS AUTORIZADAS PARA LA OPERACIÓN DE AERONAVES NO TRIPULADAS

8.1 OPERACIÓN EN ZONA PROHIBIDA O RESTRINGIDA

1) Una persona no debe operar una aeronave no tripulada en o sobre una zona prohibida, o en o sobre un área restringida (estipuladas en el AIP), excepto con el permiso de, y de acuerdo con las condiciones establecidas por la DGAC.

8.2 OPERACIÓN EN ESPACIO AÉREO CONTROLADO

1) Una persona no debe operar una aeronave no tripulada por encima de 120 metros (400 pies) AGL en el espacio aéreo controlado, excepto:

2) En un área aprobada como un área para la operación de aviones no tripulados de la misma naturaleza que la aeronave, y de acuerdo con las condiciones de la aprobación, o

3) De acuerdo con una autorización del control de tránsito aéreo.

8.3 OPERACIÓN CERCA DE LOS AERÓDROMOS

1) Una persona no debe operar una aeronave no tripulada por encima 120 metros (400 pies) AGL y dentro de un radio de 8 kilómetros de un aeródromo a menos que:

- a) La operación de la aeronave está respaldada por un Certificado Operativo (CO), o
- b) Se ha emitido un permiso especial para una operación específica.

(2) Una persona no debe operar una aeronave no tripulado de tal manera que constituya un obstáculo a otra aeronave que se aproxima o sale de un área de aterrizaje o pista de un aeródromo.

(3) Una persona no debe operar una aeronave no tripulado en un área de movimiento o pista de un aeródromo a menos que:

- (a) La operación de la aeronave está respaldada por un Certificado Operativo (CO), o
- (b) Se ha emitido un permiso especial para una operación específica.

8.4 ÁREAS AUTORIZADAS PARA LA OPERACIÓN DE AERONAVES NO TRIPULADAS (SOLICITUD DE NOTAM)

Al considerar si aprueba o no un área para alguno de estos fines, la DGAC debe tener en cuenta el posible efecto sobre la seguridad de la navegación aérea de la operación de aeronaves no tripuladas en la zona solicitada.

- 1) La DGAC puede imponer condiciones a la aprobación, en interés de la seguridad de la navegación aérea.
- 2) Si la DGAC aprueba una zona de operación, debe publicar los detalles de la aprobación (incluyendo cualquier condición) en NOTAM o en una circular de Información aeronáutica (AIC).
- 3) La DGAC puede revocar la aprobación de un área, o cambiar las condiciones que se aplican a tales aprobaciones en interés de la seguridad de la navegación aérea y debe publicar los detalles de cualquier revocación o cambio en NOTAM o en una circular de Información aeronáutica (AIC).

8.5 OPERACIÓN CERCA DE OTRA AERONAVE

Ninguna persona puede operar una aeronave pilotada a distancia (RPA) lo suficientemente cerca de otra aeronave de modo que pueda crear un peligro de colisión.

9. REQUISITOS DE INSPECCIÓN

1) Cuando la DGAC o sus designados lo soliciten, cualquier persona que opere una aeronave no tripulada bajo esta Directiva debe permitir la inspección de la aeronave y sus manuales y/o documentos para determinar el cumplimiento y la aplicabilidad de esta Directiva Operacional.

2) Cuando sea solicitado por la DGAC, el operador o propietario de una debe proporcionar evidencia satisfactoria de que la aeronave está sujeta a lo establecido en esta Directiva Operacional.

10. NOTIFICACIÓN SOBRE SEGURIDAD OPERACIONAL

- 1) La investigación de un accidente/incidente graves con aeronaves no tripuladas proporciona conocimientos para evitar que vuelvan a ocurrir hechos similares. Por lo tanto, es necesario que todos los accidentes e incidentes graves sean informados a la DGAC. Con todos los datos reunidos en un solo informe, se pueden establecer estadísticas, verificar tendencias y analizar los hechos, de forma que se aprenda de los errores cometidos.
- 2) La comunicación del accidente/incidente debe entregarse a la DGAC en un lapso de setenta y dos (72) horas, como máximo, después del evento.
- 3) 3) La notificación y reporte del accidente/incidente graves se debe efectuar según lo establecido en el RAC 13 según aplique.
- 4) La DGAC debe ser la encargada de efectuar cualquier investigación de accidentes e incidentes con las aeronaves no tripuladas.
- 5) El poseedor de un certificado de Operador de Aeronaves no tripuladas debe establecer un sistema de notificación de eventos o sucesos que puedan poner en peligro la seguridad operacional.

11. PROTECCIÓN DE DATOS Y PRIVACIDAD

Los propietarios u operadores de Aeronave Piloteada a Distancia (RPA), deben de cumplir con las disposiciones establecidas en el marco jurídico nacional en lo relativo a la protección de datos y el derecho a la privacidad. Concretamente con lo establecido en los Artículos 23 y 24 de la Constitución Política así como Artículo 8, inc. G) de la Declaración Universal de los Derechos Humanos y el Código Penal Ley N° 4573 Publicada en el Alcance 120 a La Gaceta N° 257 de 15 de noviembre de 1970 TITULO VI DELITOS CONTRA EL AMBITO DE INTIMIDAD SECCION I Violación de Secretos, además se ha establecido jurisprudencia en este ámbito como por ejemplo Sala Constitucional, Votos V. 678-91, V. 4819-96 en donde expresamente indica “ La libertad de la vida privada es el reconocimiento de una zona de actividad que es propia de cada uno, y el derecho a la intimidad limita la intervención de otras personas o de los poderes públicos en la vida privada de la persona; esta limitación puede manifestarse tanto en la observación y captación de la imagen y documentos en general, como en las escuchas o grabaciones de las conversaciones privadas y en la difusión o divulgación posterior de lo captado u obtenido sin el consentimiento de la persona afectada”.

El artículo 13.2 de la Convención Interamericana de Derechos Humanos establece como legítimos para determinar una limitación al derecho de acceso a la información la protección de los derechos o reputación de los demás, seguridad nacional, orden público; y salud o moral públicas.

Considerando que las legislación nacional relativa al tratamiento de datos personales tiene por objeto garantizar el respeto de los derechos y libertades fundamentales, particularmente del derecho al respeto de la vida privada, en relación los supuestos que constituyen una intromisión ilegítima en el derecho a la propia imagen, entre los que destacan la captación, reproducción o publicación por fotografía, filme o cualquier otro procedimiento, de la imagen de una persona en lugares o momentos de su vida privada o fuera. Destaca lo dispuesto al efecto por la Sala Constitucional, que al respecto se ha referido de la siguiente forma:

Sólo por normas legítimas de nivel constitucional o con rango de ley acordes con los principios que orientan una sociedad democrática, se regularán las excepciones al acceso a la información en forma limitada y siempre que sean necesarias para la protección de la seguridad nacional y/o el derecho legítimo del individuo a la intimidad. No podrá mantenerse informaciones secretas amparadas en normas no publicadas... Es inaceptable que bajo un concepto amplio e impreciso de seguridad nacional se mantenga el secreto de la información. Las restricciones por motivos de seguridad nacional sólo serán válidas cuando estén orientadas a proteger la integridad territorial del país y en situaciones excepcionales de extrema violencia que representen un peligro real e inminente de colapso del orden democrático. Una restricción sobre la base de la

seguridad nacional no es legítima si su propósito es proteger los intereses del gobierno y no de la sociedad en su conjunto. Las leyes de privacidad no deben inhibir ni restringir la investigación y difusión de información de interés público...

Por lo tanto para las empresas que poseen un certificado de explotación y un Certificado Operativo CO, ante denuncia interpuesta por captación y difusión de imágenes, la DGAC debe ser la encargada de efectuar cualquier investigación técnica de captación y/o difusión de imágenes sin consentimiento.

Para tales efectos, la DGAC, por medio de la Unidad de Operaciones Aeronáuticas, se debe realizar una investigación preliminar al efecto en donde se debe recabar la prueba pertinente y se debe conformar un expediente administrativo al efecto.

En este mismo sentido, el inspector procederá a rendir un informe al CETAC recomendando la apertura de un procedimiento administrativo de cancelación de certificado de explotación de aeronave piloteada a distancia (RPA) de conformidad con el artículo 13 y siguientes de la Ley General de Aviación Civil.

Ante la eventualidad de una denuncia por captación y difusión de algún video o fotografía inapropiada, la DGAC no puede responsabilizarse por el uso o difusión que se le dé en el ámbito privado y en ausencia del interés público de la difusión. No obstante, podrá el denunciante solicitar la cancelación del certificado de explotación sin menoscabar las acciones legales que pueda emprender en sede judicial.

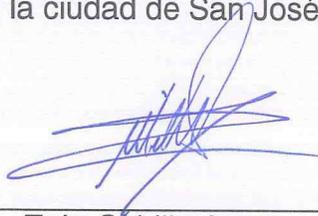
12. SEGURIDAD

Si una Aeronave Pilotada a Distancia (RPA) está siendo objeto de interferencia ilícita el responsable a cargo de la operación debe notificar por los medios más expeditos a la dependencia ATS pertinente el hecho, esto incluye toda circunstancia significativa relacionada con el mismo, y cualquier desviación del plan de vuelo autorizado que las circunstancias hagan necesaria, a fin de permitir a la dependencia ATS dar prioridad a la aeronave y reducir al mínimo los conflictos de tránsito que puedan surgir con otras aeronaves.

13. APROBACION Y VIGENCIA

La presente Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS entrara en vigencia 6 meses después de su aprobación.

Dado en la ciudad de San José Costa Rica, a los 13 días del mes de febrero de 2017.



Enio Cubillo Araya
Director General de Aviación Civil



Referencias

- Agisoft Photoscan Professional (Versión 1.3.4) [Software] (2017). Obtenido de: <http://www.agisoft.com/>.
- Agisoft. (s. f. A). Agisoft Photoscan User Manual Professional Edition 1.2.
- Agisoft. (s. f. B). Image Capture Tips - Equipment and Shooting Scenarios.
- Agisoft. (s. f. C). Technical Guide and Production Tips.
- Agisoft. (s. f. D). Tutorial (Begginer Level) - 3D-model.
- Agisoft. (s. f. E). Tutorial (Begginer Level) - Orthophoto, DEM (GCPs).
- Agisoft. (s. f. F). Tutorial (Begginer Level) - Orthophoto, DEM (without GCPs).
- Astorqui, J. S. C. (2003). La fotogrametría digital en el levantamiento de planos de edificios. *Informes de la construcción*, 55(488), 31-40.
- Bañón, L. et al. (2014). Empleo de drones (RPAS) para la elaboración de material audiovisual docente en asignaturas de Ingeniería Civil.
- Benjamín, J. (1981). Probabilidad y estadística en Ingeniería Civil (Sin, A. y Prieto, V. trad.). Colombia: McGraw-Hill.
- Campo, I. (2015). Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos. En Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid (Ed.), *Los drones y sus aplicaciones en la ingeniería civil* (pp. 149-158). Madrid, España: Gráficas Arias Montano S.A.
- Charfen, M. A. (2015). Recomendaciones para la aplicación de los drones en el mundo de la arquitectura (Tesis de Maestría) Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Davis, Foote y Kelly. (1972). Tratado de topografía (Mantero, J., trad.). España: Mursigraf arabí s.a. (Obra original publicada en 1966).
- Dirección General de Aviación Civil. (2015. A). Qué puedo hacer con mi aeronave de Aeromodelismo (vuelos recreacionales) Costa Rica.
- Dirección General de Aviación Civil. (2015. B). Restricciones y limitaciones de operación para vehículos aéreos no tripulados. Costa Rica.
- Dirección General de Aviación Civil. (2017. A). 13 de agosto entra en vigencia regulación para la operación de drones. Costa Rica.
- Dirección General de Aviación Civil. (2017. B). Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS. Operaciones con sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS). Costa Rica.
- DJI. (2015). Manual de usuarios Phantom 3 Standard.
- DJI. (2015). Phantom 3 Standard. Recuperado de: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info#specs>
- DJI. (2016). Manual de usuarios Phantom 4.
- DJI (2017. A). AGRASS MG-1S. Recuperado de: <https://www.dji.com/mg-1s>
- DJI. (2017. B). DJI GO (Versión 3.1.23) [Aplicación Móvil]. Descargado de: https://play.google.com/store/apps/details?id=dji.pilot&hl=es_419
- DJI. (2017. C). Manual de usuarios Spark.
- DJI (2017. D) Phantom 4 Pro. Recuperado de: <https://www.dji.com/phantom-4-pro?site=brandsite&from=nav>
- DroneDeploy (s. f.). Next Generation Features for Aerial Mapping. Recuperado de: <https://www.dronedeploy.com/features.html>
- Esri. (s. f. A). ¿Qué son los datos ráster?. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Esri. (s. f. B). El geoide, el elipsoide, el esferoide y el datum, y cómo se relacionan. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/map->

- projections/about-the-geoid-ellipsoid-spheroid-and-datum-and-h.htm.
- Esri. (s. f. C). Georreferenciación y sistemas de coordenadas. Recuperado de: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm>.
- Esri (s. f. D). Principios básicos de georreferenciación de un dataset ráster. Recuperado de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/fundamentals-for-georeferencing-a-raster-dataset.htm>
- Fuentes. (2017). Recomendaciones sobre drones y fotogrametría. Cartago, Costa Rica. Comunicación personal.
- Google Earth Pro. (Versión 7.0 beta). [Software] (2017). Obtenido de: <http://www.google.es/earth/download/gep/agree.html>
- Gutiérrez. (2011). Tema II medición de distancia y teoría de errores. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/topografiaunefm/tema-2-medicion-de-distancia-y-teoria-de-errores>.
- Kowalski. (s. f.). Técnicas auxiliares para laboratorio. Errores. Recuperado de: <http://www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Errores.pdf>.
- Levy, S. (2002). Administración de proyectos de construcción (Rosas, R., trad.). México: Mc-Graw-Hill (Obra original publicada en 2002).
- Lozano-Rivas, W. A. (2011). Determinación del número mínimo de observaciones en investigación, obviando las estimaciones de la varianza de datos. *Revista de Didáctica Ambiental [en línea]*, 10, 54-61.
- Monge. (2017). Recomendaciones sobre drones y fotogrametría. Cartago, Costa Rica. Comunicación personal.
- Muñoz-Narciso et al. (2014). Generación de modelos topográficos a partir de fotogrametría digital automatizada en un río de gravas altamente dinámico. *XIII Reunión Nacional de Geomorfología*, 335- 338.
- Neitzel, F., & Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38, 1-6.
- Ortiz. (2009). Atlas Digital de Costa Rica 2008. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Parrot. (s. f. A). Guía del usuario Bebop.
- Parrot. (s. f. B). Guía del usuario Bebop 2.
- Parrot. (s. f. C). Disco. Recuperado de: <https://www.parrot.com/es/drones/parrot-disco#parrot-disco>.
- Pérez Cervantes, J. C. 2004. Planeación y control de obra del Instituto de Religión Tampico: propuesta de análisis y evaluación de planeación estratégica y riesgo. (Tesis Maestría). Universidad de las Américas. Puebla, México.
- Pinzón, J. (2017). Drones en las Geociencias. Guía de Implementación en la Cartografía (Tesis de pregrado) Universidad de Cundinamarca, Colombia.
- Piña (2017). Entrevista sobre drones y fotogrametría. San José, Costa Rica. Comunicación personal.
- Pix4D. (2017). Pix4D Capture (Versión 3.8.8.) [Aplicación Móvil]. Descargado de: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.Pix4D.Pix4Dmapper&hl=es_419
- Pix4D. (s. f. A). (Android) Pix4Dcapture - Getting Started. Recuperado de: <https://support.Pix4D.com/hc/en-us/articles/202557269--Android-Pix4Dcapture-Getting-Started#gsc.tab=0>.
- Pix4D. (s. f. B). (Android) Pix4Dcapture – Manual. Recuperado de: <https://support.Pix4D.com/hc/en-us/articles/203873435--Android-Pix4Dcapture-Manual#gsc.tab=0>.
- Pix4D. (s. f. C). (Android) Takeoff checks fail. Recuperado de: <https://support.Pix4D.com/hc/en-us/articles/203873435--Android-Pix4Dcapture-Manual#gsc.tab=0>.
- Pix4D. (s. f. D). Pix4D Mapper 4.0/Feature List.
- Qgis. (2.18.13) [Software] (2017). Obtenido de: <http://www.qgis.org/es/site/>.
- Qgis. (2014). Complemento georreferenciador. Recuperado de: http://docs.qgis.org/2.2/es/docs/user_manual/preamble/preamble.html.
- Sánchez. (2004). Geodesia y cartografía, los conceptos y su aplicación práctica. Recuperado de: <https://books.google.co.cr/books?id=dIUurxOj4A8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

- Souto-Vidal, M., Ortiz-Sanz, J., & Gil-Docampo, M. (2015). Implementación del levantamiento eficiente de fachadas mediante fotogrametría digital automatizada y el uso de software gratuito. *Informes de la construcción*, 67(539), 107.
- Sutton, Dassau y Sutton. (2009). Una introducción amable a los SIG. Recuperado de: http://docs.qgis.org/2.18/es/docs/gentle_gis_introduction/index.html
- Vázquez, P. y Backoff, M. (2017). Procesamiento geoinformático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte. Publicación técnica No. 490. Instituto Mexicano del Transporte, México.
- Walkera. (s. f.). Vitus Specs. Recuperado de: <http://www.walkera.com/index.php/Goods/canshu/id/46.html>.