



**COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE
SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE RIEGO
PROYECTOS INTERNOS 2019**

TEMA DE INVESTIGACIÓN:

**“USO DE TECNOLOGÍA GEOESPACIAL EN LA
NIVELACIÓN DE TIERRAS CON PROPÓSITO DE
DISEÑO Y TRAZO DE RIEGO SUPERFICIAL:
METODOLOGÍA”**

Clave de proyecto: RD1912.1

PARTICIPANTES:

Dr Victor Manuel Gordillo Salinas

M.C. Juan Manuel Ángeles Hernández

Dr. Alberto González Sánchez

Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata

INFORME FINAL

Jiutepec, Morelos a 23 de enero del 2020

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	Objetivos.....	5
3	Marco Teórico.....	5
3.1	Aspectos básicos para nivelación de tierras: Método tradicional.	5
3.1.1	Concepto e importancia de la nivelación de tierras	6
3.1.2	Beneficios.....	9
3.1.3	Pasos para llevar a cabo una nivelación	10
3.1.4	Levantamiento topográfico para el proyecto de nivelación.....	11
4	Materiales y Métodos	14
4.1	Análisis general de la zona de interés	14
4.2	Fotogrametría con Vehículos Aéreos No tripulados (VANTs).....	16
4.2.1	Plataforma de vuelo.....	17
4.2.2	Sistema de control de vuelo.....	18
4.2.3	Sistema de comunicaciones.....	20
4.2.4	Estación de control en tierra.....	21
4.3	Parcelas piloto para nivelación de tierra.....	21
4.4	Campañas de vuelo	26
4.4.1	Diseño del Vuelo	27
4.5	Puntos de control terrestre (GCP, <i>Ground Control Point</i>).....	38
5	Procesamiento de fotogramétrico.....	42
5.1	Flujo de trabajo del software Pix4D	44
5.1.1	Interfaz e ingreso de datos iniciales del Pix4D.....	45
5.1.2	Pasos del procesamiento en Pix4D.....	50
6	Evaluación de la exactitud	56
6.1	Parámetros estadísticos	59
7	RESULTADOS	60
7.1	Campañas de vuelo	60
7.2	Levantamientos de puntos de control en tierra.	61
7.3	Los productos generados por el software Pix4D.....	62
7.3.1	Nube de puntos.....	62



7.3.2	Modelo Digital de elevaciones.....	64
7.3.3	Ortomosaicos.....	65
7.4	Exactitud de los modelos	67
8	Conclusiones	75



1 INTRODUCCIÓN

La percepción remota ha evolucionado a través del tiempo, buscando capturar datos confiables de los objetos de interés de la tierra, las limitantes que en un principio se presentaron se están superando al aumentar las resoluciones temporales, espectrales y espaciales. El desarrollo de nuevas plataformas y nuevos dispositivos, ha logrado capturar imágenes mediante cámaras montados en vehículos aéreos no tripulados de manera rápida, barata y confiable. Una de las áreas donde se ha probado la eficiencia de estas metodologías ha sido en el campo de la topografía, con el objetivo principal de sustituir las actividades tediosas, caras, de alto consumo de tiempo y en algunas ocasiones peligrosas, que conlleva la topografía convencional.

El uso de las imágenes desde vehículos aéreos no tripulados, el desarrollo de las técnicas de visión por computadora y la fotogrametría, permiten estimar puntos tridimensionales de un área de interés, con lo cual es posible representar la superficie de la tierra. A pesar de los muchos estudios, es necesario la realización de una metodología que entregue a los técnicos e investigadores parámetros robustos para la obtención de resultados factibles tanto en estimaciones de la planimetría como de la altimetría. Una de las mayores cuestiones que ocupa a los distintos involucrados en el uso de estas tecnologías disruptivas, es la exactitud de los datos colectados por estos dispositivos.

La exactitud de un levantamiento hecho con un vehículo aéreo no tripulado (VANT), es el resultado de diversas variables, incluyendo diseño del vuelo, calidad de la cámara, metodología de modelación de la cámara, algoritmos de estructura del movimiento (SfM, por sus siglas en inglés) y estrategias de georreferenciación.

Los programas especializados en fotogrametría con imágenes de VANT, proporcionan un procesamiento muy automatizado y algoritmos de SfM que entregan muy buenos rendimientos. Estos programas son muy intuitivos y prácticamente el usuario es poco participe del flujo de trabajo que realiza



internamente, por lo tanto, el punto clave para la obtención de productos de buena calidad queda restringido a la forma correcta para adquisición de las imágenes de campo y la colocación de puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés). La nivelación de tierras es una actividad que consiste en realizar cortes en las partes altas de una parcela y transportarla a las partes más bajas de la misma. En agricultura de riego superficial esta actividad aporta grandes ventajas como: Ahorro de agua, mano de obra y energía, alta uniformidad en la aplicación del agua (con diseño y manejo adecuados), mayor eficiencia en el uso de fertilizantes, operación más eficiente de la maquinaria, control de la erosión, mejoramiento del drenaje superficial. Debido a la importancia de dicha actividad, el objetivo de este trabajo es desarrollar y validar una metodología para el levantamiento topográfico usando imágenes aéreas tomadas con drones y que dicha metodología pueda ser una herramienta que pueda dar un seguimiento periódico a las necesidades de nivelación de un terreno agrícola.

2 Objetivos

- Desarrollar una metodología para el levantamiento fotogramétrico mediante el uso de VANTs.
- Validar la precisión de los datos capturados mediante el levantamiento con VANTs.

3 Marco Teórico

3.1 Aspectos básicos para nivelación de tierras: Método tradicional.

Uno de los principales problemas que enfrentan los productores agrícolas en las áreas de riego por gravedad en nuestro país y en el mundo, es la baja eficiencia con que se aplica el agua, así como la deficiente distribución con la que logra quedar en la zona de raíces de los cultivos.

El primer aspecto repercute en desperdicio de este recurso vital, considerado ya limitante para el desarrollo sustentable de la humanidad, y por supuesto, en la



rentabilidad de la empresa agrícola, sobre todo en las regiones donde el agua es extraída del subsuelo mediante equipos de bombeo.

El segundo aspecto, impacta negativamente en el desarrollo adecuado de los cultivos, causando bajos rendimientos y mala calidad de las cosechas, lo cual también repercute en bajos ingresos económicos para el productor agrícola.

La situación anterior, sin embargo, puede mejorarse sustancialmente eliminando uno de los principales obstáculos que la provocan, que es la irregularidad topográfica de los terrenos agrícolas, mediante su nivelación apropiada. Efectivamente, el mejoramiento territorial de los terrenos agrícolas, mediante los trabajos de nivelación es una práctica indispensable y, quizá la más impactante para lograr el uso racional del agua en el riego por gravedad.

3.1.1 Concepto e importancia de la nivelación de tierras

La nivelación de tierras es una práctica de acondicionamiento físico del suelo que consiste en la remoción de tierra de las partes altas, su acarreo y depósito en las partes bajas, a fin de dejar una superficie plana que facilite las labores agrícolas, especialmente la aplicación del agua de riego cuando se emplee algún método de riego por gravedad.

Técnicamente, el proyecto de nivelación de tierras es equivalente al diseño de laterales en el riego por aspersión o al diseño líneas regantes y distribuidores en el diseño del riego localizado, donde los diámetros de tubería deben seleccionarse de tal forma que las variaciones de presiones y gastos caigan dentro de límites preestablecidos, para garantizar uniformidad en la distribución del agua.

La superficie plana generada con la nivelación, no debe ser necesariamente horizontal, sino que debe ajustarse hasta donde sea posible, a las exigencias del método de riego, por una parte, y a las pendientes naturales del terreno, por otra, lo cual distingue a la nivelación de terrenos agrícolas de la nivelación que se hace previa a la construcción de edificios, por ejemplo, en la ingeniería civil.



Existen tres grados de nivelación con base en la topografía del terreno, las cuales se describen enseguida.

a) Nivelación de primer grado: Corresponde a los terrenos en los que la disposición de las curvas de nivel muestra una topografía semejante y bastante uniforme, y en donde con dos o tres pasos de la niveladora se logra proyectar un buen trazo de riego, como es el caso de la que se muestra en la Figura 1. En este tipo de nivelación no se efectúan cálculos previos de plano y cotas proyecto, y no se modifican las pendientes naturales del terreno.

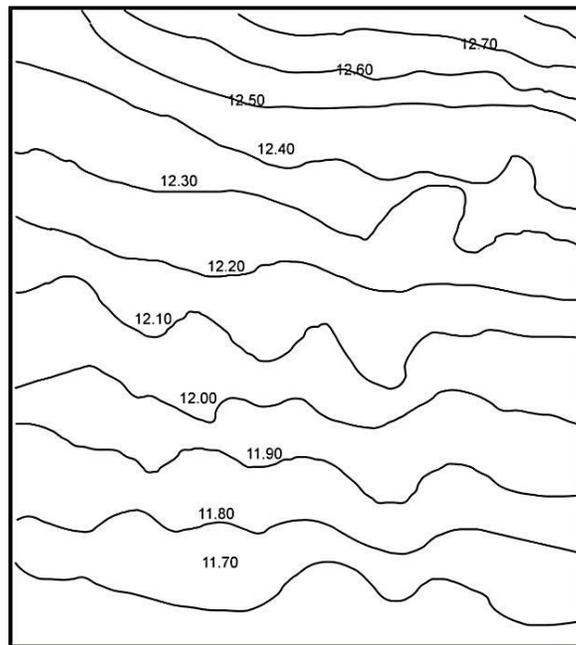


Figura 1 Topografía que requiere nivelación de primer grado

b) Nivelación de segundo grado: Se refiere a topografías en su mayor parte similares al caso anterior, pero con irregularidades aisladas, como pequeñas elevaciones o depresiones. En este caso, debe utilizarse equipo de movimiento de tierras, lo que implica operaciones de corte, acarreo y depósito y, posterior a ello, realizar una operación de afine con niveladora como la que se muestra en la Figura 2. En este tipo de nivelación es obligatorio efectuar un proyecto cuidadoso de los



cortes a realizar y de los volúmenes a mover, pero para conservar su carácter de nivelación de segundo grado, no deben hacerse modificaciones a las pendientes naturales del terreno.

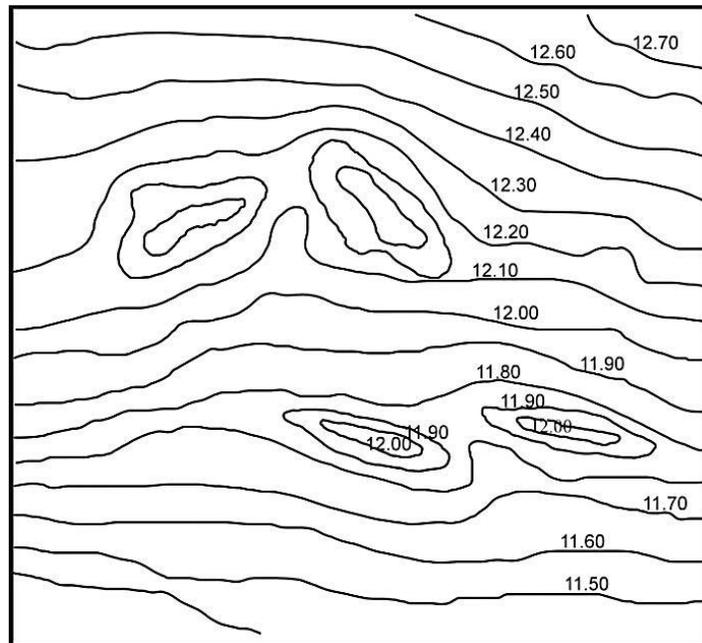


Figura 2. Topografía que requiere nivelación de segundo grado

c) Nivelación de tercer grado: Es la que se requiere efectuar en aquellos terrenos cuya topografía es bastante irregular, en donde es necesario mover tierra en todo el lote mediante equipos diseñados para cortar, acarrear y depositar la tierra a distancias apreciables. También en este caso se requiere una operación posterior de alisado o afine para dejar la superficie adecuada para el riego por gravedad (Figura 3). En este caso, con frecuencia se tiene que modificar, al menos en la dirección del riego, la pendiente natural del terreno.

Toda vez que las nivelaciones de primer grado requieren un mínimo de apoyo técnico, sólo se hará referencia de aquí en adelante a las nivelaciones de segundo y tercer grado, mismas que generalmente se llevan a cabo donde existe o se planea establecer alguna variante de riego por gravedad.

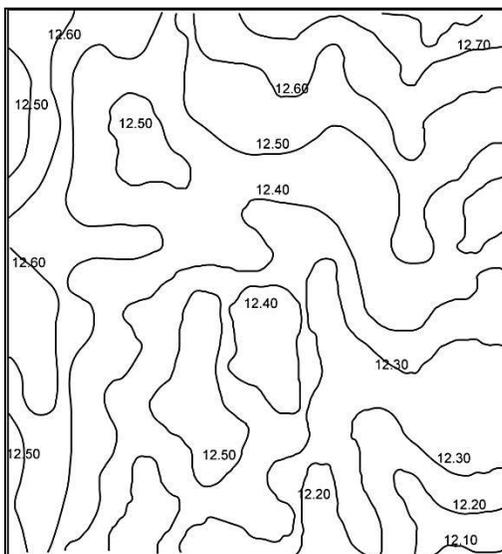


Figura 3. Topografía que requiere nivelación de tercer grado

3.1.2 Beneficios

La nivelación de tierras se justifica en cualquier proyecto de irrigación, ya que generalmente se invierten sumas considerables en obras de captación y distribución y, comparativamente, se hacen inversiones bajas en la parcela, que es donde se refleja la bondad de todo un complejo sistema de irrigación.

Los beneficios potenciales de esta práctica de mejoramiento territorial podrían repercutir en cerca del 90% de la superficie de riego del país y un 80% de la superficie de riego mundial, la cual se riega por métodos superficiales.

De manera puntual, en la nivelación de terrenos agrícolas se identifican los siguientes beneficios principales:

- a) Elevadas eficiencias de aplicación y de uniformidad del riego (con diseño y manejo adecuado del riego).
- b) Ahorro de agua, mano de obra y energía.
- c) Mejoramiento del drenaje superficial.
- d) Control de la erosión.
- e) Mayor eficiencia en el uso de fertilizantes.



- f) Operación eficiente de la maquinaria.
- g) Mayor eficiencia en casi todas las prácticas de manejo del cultivo.

3.1.3 Pasos para llevar a cabo una nivelación

La nivelación tradicional consiste en:

- 1) Determinar las condiciones topográficas actuales del terreno, estableciendo una cuadrícula en el campo empleando tránsito, cinta y nivel fijo, dejando estacas permanentes en el campo para ayudar a la ejecución de los trabajos. A un lado de cada estaca, se establecerá un trompo a ras del suelo, al cual se le determinará la cota con nivel fijo y servirá como nivel de referencia, durante el control del movimiento de tierras.
- 2) Efectuar el cálculo del plano proyecto por alguna variante del principio de mínimos cuadrados.
- 3) Calcular datos de construcción (espesores de cortes y rellenos) y utilizar un sistema de señalamiento de éstos en el campo, auxiliándose de las estacas colocadas en el inciso a).
- 4) Realizar el movimiento de tierras con equipos e implementos de tracción mecánica, llevando un control de los datos de construcción (cortes y rellenos), auxiliándose con personal de apoyo, para garantizar que los cortes y rellenos resultantes correspondan a los datos de proyecto (con alguna tolerancia preestablecida).
- 5) Una vez que el movimiento de tierras grueso ha sido aceptado, quitar las estacas y dar un alisado final con escrepa de arrastre o con niveladora ("land plane").

Los pasos para llevar a cabo una nivelación con tecnología láser consisten en:

- 1) Levantamiento topográfico, el cual puede realizarse con equipo topográfico convencional, equipo de nivelación láser independiente del utilizado para el



- control del movimiento de tierras, o bien con el propio sistema de nivelación de control láser.
- 2) Cálculo de las pendientes proyecto, con alguna variante del principio de mínimos cuadrados.
 - 3) Movimiento de tierras grueso y fino, con el sistema automático de control láser.

Los pasos para llevar a cabo una nivelación con tecnología GPS consisten en:

- 1) Levantamiento topográfico, con el propio sistema de nivelación de control GPS.
- 2) Proyecto de la nivelación computarizado mediante el propio sistema de nivelación de control GPS.
- 3) Movimiento de tierras grueso y fino, con el sistema automático de control GPS.

3.1.4 Levantamiento topográfico para el proyecto de nivelación

Obtener las condiciones actuales del terreno, es el primer paso y por tanto la base para el proyecto de la nivelación de tierras. Con el fin de apartarse lo menos posible de las pendientes naturales, para minimizar los costos del movimiento de tierras y afectar lo menos posible al terreno, debe realizarse un levantamiento topográfico preciso, lo cual puede hacerse mediante cuadrícula con un equipo tradicional (tránsito o teodolito, cinta y nivel fijo), o bien, levantando suficientes puntos emulando una cuadrícula, utilizando equipo de estación total o un equipo GPS de precisión milimétrica (Figura 4).

uno de los linderos, empezando por la esquina del terreno cuyos linderos se aproximen más a un ángulo recto, y a una distancia desde el lindero del terreno igual a la mitad del módulo de cuadrícula elegido (Figura 6).

Note que el origen del sistema de referencia (ejes X, Y, Z), se considera que está a una distancia L de la primera hilera y de la primera columna de estacas.

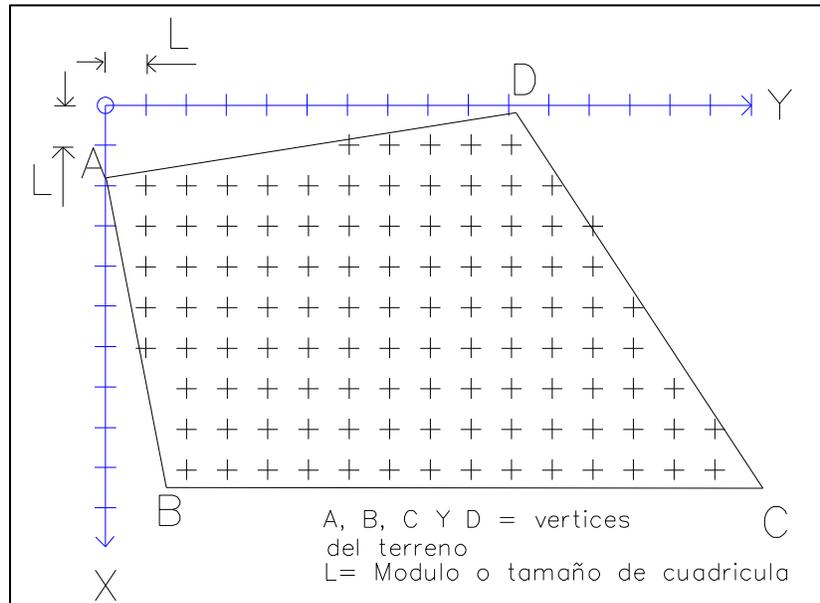


Figura 6. Establecimiento de la cuadrícula en un terreno de geometría irregular

Con los datos de campo se elabora un plano a una escala de 1:1,000 a 1:2,000 dependiendo de la superficie por nivelar y se interpola para obtener curvas de nivel con equidistancia de 0.20 a 1.00 m en función de las pendientes generales originales del terreno. El plano obtenido permite dividir el área por nivelar, de acuerdo con su topografía, en secciones que pueden nivelarse por separado y así reducir los costos de nivelación tal como se ilustra en la Figura 7, en la que el terreno esquematizado se ha dividido en 8 secciones.

En esta etapa es necesario tomar en cuenta que las secciones de nivelación tengan pendientes generales acordes con los distintos métodos de riego que puedan implementarse y tratar de obtener secciones de forma rectangular; asimismo, se debe prever el abastecimiento de agua y el drenaje superficial. Los instrumentos



topográficos de estación total permiten actualmente el levantamiento en tres dimensiones (X, Y, Z) de puntos del terreno, de manera rápida, segura y con precisión milimétrica. Pueden, por tanto, emplearse con ventaja estos instrumentos, para elaborar proyectos ejecutivos de nivelación de tierras.

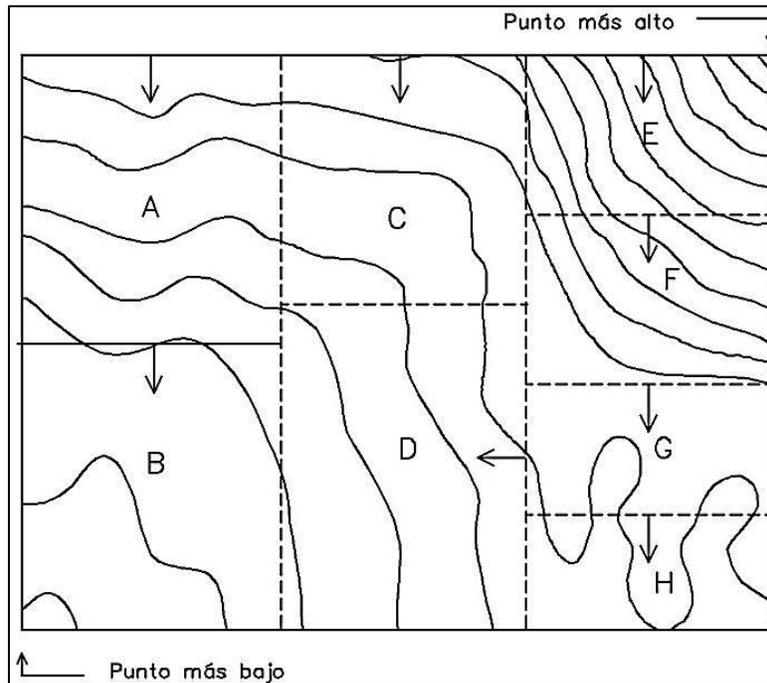


Figura 7. Definición de secciones que deben de nivelarse por separado

4 Materiales y Métodos

4.1 Análisis general de la zona de interés

El área o superficie de interés es uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta antes de realizar las misiones o también llamadas campañas de vuelo, ya que cada superficie tiene características particulares. Los puntos clave que se deben analizar antes de programar un levantamiento con drones son: la topografía, disponibilidad de áreas de despegue y aterrizaje, la seguridad del sitio, la cantidad de superficie a volar, la altura de los objetos presentes en el área, entre otras cosas.



Para el caso particular de nivelación de tierras en parcelas agrícolas con riego superficial, se tiene como condicionante realizar el menor movimiento de tierra, por lo que la parcela no debe de tener irregularidades muy fuertes, ya que los cortes y rellenos serían muchos y por lo tanto el costo de esta actividad sería muy elevado, la CONAGUA, sugiere que se mueva máximo un volumen de 500 m³ por hectárea, otra desventaja de hacer cortes significativos es la pérdida de fertilidad de los suelos.

Gallardo (1987) menciona que las condiciones a cumplir por un suelo a nivelar, es la de poseer una profundidad de al menos 1.5 m con un perfil homogéneo, donde los cortes de 20 a 30 cm no alteren demasiado su fertilidad, también menciona que para las zonas de corte es necesaria una fertilización diferente al resto del sector, basados en análisis de suelo.

Una solución práctica a terrenos con necesidades de nivelaciones muy fuertes, es la de optar por un riego presurizado en lugar de seguir usando riego por gravedad.

Bajo las premisas anteriores, se definen las parcelas factibles para nivelación y, por lo tanto, el tamaño de la parcela será la característica de mayor peso a considerar en la captura de información con el sistema VANT-sensor. Con base en lo anterior, el usuario tendrá que definir la plataforma de vuelo para el levantamiento fotogramétrico, Harwing (2017) reporta algunas reglas generales sobre los equipos de vuelo (Figura 8)



Características	Multirotor	Ala fija
Cobertura	10-20ha/vuelo (@120 m)	100-150 ha/vuelo (@120 m)
Tiempo de Vuelo	Usualmente <25 min	Usualmente 45 -90 min
Peso máximo/peso de carga	6-7 kg/<1 kg	10Kg/<1 Kg
Velocidad de vuelo	Vuela lento (2.5-6 m/s) o se detiene para capturar una imagen	Vuela muy rápido por lo que se necesita un disparador muy rápido para evitar desenfoque.
Tipo de Imagen	Nadir y Oblicuas hasta 20 °	Nadir y no comúnmente oblicua al menos que se le adapte un dispositivo.

Figura 8. Características generales del desempeño de un VANT Multirotor y Ala fija.

4.2 Fotogrametría con Vehículos Aéreos No tripulados (VANTs)

Velasco et al. (2012), menciona que para emplear VANTs en la fotogrametría al menos cuatro subsistemas principales deben ser tomados en cuenta como son:

- *Plataforma de vuelo*: Compuesto por el VANT en sí y la carga útil a bordo de este (Cámaras y otros sensores).
- *Sistema de control de vuelo o FCS (Flight Control System)*: Se compone de todos los sensores, microprocesadores y dispositivos mecánicos que son los encargados de geo-referenciar la información adquirida por la plataforma en vuelo y contribuir al control y estabilización del VANT.
- *Sistema de comunicaciones*: Se compone de enlaces de comunicación, vía radio, entre la estación de control de tierra y el vehículo aéreo no tripulado. Se caracteriza por ser el encargado de transferir la información adquirida por la plataforma en vuelo y garantizar la comunicación entre el centro de control y la plataforma de vuelo.
- *Estación de Control de Tierra o GCS (Ground Control Station)*: Se compone del conjunto de ordenadores y/o dispositivos que monitorizan y supervisan la



plataforma de vuelo y su FCS. Cuenta con un sistema de observación para realizar el análisis (generalmente gráfico) de la información adquirida e integrarla en una aplicación relacionada con el propósito de la misión.

4.2.1 Plataforma de vuelo

4.2.1.1 Vehículo Aéreo No tripulado (VANT)

En este estudio se usó un VANT comercial nombrado Phantom 4 Pro V2.0 (DJI, Nanshan, Shenzhen, China), el VANT tiene un peso menor a 2 Kg, por lo tanto, según la clasificación de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) de México, emitida en Julio de 2017, cae en la categoría de “*Micro RPAS*” (Figura 9), es importante mencionar que esta clasificación es basada en el peso máximo de despegue (< 2 kg, 2.001-25 kg y >25.001 Kg) y el uso que se le da a la aeronave (privado recreativo, privado no comercial y comercial).



Figura 9. VANT Micro RPAS Phantom 4 pro V2.0 (Fuente: microcoptero.com)



La aeronave tiene una autonomía de vuelo de 30 minutos, con velocidad de ascenso máximo de 6 m/s y de descenso de hasta 4 m/s, la velocidad máxima en vuelo es de 72 km/h, cuenta con una resistencia máxima al aire de 10 m/s.

4.2.1.2 Cámara Digital

La cámara es uno de los elementos importantes en sistema VANT-Sensor. El sistema usado en el trabajo de investigación es un VANT con una cámara RGB el cual tiene un sensor CMOS de 1 pulgada y 20 megapíxeles de pixeles efectivos, cuenta con una lente con un FOV de 84° 8.8 mm/24 mm (equivalente a un formato de 35 mm) f/2.8 – f/11, capaz de grabar vídeos a 4K/60 fps y fotografiar en modo disparo en ráfaga a 14 fps.

Las imágenes tomadas por el sensor son almacenadas en una memoria micro-sd colocada en una ranura lateral del dron, cuando el almacenamiento está llegando a su máxima capacidad, el software te indica que no es posible continuar guardando hasta que liberes espacio, el mismo software no permite llevar a cabo la misión de vuelo.

4.2.2 Sistema de control de vuelo

El VANT tiene en la parte central superior un GPS y una brújula que determina la posición y altura del dron, también en esa zona se encuentra el controlador de vuelo y el transmisor de video. Además, el Phatom 4 pro v2.0 ® tiene el sistema Flight Autonomy que incluye sensores dobles de visión trasera y sensores infrarrojos para un total de 5 direcciones de detección de obstáculos y un sistema anticolidión en 4 direcciones (Figura 10).

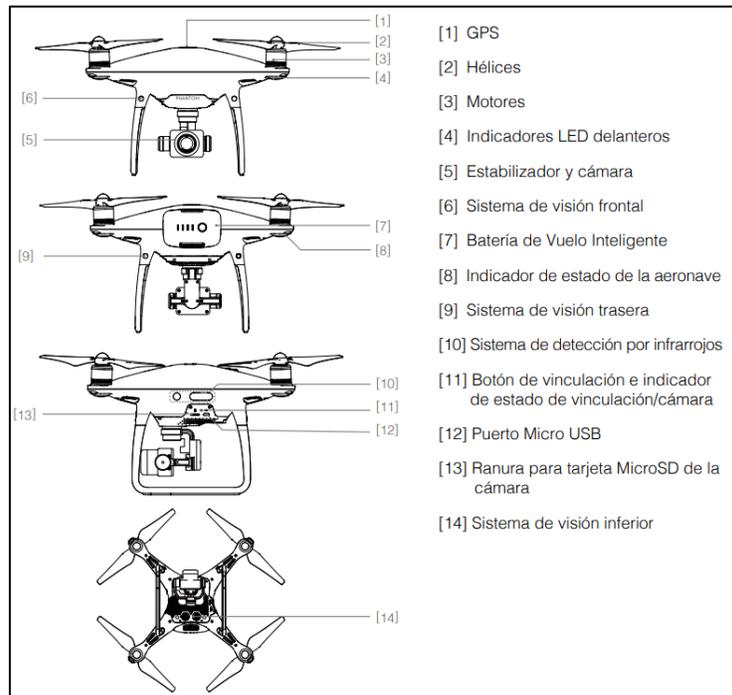


Figura 10. Diagrama de la aeronave Phantom 4 pro v2.0 (Fuente: manual de usuario V1.2, 19-07-2017)

El sistema de control del vuelo usa dos sistemas de posicionamiento satelital (GPS y GLONASS).

El receptor de posicionamiento se usó para la navegación de las aeronaves y para etiquetar con coordenadas a las imágenes tomadas por su cámara, por lo que su posición calculada es usada durante el procesamiento del structure from motion (SfM) y la georreferenciación.

El controlador de vuelo en el VANT es un piloto automático NAZA (DJI, Nanshan, Shenzhen, China). Este controlador de vuelo permite el vuelo automático durante una misión que consta de puntos de referencia o puntos de latitud, longitud y altura conocida. El firmware programado en el autopiloto del VANT, hace que este navegue a través de todos los puntos de referencia utilizando la información proporcionada por el sistema inercial, el barómetro de precisión, la brújula electrónica y el sensor GPS.

Cuando el equipo es nuevo y cada vez que se mueva de un área a otra, es necesario calibrar la brújula del VANT, esta tarea fue realizada con la aplicación *Dji GO 4*, esta aplicación indicará si la distancia que se recorrió fue muy grande y amerita volver a calibrar el sensor.

El procedimiento de calibración se realiza en dos pasos sencillos, el primer paso es colocar la aeronave en forma horizontal y girarlo 360 ° en dirección opuesta a las manecillas del reloj (Figura 11a) y el segundo paso es colocarlo en forma vertical y volver a realizar el mismo giro en contra de las manecillas del reloj (Figura 11b), además la aplicación sirvió para verificar los parámetros de la aeronave como son: recepción de satélites, establecer altura máxima de vuelo, verificar funcionamiento de los sensores de visión, revisar la transmisión de video, entre otras cosas, con lo cual pudimos constatar el funcionamiento óptimo de los sensores.

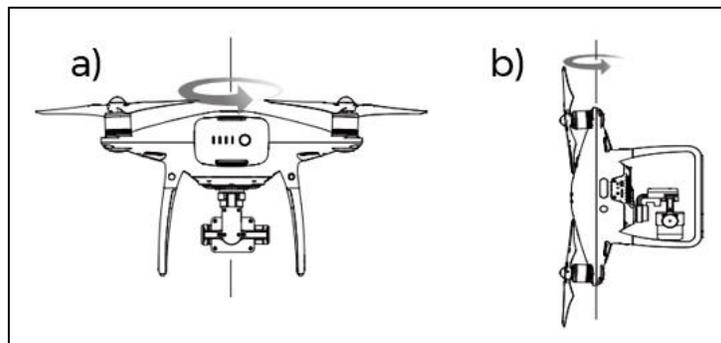


Figura 11. Calibración de la brújula del VANT. a) giro de 360 ° en forma horizontal. b) giro de 360 ° en forma vertical.

4.2.3 Sistema de comunicaciones

El phantom 4 pro tiene un sistema de comunicación inalámbrica multifunción que integra los sistemas de doble frecuencia de transmisión de video y de control remoto de la aeronave. El enlace de transmisión de video de 5.8 GHz se recomienda en entornos urbanos para evitar interferencias, mientras que el de 2.4 GHz funciona bien para distancias de transmisión largas en zonas despejadas (DJI, 2017).



4.2.4 Estación de control en tierra

La estación de control en tierra hace referencia a los dispositivos con los cuales el operador cuenta para darle seguimiento a las misiones de vuelo o en caso de emergencia tomar control de la aeronave.

La estación de control es el lugar donde se diseñan todas las operaciones (misión, calibración, etc) previo al despegue del VANT.

El VANT utilizado en este trabajo de investigación, cuenta con un control remoto y una tableta. La tableta almacena el software para diseño de las misiones y la revisión del estatus del VANT mientras que el control remoto hace la función de establecer el link entre la Tablet y el VANT y según el fabricante la comunicación entre el control y la aeronave es de hasta de 7 km (sin obstáculos, libre de interferencias), además de que se puede tener injerencia en cualquier momento sobre las campañas de vuelo del VANT.

Como se señaló anteriormente las parcelas del estudio son relativamente planas, debido a esto, el lugar de la estación de control de tierra (*GCS, Ground Control Station*) o comúnmente llamado el "Home" no es relevante.

Cuando el terreno es muy abrupto, la recomendación general es buscar el punto más alto para el despegue y aterrizaje, por lo tanto, es ahí donde se instala la GCS, con esto se busca dominar el área a volar, evitar pérdidas de señal por interferencia de objetos más altos que el punto donde se localice la GCS y además evitar la pérdida de visión del VANT en vuelo.

4.3 Parcelas piloto para nivelación de tierra

El Distrito de Riego 043 Estado de Nayarit, se localiza en la parte Noroeste de la República Mexicana. Fue establecido por decreto presidencial con una superficie total de 43,453 hectáreas (ha) y con una superficie de riego de 43,164. Está constituido por cuatro módulos - El Módulo I, Valle de Banderas; Modulo II, Margen



Izquierda del Río Santiago, Modulo III Margen Derecha del Río Santiago y Modulo IV, Margen Derecha del Río San Pedro- que abarcan siete municipios del Estado de Nayarit: Rosa morada, Ruiz, Tuxpan, Santiago Ixcuintla, San Blas, Tepic y Bahía de Banderas.

El Distrito se localiza dentro de tres cuencas, Ríos Ameca-Ixtapa perteneciente a la región hidrológica RH14, Río Lerma-Chapala-Santiago región RH12 y Río San Pedro región RH11. El sistema hidrográfico de Nayarit (Figura 4) descarga a la vertiente del Océano Pacífico a través de cuatro ríos principales y seis secundarios quedando comprendidos parcialmente en las Regiones Hidrológicas No. 11, 12, 13 y 14. Las corrientes superficiales de mayor importancia en el estado son los ríos Acaponeta, San Pedro, Santiago y Ameca por su caudal y uso a que se destinan.



Figura 12. Sistema hidrográfico del Distrito de Riego 043 Nayarit (Fuente: CONAGUA, 2007)



La temperatura media anual es de 25.6° a 26.1° C con una oscilación térmica de 7.8° C. La precipitación media anual va de 1,356.0 a 1,587.7 mm, con una media de evaporación de 1,463.0 a 1,526.7 mm. Con base en el balance hídrico realizado en la región se tiene que el distrito presenta deficiencias en los meses de diciembre a mayo.

Los suelos del Distrito se caracterizan por ser de formación aluvial y de desarrollo joven, son suelos profundos, con textura media, de relieve y pendiente plana, lo que ocasiona que el drenaje superficial sea ligeramente lento. En su mayoría corresponden a Fluvisol Eutrico-Cambisol Eutrico y Fozem Haplico-Fluvisol Eutrico. La falta de pendiente y la topografía suavemente ondulada ocasionan que el drenaje sea deficiente y sea *necesario realizar prácticas de nivelación de suelos*.

Las campañas de vuelo fueron llevadas a cabo en las parcelas agrícolas del Módulo II Margen Izquierda del Rio Santiago, la superficie total del Módulo II es de 23,721 ha (Figura 13),

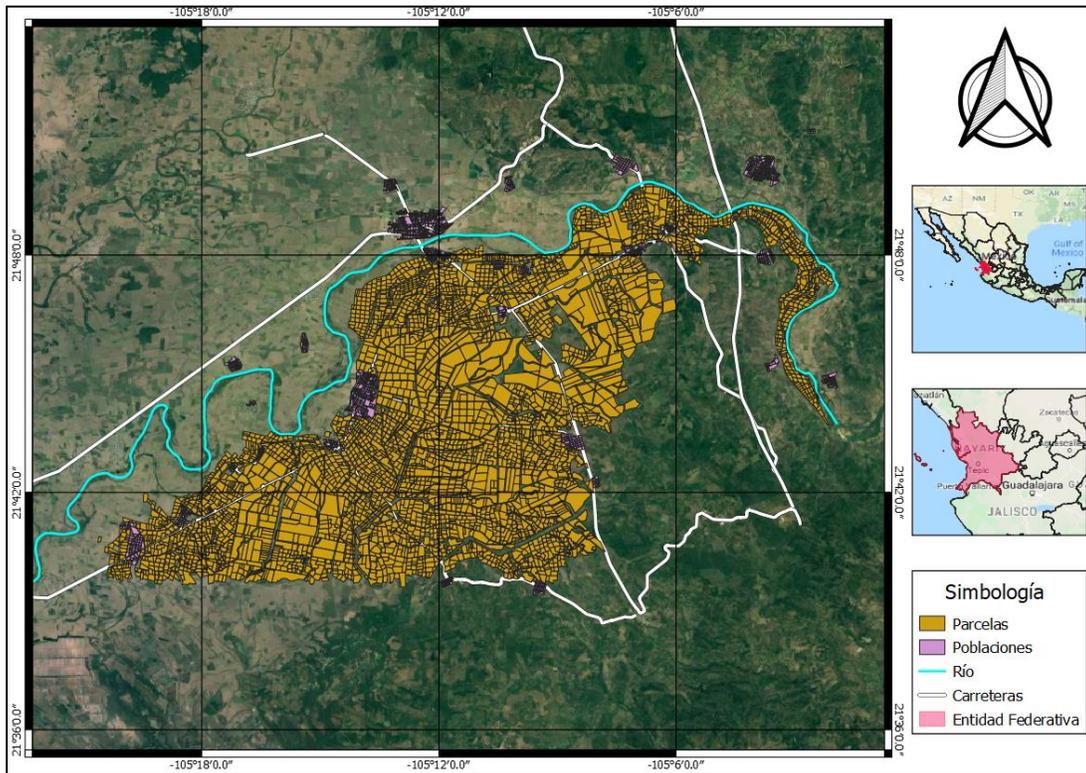


Figura 13. Ubicación geográfica del Módulo II Margen Izquierda del Río Santiago.

Se sobrevolaron 5 parcelas piloto dentro del Módulo II margen izquierda (Figura 14), cubriendo una superficie de 28.92 ha, las parcelas presentaron un límite perimetral con diferente forma geométrica y distintas superficies (Tabla 1), se determinó el relieve de estas parcelas antes de nivelación de tierras y posterior a esta actividad. Es importante comentar que las parcelas fueron seleccionadas de acuerdo a la disponibilidad y el programa de tierras a nivelar con que cuenta el proyecto Riego por gravedad Tecnificado (RIGRAT) que está a cargo de técnicos supervisados por personal del área de riego y drenaje del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

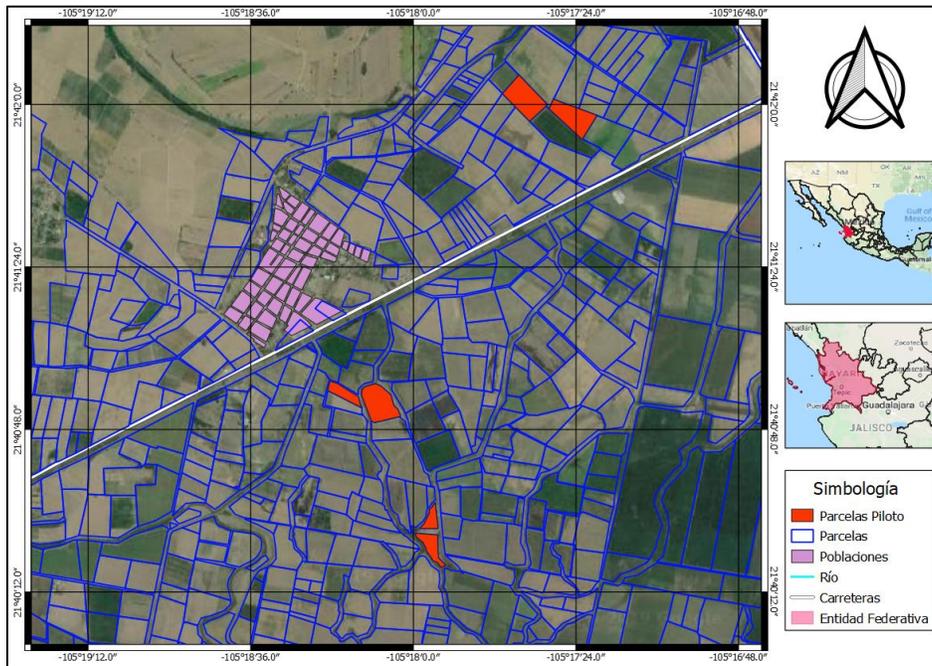
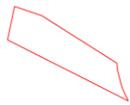


Figura 14. Ubicación geográfica de las parcelas piloto del estudio.

Cuadro 1. Características generales de las parcelas involucradas en el estudio, donde se indican el punto más alto (Cota Mayor), el punto más bajo (Cota menor), la superficie en hectáreas y la forma geométrica.

Parcela	Cota Mayor (msnm)	Cota Menor (msnm)	Superficie (ha)	Forma geométrica
P1	1.061	0.095	6.15	
P2	1.164	0.861	5.07	
P3	3.485	3.059	8.58	



P4	3.392	2.918	5.48	
P5	4.626	2.965	4.85	

4.4 Campañas de vuelo

Se realizaron 9 misiones de vuelo, 5 antes de nivelación del terreno y 4 después de la nivelación de las mimas parcelas piloto del Módulo II Margen Izquierda, del Distrito de riego 043, Estado de Nayarit. En la Figura 15 puede observarse las líneas de vuelo y la posición de las imágenes tomadas durante la misión de vuelo.



Figura 15. Misión de vuelo en Pix4D Capture



4.4.1 Diseño del Vuelo

El diseño del vuelo debe contemplar dos características importantes para el óptimo desempeño (Sanz, et al. 2018):

- El primero es que debe incluir adecuadas vueltas laterales y frontales.
- La segunda es que debe mantener una altura constante sobre el suelo y una cobertura homogénea a través del área entera.

Como se mencionó anteriormente Pix4DCapture fue la aplicación que se usó en este trabajo de investigación para diseñar los planes de vuelo, dicha aplicación requiere de algunos insumos como:

- Selección del tipo de aeronave
- Selección de la misión de vuelo
- Delimitación del área de interés y selección de parámetros de vuelo
- Envío de la misión al autopiloto del VANT y Descarga de datos

4.4.1.1 Selección del tipo de aeronave

El Pix4Dcapture, así como otras aplicaciones para usadas para el diseño de los planes de vuelo, por defecto, tienen precargados algunos modelos comerciales de VANT (Figura 16), dentro de los cuales se encuentra el usado en este estudio (Phantom 4 Pro v2), por lo cual es conveniente revisar diferentes aplicaciones y seleccionar la más adecuada referente a la aeronave que se usará en las campañas de vuelo.

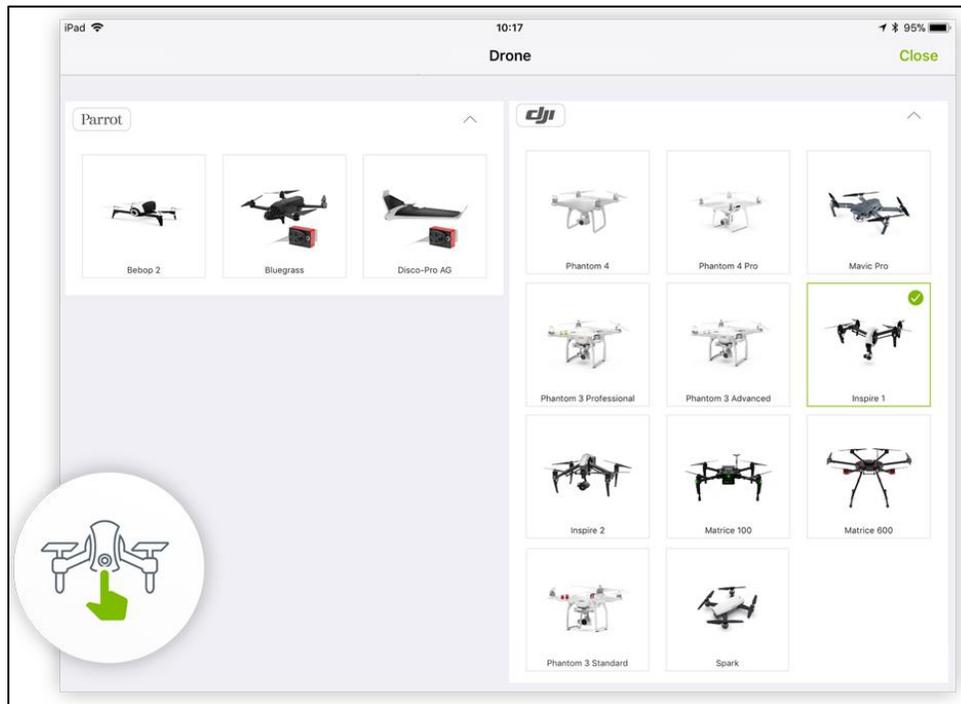


Figura 16. Selección del tipo de dron a usar en el software Pix4DCapture.

4.4.1.2 Selección de la misión de vuelo.

El pix4dCapture tiene 5 diferentes misiones de vuelo, estas opciones son ofrecidas, ya que cada misión de vuelo tiene necesidades diferentes. La app optimiza las líneas de vuelo de acuerdo al área de interés (Figura 17), puede ser diseñado para un terreno de forma irregular (opción polygon), para un área regular (opción Grid), igualmente para conseguir mayor redundancia de datos ofrece la opción de la doble malla (opción Double Grid), es posible obtener vuelos que proporcionen imágenes oblicuas (opción Circular) y por ultimo tiene una opción de modo de vuelo libre, donde el usuario toma el control total del vuelo (Opción Free Flight).

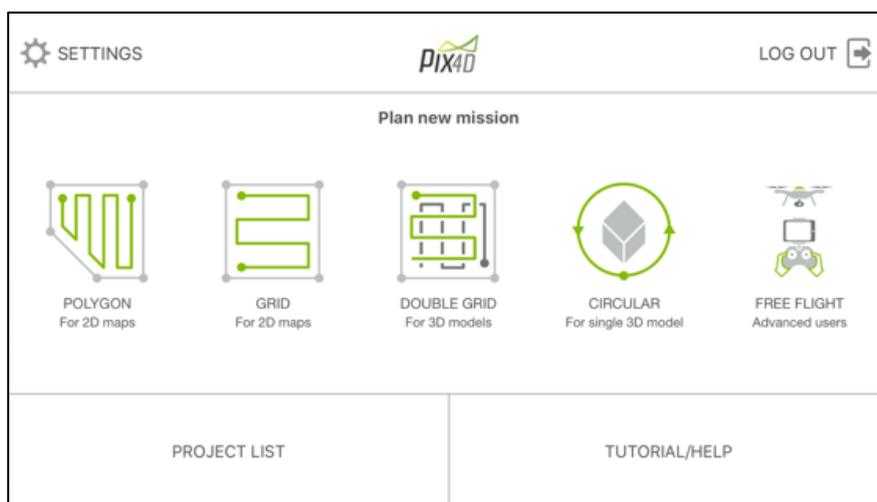


Figura 17. Selección de la misión de vuelo en la aplicación Pix4DCapture, según la necesidad del usuario.

Para las parcelas pilotos de este estudio, el modo de vuelo seleccionado fue el de “Polygon”, ya que los perímetros las áreas sobrevoladas tenían formas irregulares.

4.4.1.3 Delimitación del área de interés y selección de parámetros de vuelo

La delimitación del área de interés (Figura 18) es el paso inicial para determinar las características cuantitativas del plan de vuelo (tamaño de la superficie a volar, el tiempo de duración, el número de líneas de vuelo, etc.) el Pix4DCapture realiza esta acción mediante la configuración de un polígono alrededor de los límites de la zona a volar. Cada proyecto de vuelo es diferente por lo tanto el polígono es configurado según las necesidades del usuario.

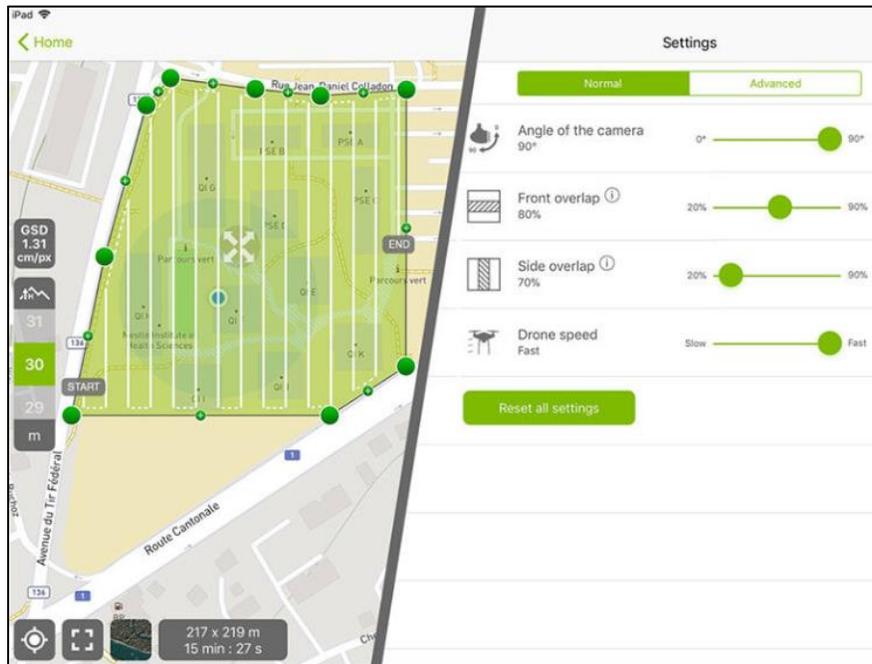


Figura 18. Delimitación del área de interés y selección de parámetros de vuelo en Pix4DCapture.

Siempre que sea posible, la dirección del vuelo debe elegirse de forma que se minimice el número de fotografías necesario para cubrir totalmente el terreno a restituir. En efecto, si este terreno tiene una forma rectangular lo más conveniente será que la dirección del vuelo sea paralela al lado mayor del rectángulo. De esta manera resulta más sencillo adaptar las pasadas del avión a la forma del terreno y se reducirán las zonas exteriores que aparezcan en los fotografías. Además, la misma superficie se podrá cubrir con un menor número de pares lo que supondrá menos costes tanto en el vuelo como en la restitución.

La mayoría de los softwares para diseño de vuelo cuentan con mapas base, esto ayuda a reconocer e identificar la superficie que interesa al usuario, por lo general toman estas imágenes de servidores de mapas web (WMS, por sus siglas en inglés) de fuente libre, el más común es Google Earth.

Debido a que una buena restitución fotogramétrica depende de la cantidad de fotografías en las que aparece un mismo punto, es común que en las orillas de las áreas objetivo tengan una menor calidad al momento de la reconstrucción de los objetos, por lo tanto, el polígono que se dibuje en el software del plan de vuelo debe ser un poco mayor al límite de la zona de interés.

Después de la delimitación de la zona, son 4 los parámetros esenciales que se deben ingresar para el plan de vuelo:

I. ángulo de la cámara

Este parámetro definirá el tipo de fotografía aérea que se coleccionará en la campaña de vuelo. La clasificación en función del eje óptico de la cámara con respecto a la vertical es: fotografía vertical (nadir), inclinada (oblicua) y horizontal.

La fotografía vertical es considerada cuando la inclinación con respecto a la dirección de la gravedad es menor de 3° (Figura 19)

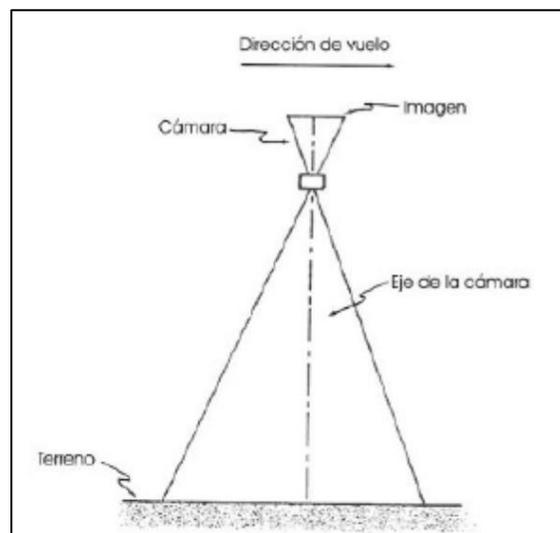


Figura 19. Fotografía vertical (Sifuentes y Vázquez, 1997)

Una fotografía inclinada es aquella en la cual el eje óptico de la cámara es mayor de 3° con respecto a la dirección de la gravedad y se subdivide a su vez en la oblicua

alta cuando la fotografía alcanza a registrar el horizonte, y oblicua baja, cuando no alcanza a registrar el horizonte (Figuras 20 y 21).

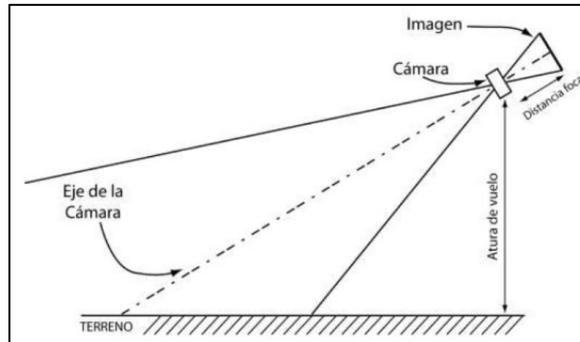


Figura 20. Fotografía oblicua alta (Sifuentes y Vásquez: 1997).

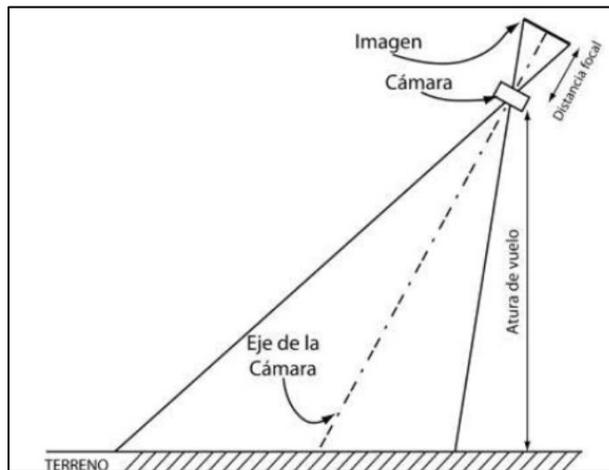


Figura 21. Fotografía oblicua baja (Sifuentes y Vásquez, 1997)

En el caso de las horizontales el eje óptico de la cámara es paralelo a la superficie de la tierra (figura 22).

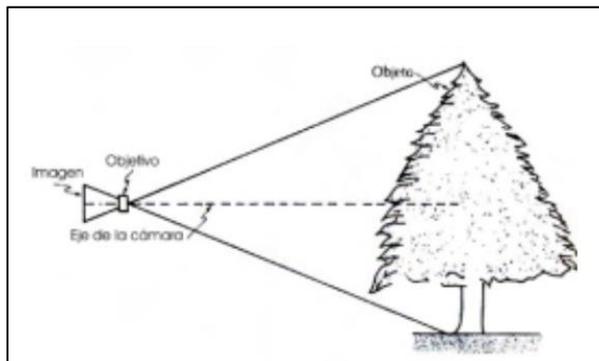




Figura 22. Fotografía Horizontal (Sifuentes y Vázquez, 1997)

Para el caso particular de este trabajo de investigación solo se trabajó con imágenes verticales o también llamadas a nadir. La opción del ángulo de la cámara en la aplicación de Pix4DCapture fue colocada en forma vertical es decir a 90° .

II. Traslape frontal,

Se le llama traslape al recubrimiento entre dos fotografías continuas, es decir la zona de terreno que aparece a la vez en ambas fotografías. La finalidad del vuelo fotogramétrico es la obtención de pares de fotogramas estereoscópicos. La visión estereoscópica sobre cada par de fotogramas consecutivos se limita a la zona de terreno común a los dos. Por tanto, el recubrimiento mínimo necesario para que cualquier zona del terreno a restituir aparezca en dos fotogramas consecutivos sería del 50% de la superficie de cada fotograma (Bustillos, 2014).

El traslape frontal se considera al área en común de dos fotografías continuas en dirección del movimiento del VANT. Las unidades de este parámetro son representadas en porcentaje, lo que se busca con este valor es garantizar que con pequeñas variaciones en la dirección de la toma o en la altura de vuelo no van a provocar que algunas zonas del terreno sean cubiertas por un solo fotograma y no puedan ser restituidas.

En la Figura 23, se ejemplifica los motivos por lo cual, la misión puede presentar un traslape insuficiente.

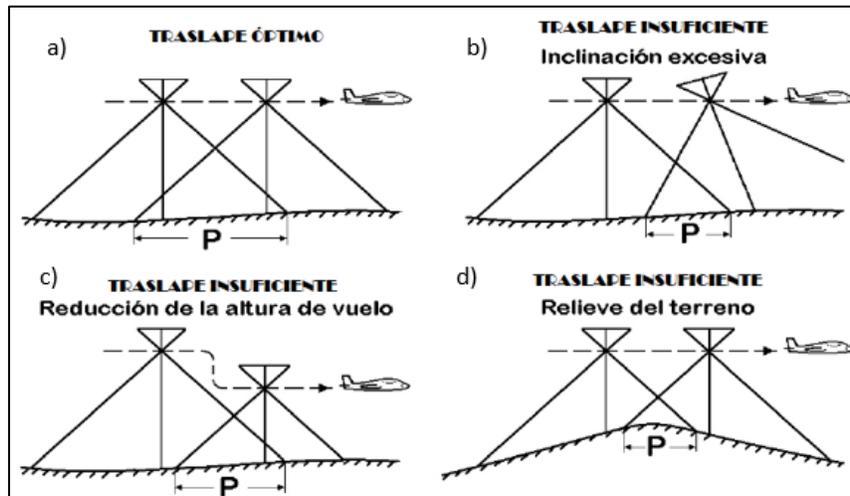


Figura 23. Causas de traslape insuficiente a) traslape óptimo, b) Inclínación excesiva de las dos tomas, c) Cambio brusco de altura de vuelo, d) Cambio brusco de la superficie terrestre (Bustillos, 2014).

Cuando ocurre uno de los casos anteriores, es necesario volver a realizar los vuelos, la solución a estos problemas será el aumento del porcentaje de traslape, o volar esa área en específico.

El traslape frontal usado para esta fue del 80% con el cual se garantizó tener suficiente traslape para evitar problemas de insuficiencia, también al tener un traslape alto fue posible una mejor reconstrucción de los objetos presentes en las imágenes gracias a la redundancia de información.

III. Traslape lateral

El traslape lateral es un término utilizado en fotogrametría para describir la cantidad área compartida entre imágenes de líneas de vuelo adyacentes (Figura 24). La figura 4.6 ilustra un avión que toma dos fotografías superpuestas de dos líneas de vuelo adyacentes. La distancia en el aire entre las dos líneas de vuelo (W) se llama espaciado de líneas.

Este tipo de superposición es necesaria para asegurarse de que no haya brechas en la cobertura. La vuelta lateral se mide como un porcentaje de la cobertura total de

la imagen. El valor típico para la vuelta lateral para el trabajo fotogramétrico es del 30%. Sin embargo, debido al peso liviano del UAS, esperamos una dinámica de aire sustancial y, por lo tanto, rotaciones sustanciales de la cámara (es decir, cangrejo) y, por lo tanto, recomiendo usar al menos un 40% de vuelta lateral (Qassim A. Abdullah, 2018)

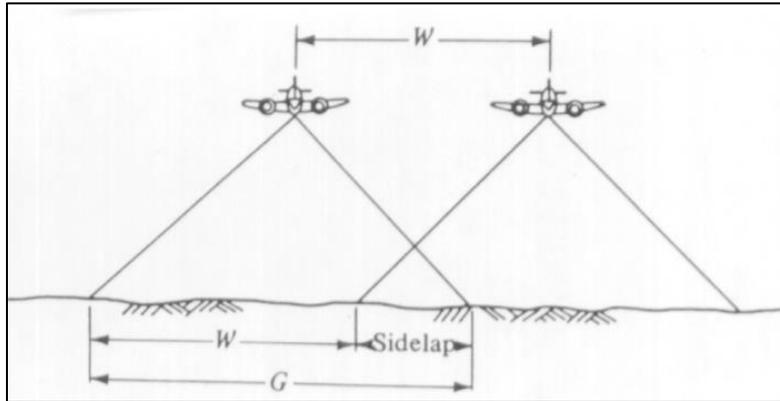


Figura 24. Traslape lateral (Paul et al., 2013)

Todos los vuelos de este proyecto fueron planeados con un traslape lateral del 70%, con lo cual se contó con suficiente traslape lateral para evitar que se tuviera espacios sin levantar entre líneas de vuelo y también con esta alto traslape obtenemos mucha información redundante.

IV. Altura de vuelo.

La altura de vuelo, o altura a la que debe volar VANT que realiza el vuelo fotogramétrico (Figura 25), viene determinada por la escala del vuelo. La escala del vuelo o también conocida como la resolución espacial de la imagen es directamente proporcional a la altura de vuelo, por lo tanto, al aumentar la altura de vuelo la resolución espacial disminuye.

Una de las cuestiones prácticas de un vuelo fotogramétrico es definir a que resolución espacial se requiere la información, lo cual dependerá de la necesidad del trabajo. Para trabajos de topografía es necesaria muy alta resolución espacial de

las fotografías (alrededor de 1 a 2 cm), mientras que para estudios relacionados con cultivos agrícolas no es necesaria una resolución tan fina (del rango de 5 a 10 cm). Por lo tanto, ya definiendo la resolución a la que requerimos la información es posible determinar la altura de vuelo:

$$H = \frac{d}{1 : E_v} = d E_v$$

Donde d= distancia focal, H= altura de vuelo y E_v es la escala de vuelo.

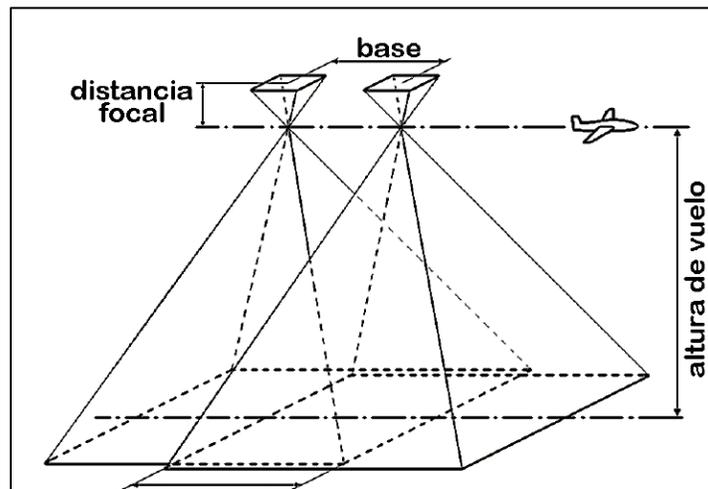


Figura 25. Altura de vuelo del VANT (Bustillo, 2014)

La altura de vuelo para las distintas misiones fueron realizadas a 60 m sobre el nivel del suelo con referencia al punto de despegue. Todas las líneas de vuelo fueron realizadas a una altura constante con la cual se obtuvo una resolución espacial promedio o también llamada Ground Sample Distance (GSD) de 1.78 cm/pixel.

4.4.1.4 Checklist del sistema VANT y Descarga de datos

Antes de enviar la misión de vuelo al VANT, el Pix4DCapture hace una lista de verificación antes del despegue, esta lista debe estar validada para que el VANT



pueda efectuar la operación. Las comprobaciones que realiza la aplicación son las que se describen en la figura 26.

Cheque	Descripción	Misión (s)
✓ Conexión a dron	Verifica que la aplicación esté conectada al dron a través de Wi-Fi o un cable USB conectado al controlador.	Todas
✓ Nivel de batería	Verifica que el nivel de batería del dron, el controlador (si corresponde) y el extensor de alcance (si corresponde) es al menos del 20%.	Todas
✓ Dron GPS	Verifica que el dron esté conectado a al menos 6 satélites GPS para despegar.	Todas
✓ Misión subir	Verifica que el dron esté conectado a la aplicación y que los detalles de la misión se transfieran con éxito al dron.	Rejilla , Doble Rejilla , Circular
✓ Dron-grid distance	Verifica que la distancia entre la posición actual del dron y el centro de la cuadrícula sea inferior a 250 m. Es posible evitar esta seguridad si el dron se quita manualmente y se acerca a la rejilla.	Rejilla , Doble Rejilla , Circular
✓ Punto de inicio	Verifica que la distancia entre el punto de inicio (donde se encendió el dron) y el centro de la cuadrícula es inferior a 150 m. Esta seguridad se puede descartar en la Configuración .	Rejilla , rejilla doble
✓ ... cambiar	Verifica que el interruptor esté en la posición correcta para permitir el piloto automático. El interruptor tiene diferentes posiciones según el dron: FAP / PAF (I1, P3), S1 (P3S) y ASP / PSA (P4).	Rejilla , rejilla doble
✓ Calibración	Verifica que el dron esté calibrado.	Rejilla , Circular
✓ Versión de firmware	Verifica que esté instalada la última versión de firmware del dron.	Rejilla , Circular

Figura 26. Lista de comprobaciones para efectuar el despegue del VANT.

Al momento de estar realizándose las comprobaciones una de las acciones que se hace es la de enviar la misión generada en la aplicación al autopiloto del VANT con lo cual se le indica los puntos de ruta (waypoints) que seguirá el VANT en toda la misión de vuelo. Una vez que se carga la misión, el autopiloto ejecuta el vuelo de forma totalmente automática utilizando el firmware.

La toma de fotografías se inicia al momento de llegar al primer waypoint de la ruta generada, y a partir de ahí, el autopiloto va realizando los disparos de la cámara a cada cierta distancia o a cada cierto tiempo, según la configuración de la misión, cada disparo es una fotografía tomada, la cual se almacena en una memoria micro-SD que va instalada en una ranura ubicada a un costado del VANT (Figura 27).



Figura 27. Ranura y memoria de almacenamiento de fotografías

La descarga de las fotografías almacenadas en la micro-SD, es muy sencilla, ya que solo es necesario retirar la memoria de la ranura y colocarla en algún puerto adecuado para el dispositivo, en algunos casos es necesario tener un adaptador para que la memoria se convierta en un dispositivo SD o en USB.

Otros parámetros que deben ser considerado en el plan de vuelo fueron precargados al momento de seleccionar el tipo de aeronave a usar como lo es las características de la cámara (tamaño del sensor, distancia focal, etc.).

4.5 Puntos de control terrestre (GCP, *Ground Control Point*)

Existen dos formas de georreferenciar las fotografías tomadas con los VANTs: la georreferenciación directa e indirecta.

La georreferenciación directa usa información de las coordenadas recibidas por el GPS montado en el VANT. Cada fotografía es geo-etiquetada con las coordenadas del centro de la imagen y almacenada en un archivo con formato EXIF (Exchangeable Image File Format) (Figura 28). Este metadato además de guardar las

coordenadas de la fotografía, contiene información de la cámara (Fabricante, modelo, velocidad ISO, Distancia focal, etc).

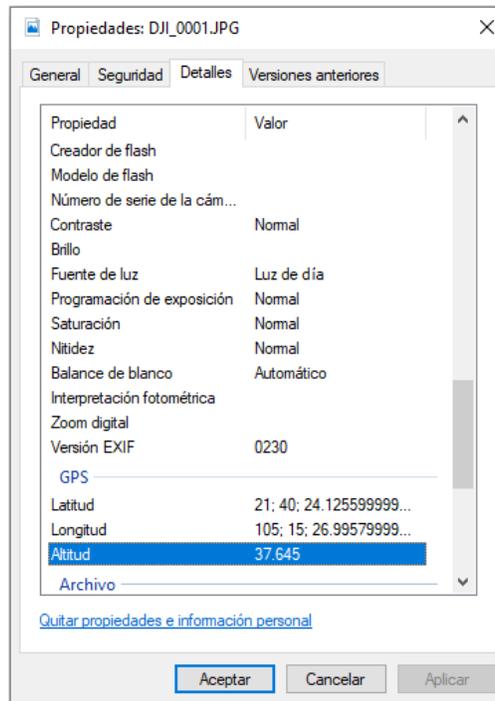


Figura 28. Metadatos de las fotografías tomados con el VANT Phantom 4 v2

La georreferenciación directa solo es usada cuando no se requiere de tener precisión en los productos de salida, ya que por lo general el GNSS montados en los drones son solo usados para navegación y no para determinación de puntos con alta precisión.

El enfoque más común para las mediciones de geolocalización es usar puntos de control de tierra. Este método también se denomina georreferenciación indirecta. GCP es un punto con coordenadas conocidas, que se encuentra en el área de interés y reconocible en las fotos. Se pueden medir mediante métodos convencionales, es decir, taquimetría y sistema global de navegación por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) o se pueden adquirir de otras fuentes disponibles, como el Servicio de mapas web (WMS) o mapas antiguos. Sin embargo, las



mediciones GNSS son la forma más eficiente en términos de precisión, confiabilidad y tiempo (Madawalagama, et al., 2016).

Antes de realizar las misiones de vuelo fueron distribuidos los GCP de manera uniforme sobre el terreno, mediante el uso de marcas en forma de “X” pintadas o señas con cal (Figura 29) aproximadamente de 1 m de longitud, la colocación de los GCP en forma de malla o cuadrícula regular, procurando distanciamientos de 20 a 30m (Figura 30).



Figura 29. Marcado de puntos de control sobre el terreno

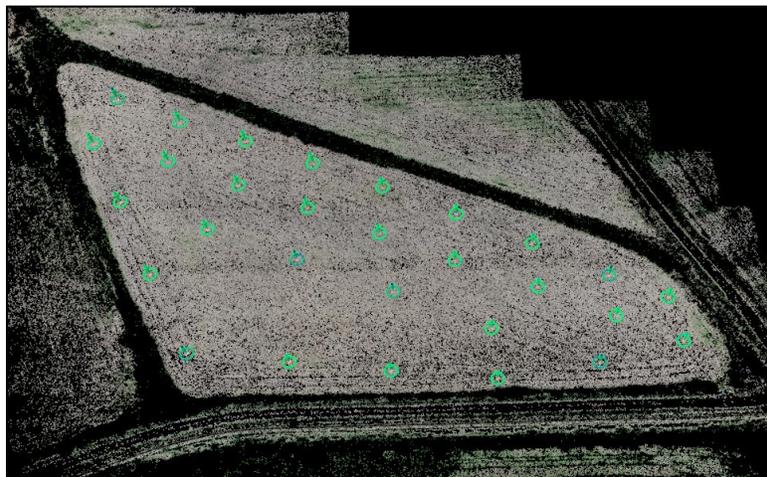


Figura 30. Distribución de los puntos de control

Las coordenadas tridimensionales de los GCPs, fueron medidas con un receptor GPS GNSS marca Sokkia, modelo GRX2 (Figura 31) trabajando en modo Real Time Kinetic (RTK) en doble frecuencia. La precisión que alcanza el equipo en el modo RTK es de 10mm + 1ppm en la Horizontal y 15 mm+1ppm en la vertical.

Las coordenadas fueron referenciadas a la zona UTM 13 norte con un datum del sistema geográfico mundial de año 1984 (WGS84)



Figura 31. Levantamiento de GCP con equipo GNSS RTK



Los GCP se utilizan para transformar las coordenadas del modelo en un sistema de coordenadas global. Por lo general, se logra mediante la transformación de parámetros de Helmert 7 (3 traslaciones a lo largo de ejes, 3 ángulos de rotación y 1 factor de escala) y aunque cada punto proporciona tantas ecuaciones como coordenadas medidas, el número mínimo de PCG es de 2 puntos con las tres coordenadas y 1 punto con altura conocida solamente. Sin embargo, siempre que se requiera una mayor precisión y su evaluación, se necesitan más GCP, desde 5-6 en casos simples hasta más de diez en situaciones complejas (Raczynski, 2017).

Para verificar la precisión de un modelo, los puntos de verificación (CP) deben medirse empleando las mismas reglas que para GCP. Deben tener coordenadas medidas en un sistema de coordenadas conocido y ser visibles en las fotos. La única diferencia es que no se toman en los cálculos en el ajuste de bloque de paquete, pero después de que se realiza el proceso, sus coordenadas medidas se comparan con las calculadas.

5 Procesamiento de fotogramétrico

Las imágenes tomadas por el VANT fueron procesadas usando el software Pix4Dmapper Pro versión 3.0.17. Este es un software muy potente y bastante automatizado, por lo que se considera muy amigable al usuario y cuenta con un soporte técnico de excelentes condiciones.

Pix4D es un software utilizado para el mapeo basado en drones, creado por una compañía suiza del mismo nombre. Permite al usuario convertir imágenes tomadas desde vehículos aéreos o cámaras de mano en modelos georreferenciados y generar salidas CAD y GIS. Pix4D se divide en varios productos que se utilizan para diferentes propósitos y aplicaciones, cada uno de los cuales es un paquete de software independiente y autónomo. Estos son Pix4D Mapper, utilizados en topografía para mapeo o minería; Pix4D BIM para obras de construcción, movimiento de tierras, BIM



e inspecciones; Pix4D Ag para fines agrícolas y Pix4D Model para bienes raíces, modelos 3D.

Este Software usa el método de Structure from Motion (SfM) junto con algoritmos estereo-multi-vista (MVS, *multi-view stereo*), el cual consiste en la generación del DEM a partir de la unión de imágenes UAV mediante el reconocimiento de patrones o puntos característicos vistos desde diferentes fotografías estereoscópicas haciendo uso del recurso computacional (James et al., 2017, Harwin, 2015).

En comparación con la aerotriangulación tradicional, el flujo de trabajo automatizado en extracción de características y ajuste de paquetes puede ser significativamente más eficiente en términos de tiempo y recursos, especialmente cuando se procesan grandes conjuntos de datos (Villanueva y Blanco, 2019).

Alidoost y Arefi, (2017) compararon 4 paquetes de programas fotogramétricos basados en drones (3DSurvey, Agisoft Photoscan, Pix4Dmapper Pro y SURE) para evaluar la capacidad en la generación de una nube de puntos de alta densidad, así como un Modelo de superficie digital (DSM), concluyendo que las nubes de puntos 3D de Agisoft Photoscan, Pix4Dmapper Pro y SURE son muy similares y la nube de puntos de 3DSurvey tiene menos precisión y calidad.

Schwind y Starek, (2017) compararon dos programas comerciales (Pix4D y Agisoft) y uno de código abierto (OpenDroneMap) en función de los parámetros de cantidad y calidad de los puntos generados en diferentes terrenos, encontrando que el Pix4D genera mayor cantidad de puntos que el software Agisoft Photoscan, sin embargo, las precisiones de la nube de puntos de estos dos programas son muy cercanas entre sí en diferentes tipos de cubiertas terrestres y demostraron que los programas comerciales antes mencionados generan una nube de puntos de mayor precisión comparada con el de código abierto.

Ramirez et al. 2017, comparó el Pix4D y el Agisoft Photoscan para procesar



imágenes adquiridas por UAV en dos escenarios: marino y terrestre, encontrando que ambos softwares son eficientes en el proceso de fotogrametría en general, sin embargo, las diferencias se hacen notar en el objetivo que cada persona busca en la obtención de la ortofoto, para estudios marinos se comportó mejor PhotoScan ya que enlaza más fotografías, pero en los modelos digitales de elevación presentó menos resolución, Para la parte terrestre Pix4D tiene un desempeño ligeramente superior a PhotoScan, ya que la precisión mejora y los traslapes también fueron mejores.

5.1 Flujo de trabajo del software Pix4D

En este apartado describiremos los pasos que se siguieron en el procesamiento de las imágenes capturadas con el sensor UAV usando el software Pix4D mapper. Comenzaremos describiendo la interfaz inicial del software y los inputs requeridos en esta etapa, continuando con el desarrollo del procesamiento inicial, la generación de puntos y malla, por último, se hará una breve descripción de los productos finales (Modelo digital de superficie, Ortomosaicos, Mapas de reflectancia e índices espectrales) entregados por este software.

De forma general el procesamiento consistió en ingresar las imágenes en formato JPEG, estas imágenes almacenan información dentro de su metadato, con la cual se puede generaron archivos que describen los parámetros internos (distancia focal, etc.) o externos (posición y orientación) de la cámara y de las propias imágenes, posteriormente se realizaron la alineación de estas, continuando con el ingreso de los puntos de control terrestre, la generación de la nube densa de puntos, la generación de malla y de la generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), y se obtuvieron como productos finales: Nube de puntos, ortomosaico y el MED (Figura 32)

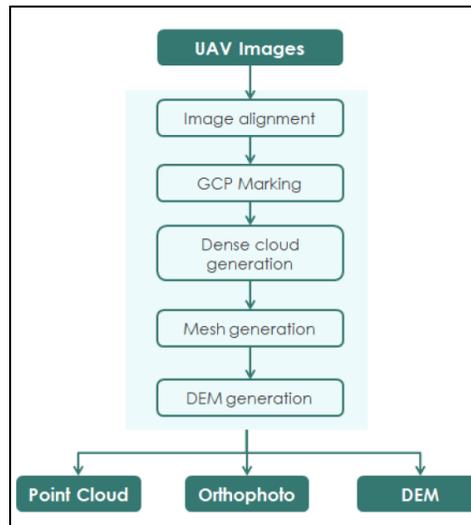


Figura 32. Flujo de trabajo del SfM-MVS (Villanueva y Blanco, 2019)

5.1.1 Interfaz e ingreso de datos iniciales del Pix4D

El primer paso del procesamiento describe las opciones iniciales del software, en la primera ventana da la opción de crear un proyecto nuevo o de abrir uno creado previamente (Figura 33), en este documento se plasmará el flujo de trabajo que se sigue para un proyecto nuevo, para lo cual se debe ingresar o hacer clic en la opción de “Nuevo proyecto...”.

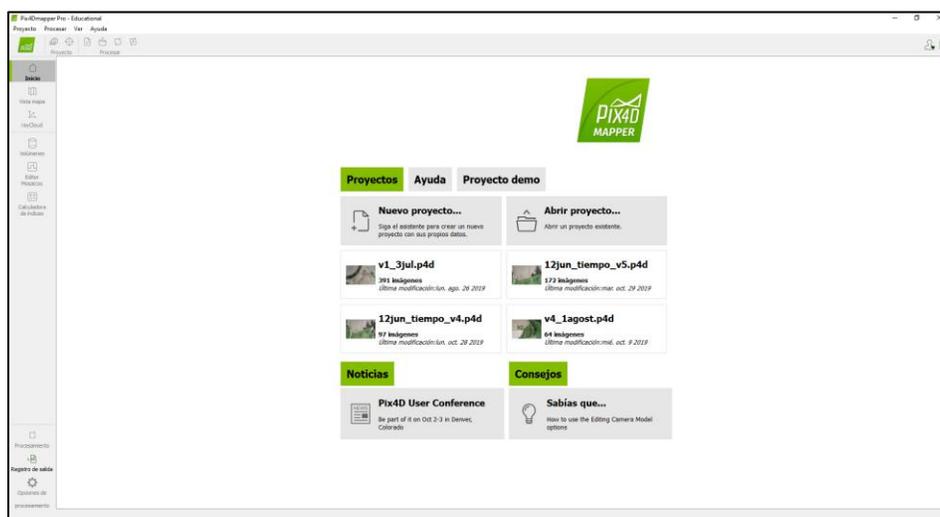


Figura 33. Interfaz inicial del software Pix4D mapper



La segunda ventana que muestra el software, pide que se ingrese el nombre del proyecto, la ubicación donde se almacenará y el tipo de proyecto que se va a generar, esto último, da la opción “Nuevo proyecto” o “Proyecto fusionado a partir de proyectos existentes”, esta segunda opción, se selecciona cuando el trabajo de mapeo fue muy grande y se tuvo que dividir en varios proyectos para procesarlos por separado, con la finalidad de optimizar el recurso máquina, posteriormente para integrar los distintos proyectos en uno solo, el Pix4d realiza la unión mediante la selección de esta opción (Figura 34).

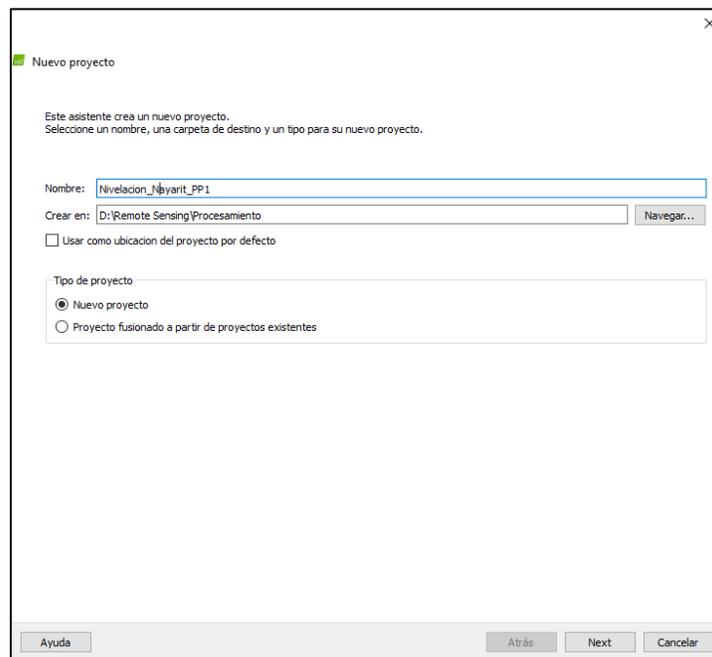


Figura 34. Identificación y ubicación de un proyecto en Pix4D.

Una tercera ventana (Figura 35) es desplegada por el software donde se solicita las imágenes JPG que se usará en el procesamiento. Para agregar las imágenes se da clic en el botón “Añadir imágenes...” y se busca la dirección en donde se encuentran almacenadas, seleccionando solo las del interés del usuario.



Como dato adicional y como opción disponible en el software, el Pix4D es capaz de generar productos fotogramétricos a partir de videos.

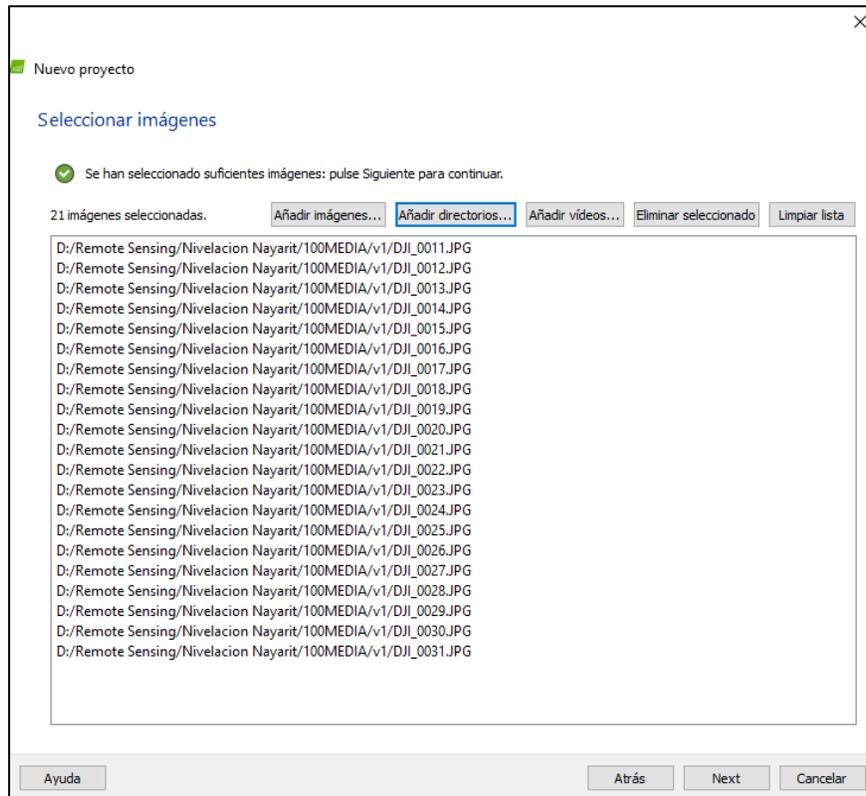


Figura 35. Selección de imágenes en Pix4D

La ventana número cuatro del programa (Figura 36), solicita información de las imágenes como son:

- Sistema de coordenadas
- Geolocalización y orientación
- Modelo de cámara

Para el caso de las imágenes de este trabajo de investigación, el software reconoce estos insumos de manera automática del archivo Exchangeable Image File Format



(EXIF) propio de la imagen, este formato, es un estándar creado para almacenar metadatos de las fotos hechas con cámaras digitales, lo que significa que los datos EXIF contienen información relativa a la propia imagen y a cómo ha sido tomada. Estos datos se incrustan en el fichero de imagen, ya sea en formato JPG o RAW. Es importante mencionar que cuando no reconoce automáticamente los datos, es posible ingresarlo de manera manual.

Figura 36. Entrada de información de las imágenes JPG en Pix4D.

Una quinta ventana es desplegada en este apartado (Figura 37), en esta, el Pix4D permite seleccionar el sistema de coordenadas de salida y es establecida acorde a la necesidad o interés del usuario.

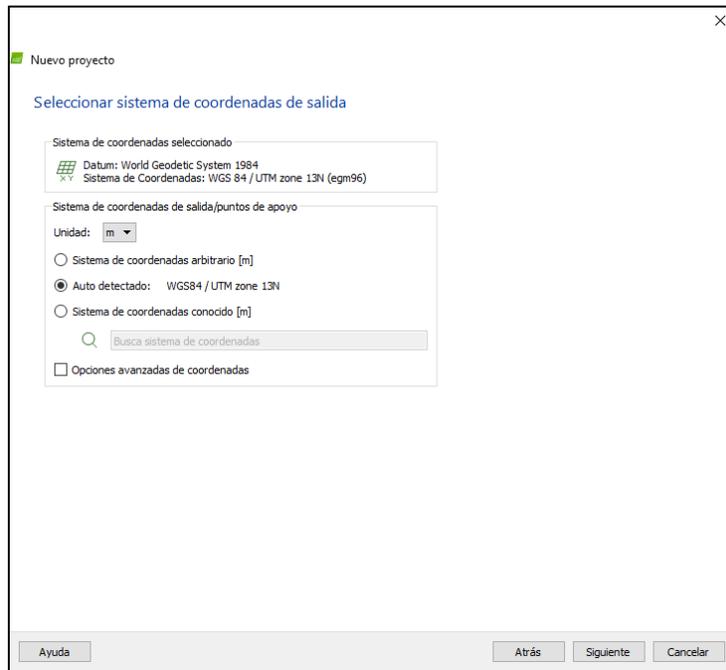


Figura 37. Especificación de sistema de coordenadas de salida

Por último, se debe seleccionar el tipo plantilla a usarse (Figura 38), esto se refiere al tipo de procesamiento que realizara el programa , lo cual dependerá de los datos de entrada y de los productos deseados es decir, si se selecciona la opción de “Mapas 3D”, los insumos serian, por lo general, imágenes JPG con bandas espectrales en Rojo-Verde-Azul (RGB, por sus siglas en ingles) y sus productos serian un MDE y un ortomosaico para aplicaciones de topografía o cartografía. Otra opción de plantilla es “Ag Multiespectral”, esta opción es usada cuando se introduce como insumo imágenes multiespectrales, estas cuentan con bandas espectrales que están relacionas con parámetros biofísicos de las plantas, y por lo tanto sus productos serian mapas radiométricos precisos de reflectancia, índices de vegetación, clasificación y aplicación para agricultura de precisión.

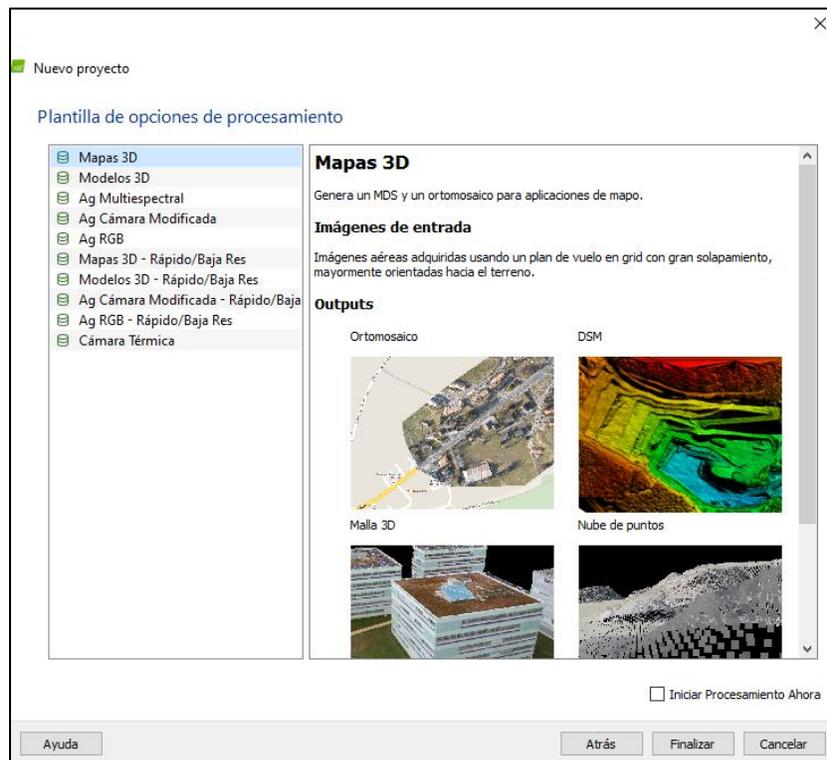


Figura 38. Plantillas de opciones de procesamiento

5.1.2 Pasos del procesamiento en Pix4D.

Pix4D procesa las imágenes en tres pasos generales:

I. Procesamiento Inicial

En este primer módulo, las imágenes y entradas adicionales, como los puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés), se utilizan para:

- **Extraer puntos clave de las imágenes:** donde el software identifica características específicas en las imágenes, estos puntos característicos (Figura 39) son aquellos que son considerados con alto contraste comparados con el resto de objetos de la imagen, tienen un color y textura propia.



Figura 39. Puntos característicos (Keypoints) en imágenes.

- **Emparejar puntos característicos:** Después de encontrar los keypoints, el software usa estos puntos clave para encontrar coincidencias entre las imágenes (Figura 40). A partir de estas coincidencias iniciales, el software ejecuta una Triangulación Aérea Automática y un Ajuste de paquete en bloque.

Antes de continuar, es necesario definir un concepto esencial de la fotogrametría, el cual es, “El par estereoscópico”, estos son dos disparos fotografiados desde diferentes posiciones y superpuestos entre sí (al menos 50%). La importancia del par estereoscópico es la transformación de dos imágenes 2D en un modelo 3D del área estéreo.

Encontrar puntos de coincidencia en ambas tomas que representen el mismo detalle en la naturaleza se denomina proceso de **coincidencia de imágenes**. Los puntos coincidentes solo se pueden encontrar en las partes superpuestas de las fotografías aéreas, por lo que están cubiertas por una gran parte de superposición, que es al menos el 50%.

La construcción fotogramétrica de una nube de puntos 3D comienza con la identificación de puntos característicos coincidentes en fotografías aéreas. Los métodos de este reconocimiento se basan en la visión por computadora y algoritmos estereoscópicos que calculan las tres coordenadas de un único



punto de vista a partir de la fotografía aérea a partir de puntos de coincidencia en fotografías aéreas y parámetros internos y externos conocidos de la cámara en el momento de la activación, cuál es la base para cualquier modelo 3D.

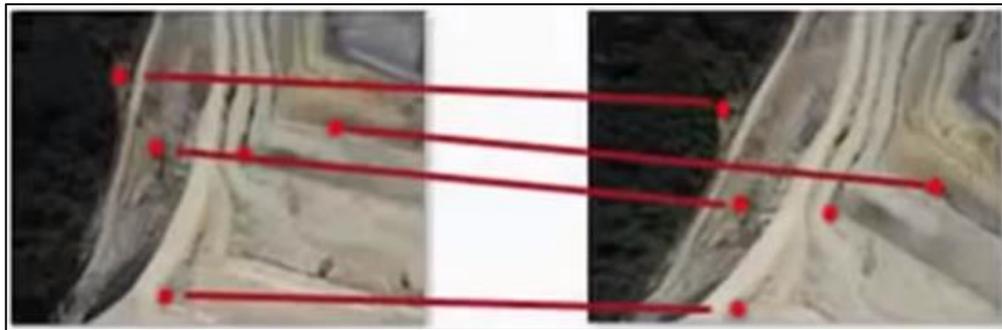


Figura 40. Emparejamientos de puntos entre las imágenes

II. Puntos de control, Nube de Puntos y malla

Antes de realizar la nube de puntos y la malla se colocaron los puntos de control en las imágenes donde aparecen las marcas de cal colocadas sobre el terreno. Lo primero que se hizo es cargar el archivo de los datos con las coordenadas X, Y, Z, haciendo clic sobre el icono Gestor GCP/MTP (Figura 41).

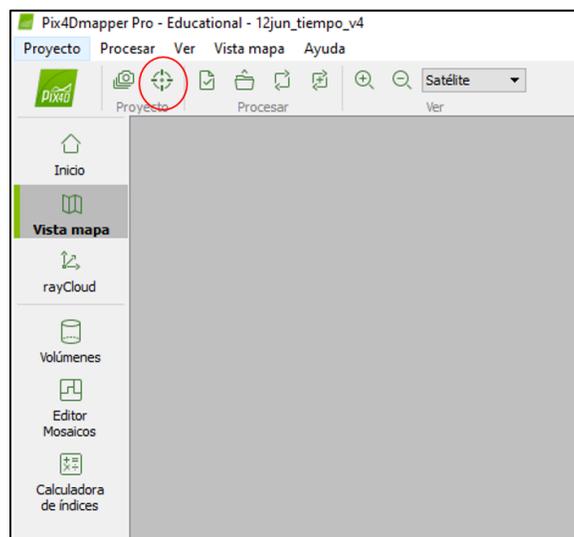


Figura 41. Gestor de GCP/MTP del Pix4D



A continuación el software despliega otra ventana(Figura 42), en esta se introdujo el archivo .TXT o .CSV dependiendo en que formato fue guardado por el equipo GOS de precisión usado en campo, para realizar esta operación solo es necesario dar clic en la pestaña de importar y buscar la dirección donde se tiene guardado el archivo, por default, el archivo reconoce el sistema de proyección en que se capturaron las coordenadas de los puntos de control, pero en dato caso que no leyera esta información de manera automática, el software da la oportunidad de editar dicho parámetro.

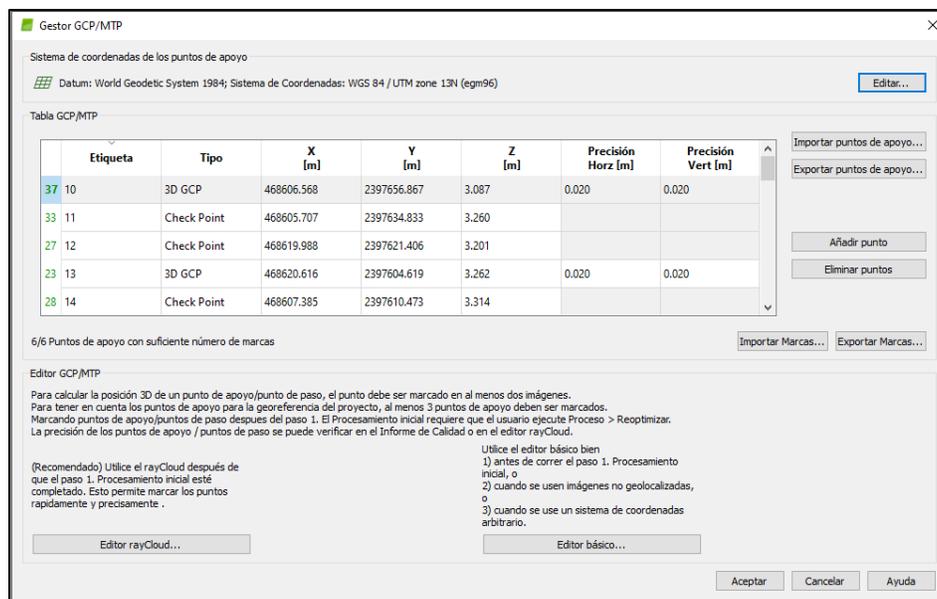


Figura 42.Importación de archivo con coordenadas X,Y,Z de los GCP.

Posterior a la importación del archivo, se identificó cada punto control en las imágenes disponibles (Figura 43), al tener mucho traslape frontal y lateral, estas marcas aparecían en muchas imágenes, para el ejemplo mostrado abajo, hubo un punto que llegó a aparecer hasta en más de 40 fotografías distintas.

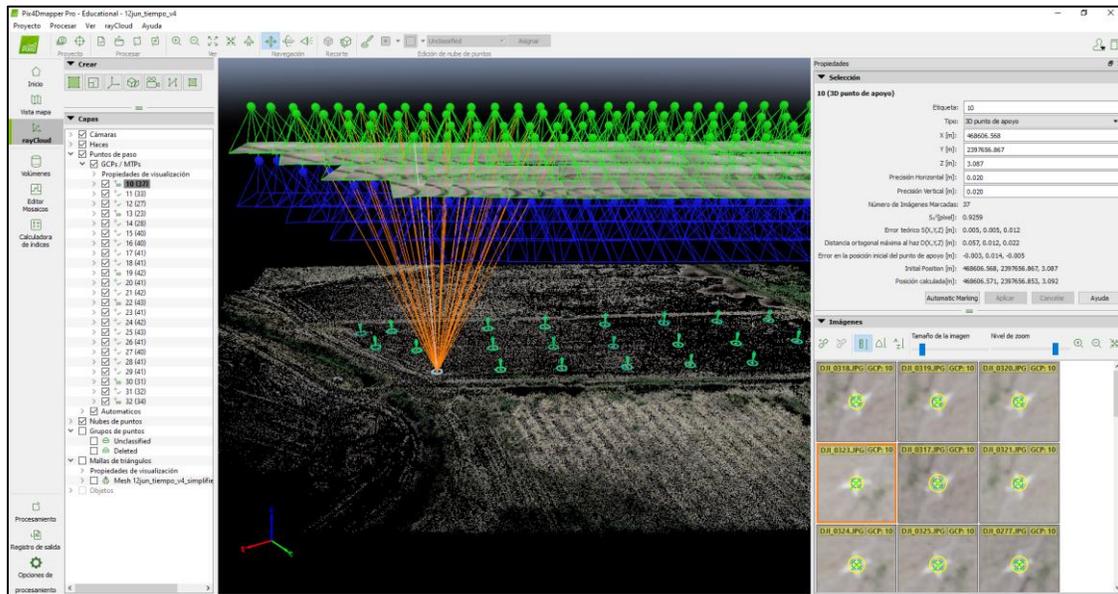


Figura 43. Identificación de GCP en las imágenes

Al conjunto de los puntos de enlace que se identificaron en el paso anterior, se les considera como una nube puntos dispersa (Figura 44), con base en esto, el software realiza una densificación de esta nube, la densificación se refiere a la adición de puntos 3D a la nube dispersa, logrando con esto reconstruir los objetos presentes en la imagen con mayor fidelidad (Figura 45)



Figura 44. Nube de puntos dispersa de una parcela piloto

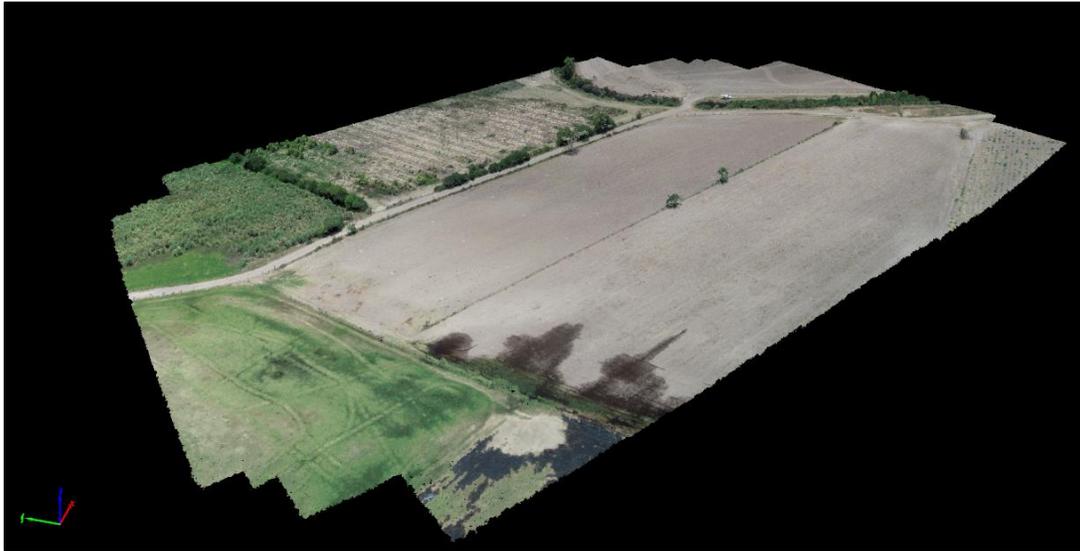


Figura 45. Nube de puntos densificada de una parcela piloto

Por último, en el paso dos del procesamiento, el pix4d realiza un mallado de triángulos a la nube de puntos densa, con eso se logra darles textura a todos los objetos presentes en las imágenes generadas en el procesamiento (Figura 46)

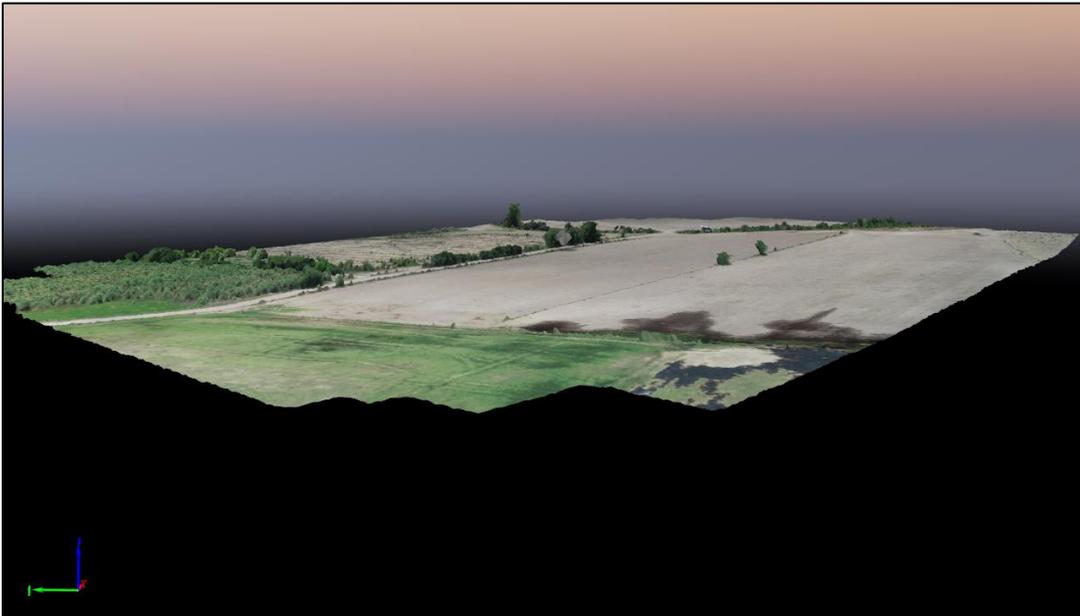


Figura 46. Mallado de triángulos de una parcela piloto.



III. MDS, Ortomosaico e Índices.

Este paso permitió crear un modelo digital de superficie (MDS), este modelo cuenta con coordenadas tridimensionales y permite la estimación del cálculo de volúmenes, ortomosaicos y mapas de reflectancia. La creación del ortomosaico se basa en la ortorectificación. Este método elimina las distorsiones de perspectiva de las imágenes.

Los mapas de reflectancia y de índices son mapas donde cada pixel indica la reflectancia de los objetos, estos mapas son usados para agricultura, que no es el tema de este proyecto de investigación.

Los productos de este último paso son guardados en una ruta específica, donde el software va almacenando cada una de las salidas.

El MDS y el ortomosaico fueron guardados en formato .TIFF, mientras que las nubes de puntos tuvieron un formato .las.

6 Evaluación de la exactitud

La exactitud de un levantamiento hecho con un vehículo aéreo no tripulado (UAV), es el resultado de diversas variables, incluyendo diseño del vuelo, calidad de la cámara, metodología de modelación de la cámara, algoritmos SfM y estrategias de georreferenciación.

El ajuste en bloque de las imágenes puede llevarse a cabo utilizando al menos tres puntos de control en tierra (GCP, por sus siglas en inglés), pero se obtienen



resultados más precisos si se usan más GCP, y se recomienda que se usen más para obtener una precisión óptima (Rosnell y Honkavaara, 2012).

Tahar (2013) y Agüera-Vega et al. (2017), observaron que la precisión mejoró a medida que el número de GCP aumentó de cuatro a veinte.

Para evaluar la exactitud de los levantamientos realizados con el sistema dron-cámara se usó una prueba de distribución y cantidad de puntos de control terrestre distribuidos de manera uniforme dentro de las parcelas piloto.

En primer lugar, se distribuyeron 4 puntos de control en la periferia del área de interés como se muestra en la Figura 47, posteriormente se fue anexando un punto a la vez hasta completar 10 puntos de control en tierra, colocando dos al centro (Figura 48) y cuatro más en la periferia en sentido a los puntos cardinales (Figura 49), todos estos puntos sirvieron para generar el modelo digital de superficie, los puntos que no son usados para la generación del MDS fueron usados como puntos de validación y con los cuales se pudo determinar la exactitud del modelo.



Figura 47. Distribución inicial de los puntos de control



Figura 48. Distribución central de los puntos de control



Figura 49. Distribución de puntos en la periferia en forma de puntos cardinales.

Se calculó la precisión de cada configuración para determinar la mejor configuración en el procesamiento de imágenes UAV.



6.1 Parámetros estadísticos

La exactitud con las distintas configuraciones de los puntos de control que fueron usados para el procesamiento fue medida mediante tres parámetros:

- Media: es el error promedio en cada dirección (X, Y o Z)

Para una dirección dada, esta se define como:

$$Media = \mu = \frac{\sum(e_i)}{N}$$

Donde: e_i es el error de cada punto para una dirección dada (X, Y o Z)

N=el número de puntos de control

El error Mean Z ayuda a reconocer errores sistemáticos debido a una mala adquisición de GCP. Si todos los GCP tienen un error sistemático de 5 cm en la dirección Z, el error medio Z será de 5 cm

- Sigma

Para una dirección dada (X, Y o Z) esta es definida como:

$$Sigma = \sigma = \sqrt{\frac{\sum(e_i - \mu)^2}{N}}$$

Donde: e_i es el error de cada punto para la dirección dada

μ = el error medio para la dirección dada

N= numero de puntos de control

Suponiendo que el error es gaussiano (Figura 50), el error Sigma proporciona intervalos de confianza alrededor del error medio:

El 68.2% de los puntos del proyecto tendrá un error de $+\sigma$ a $-\sigma$

El 95.4% de los puntos del proyecto tendrá un error de $+2\sigma$ a -2σ

El 99.6% de los puntos del proyecto tendrá un error de $+3\sigma$ a -3σ

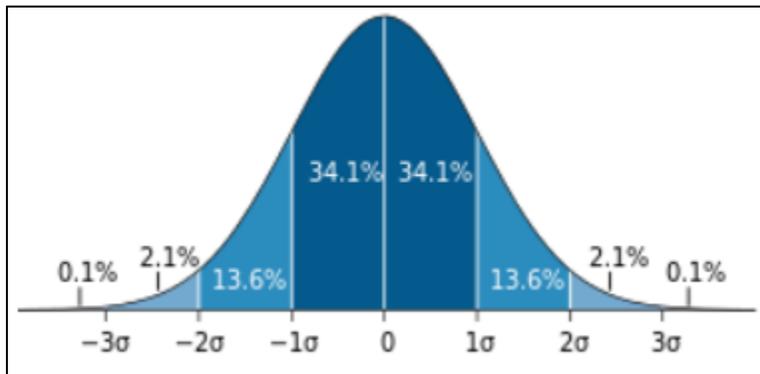


Figura 50. Distribución gaussiana del error.

- El error cuadrático medio (RMSE), el cual es definido, para una dirección dada (X, Y o Z), como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(e_i^2)}{N}}$$

Donde: e_i es el error de cada punto para una dirección dada (X, Y o Z).

N: es el número de puntos de control

El error RMS tendrá en cuenta el error sistemático. Si Error medio = 0, el error RMS será igual al error Sigma Z. La comparación del error RMS y el error Sigma indica un error sistemático.

De los 3 indicadores, el error RMS es el más representativo del error en el proyecto, ya que tiene en cuenta tanto el error medio como la varianza

7 RESULTADOS

7.1 Campañas de vuelo

Como se mencionó anteriormente, son 5 parcelas de estudio, de las cuales se tiene un vuelo antes y un vuelo después de nivelación para cada una de ellas. La parcela 3 no tiene vuelo después de nivelación, ya que no se realizaron las actividades de nivelación, debido a la temporada de lluvias.



Cuadro 2. Resumen de los 9 vuelos realizados en este estudio. En este se menciona la fecha de los vuelos, la resolución espacial (GSD), el número de fotografías que fueron procesadas y la cobertura espacial de cada parcela piloto

Vuelo	Fecha	Descripción	GSD (cm)	N° Fotografías	Cobertura (ha)
Parcela 1	04/07/2019	Levantamiento antes de nivelación	1.7	219	6.15
Parcela 1	01/08/2019	Levantamiento después de Nivelación	1.75	116	5.72
Parcela 2	04/07/2019	Levantamiento antes de nivelación	1.69	181	5.07
Parcela 2	01/08/2019	Levantamiento después de Nivelación	1.74	64	3.41
Parcela 3	11/06/2019	Levantamiento antes de nivelación	1.69	189	8.58
Parcela 4	12/06/2019	Levantamiento antes de nivelación	1.99	172	5.48
Parcela 4	03/07/2019	Levantamiento después de Nivelación	1.7	169	4.96
Parcela 5	12/06/2019	Levantamiento antes de nivelación	1.97	150	4.85
Parcela 5	03/07/2019	Levantamiento después de Nivelación	1.74	101	4.77

7.2 Levantamientos de puntos de control en tierra.

Es importante aclarar, que el muestreo para la realización del trabajo de estudio fue hecho en 10 parcelas piloto distintas (Figura 51), en este informe se consideran solo 5 porque son las que tuvieron vuelos antes y después de nivelación, los 5 restantes solo se les pudo realizar el vuelo antes de nivelación.

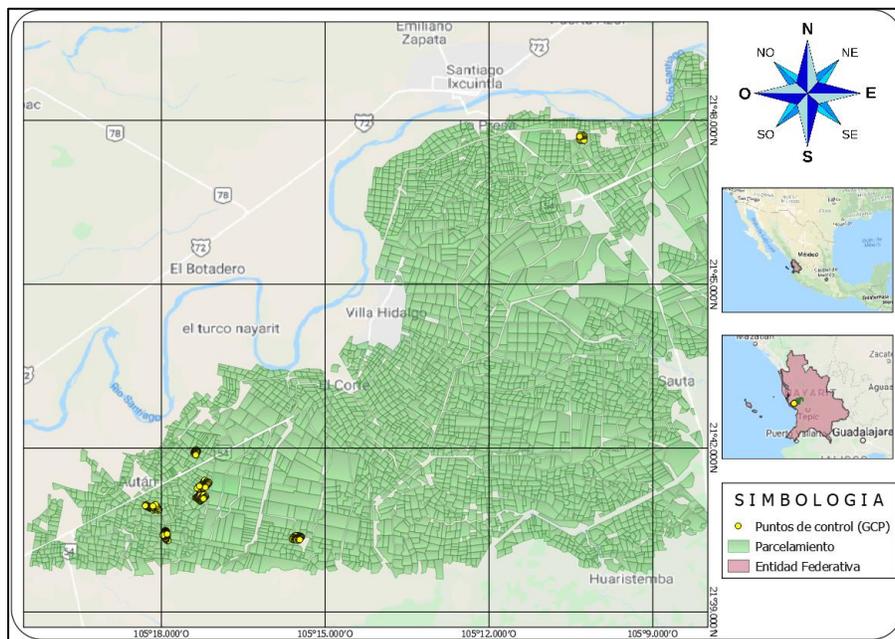




Figura 51. Ubicación de puntos de control levantados

El número final de vuelos fue de 15, con un total de 449 puntos levantados con equipo GPS RTK de precisión milimétrica.

Cuadro 3. Resumen del número de vuelo, la condición de la parcela para cada vuelo y el número de puntos de control terrestre que fueron levantados.

Parcela	Condición	Número GCP
1	Antes de Nivelación	39
1	Después de nivelación	33
2	Antes de Nivelación	28
2	Después de nivelación	34
3	Antes de Nivelación	22
3	Después de nivelación	21
4	Antes de Nivelación	24
4	Después de nivelación	30
5	Antes de Nivelación	22
5	Después de nivelación	27
6	Antes de Nivelación	36
7	Antes de Nivelación	45
8	Antes de Nivelación	31
9	Antes de Nivelación	28
10	Antes de Nivelación	29

Los archivos de los puntos levantados fueron almacenados en formato .CSV.

7.3 Los productos generados por el software Pix4D

El procesamiento de las imágenes en el software Pix4D, generó los tres productos fotogramétricos de interés.

7.3.1 Nube de puntos

La nube de puntos es un conjunto de puntos 3D que reconstruyen el modelo. La posición X, Y, Z y la información de color se almacenan para cada punto de la nube de puntos densificada.

Se obtuvieron 9 nubes de puntos en formato “.las”, que corresponden a las 9 campañas de vuelo efectuadas, estas fueron revisadas en el software CloudCompare



(Figura 52), con lo cual se pudo conocer el número de puntos generados para cada proyecto procesado.

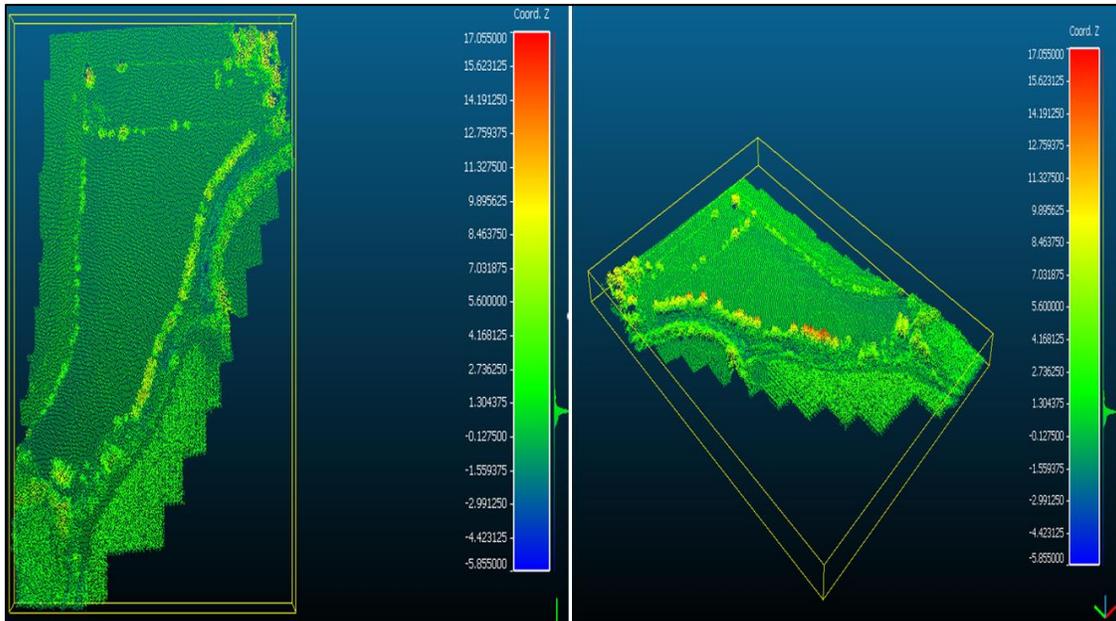


Figura 52. Visualización de la nube de puntos en el software CloudCompare.

Es necesario el uso de software libre que puedan leer este tipo de archivos, el cloudcompare es un programa de código abierto que puede leer archivos de millones de puntos.

Cuadro 4. Número de puntos de cada nube de puntos generados en cada proyecto, en conjunto el estudio arroja más de 300 millones de puntos.

Vuelo	Nube de puntos
1	24,046,570
2	13,314,965
3	15,836,244
4	7,499,687
5	21,323,225
6	17,492,278
7	162,984,469
8	15,675,291
9	14,374,960



El uso de la fotogrametría a través de drones, genera millones de puntos de un área en específico y, por lo tanto, tiene mayor riqueza de datos comparados con los puntos que se pudieran obtener en un levantamiento realizado de manera convencional. El inconveniente al tener demasiada información es que es difícil de manejar y que se requiere, en algunos casos, eliminar puntos para que programas comerciales puedan cargar los datos.

7.3.2 Modelo Digital de elevaciones

Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (INEGI, visita 10-12-2019).

Se obtuvieron 9 modelos digitales de elevación en formato TIFF, con coordenadas en la proyección de Universal Transversal Mercator (UTM) Zona 13 Norte, los datos de elevación son expresados en metros, en la Figura 53, se presenta una muestra del producto final para el vuelo.

Las elevaciones de este modelo son pequeñas debido a que el distrito de riego 043 estado de Nayarit se encuentra cercano a nivel del mar.

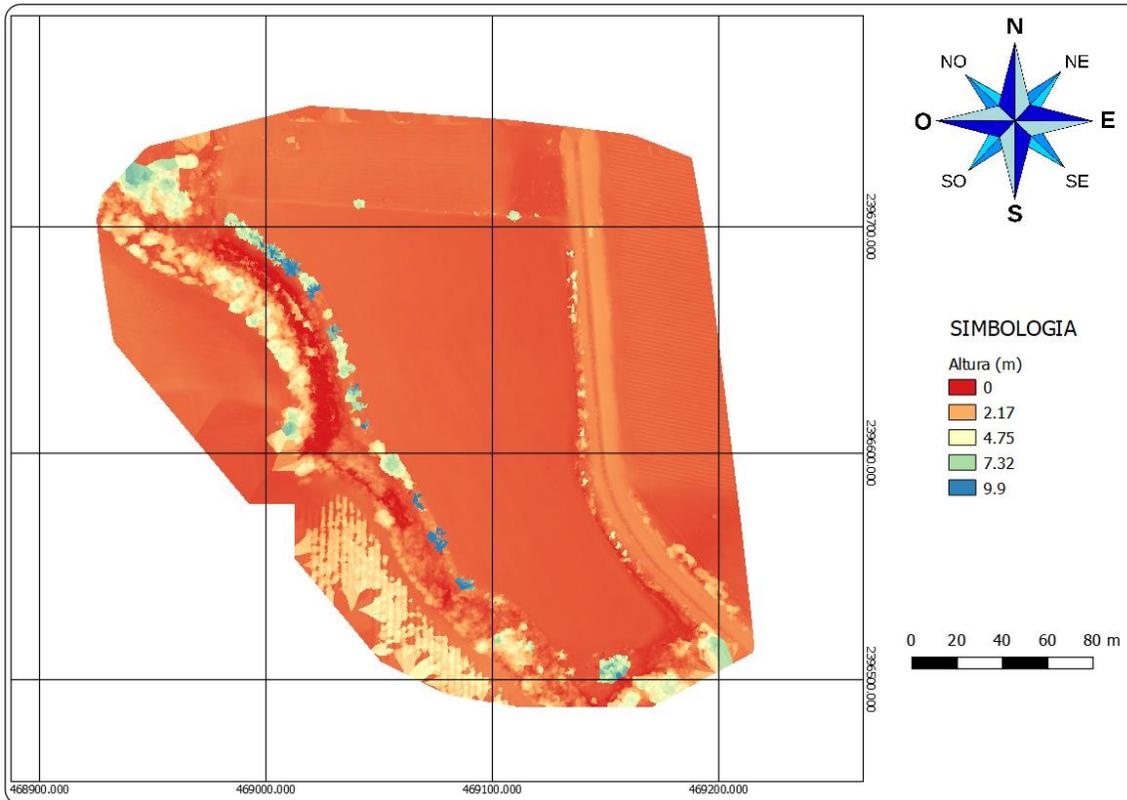


Figura 53. Modelo Digital de Elevaciones de parcela piloto 1

7.3.3 Ortomosaicos

Un mosaico corresponde al conjunto de imágenes tomadas desde una o varias cámaras, que presentan áreas de traslape entre sí, y que son unidas y combinadas en una sola imagen para ampliar el rango de visión de la escena (Cheng, Xue y Li, 2007). Cuando el mosaico es corregido de las distorsiones causadas por el relieve del terreno y los objetos en él, se denomina ortomosaico.

La generación del ortomosaico, las imágenes individuales son rectificadas a partir del modelo de elevaciones, eliminando la distorsión asociada al relieve. Este proceso consiste en proyectar cada pixel de la imagen sobre el modelo de elevación para determinar el valor de altura, este valor es empleado para re proyectar sobre la imagen la nueva posición del pixel. La proyección y re proyección de los pixeles de la



imagen se realiza con las ecuaciones de colinealidad. Por último, todas las imágenes rectificadas son unidas formando un mosaico.

Se crearon 9 ortomosaicos en formato .tiff, con resoluciones de 2 a 3 cm. En la Figura 54 se muestra un ortomosaico de la parcela piloto 1. La resolución espacial y los detalles de los objetos en las imágenes hacen que el peso de los archivos sea muy grande, lo que provoca que al aumentar el área de vuelo los programas comerciales que abren estos archivos empiecen a tener problemas para poder manipularlas.



Figura 54. Ortomosaico de la parcela piloto 1

Además de representar el producto final de un ortomosaico la figura 54 muestra que el parcelamiento realizado para el distrito de riego se encuentra desfasado y que fue digitalizado en una imagen que no tenía buena precisión.

Para poder comprobar la alta resolución de los ortomosaicos generados con los vehículos aéreos no tripulados, en la Figura 55 se comparan el ortomosaico de la parcela piloto 1 y la imagen de satélite del servidor de Google a una escala de 1:1,400.

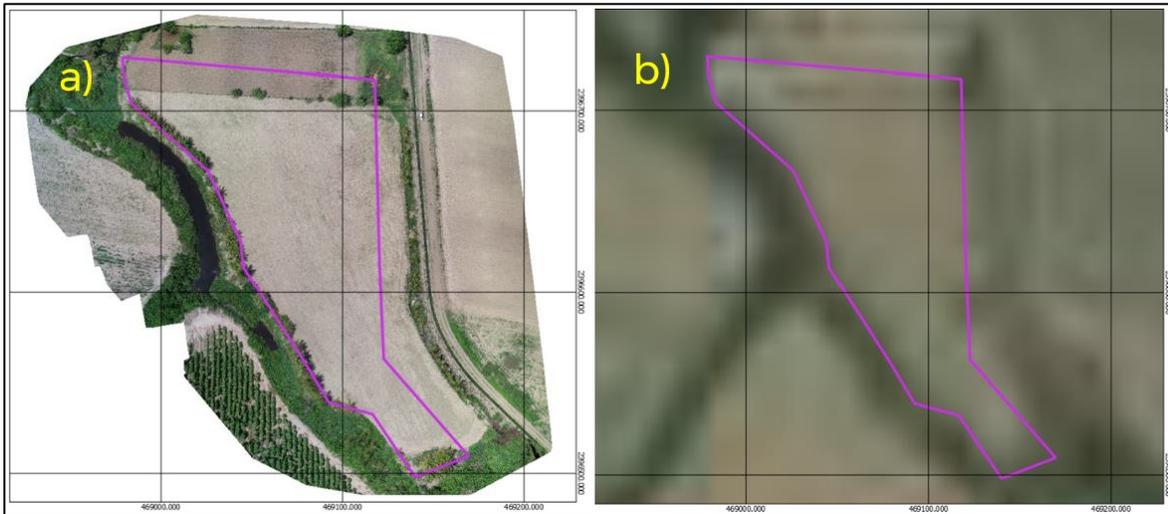


Figura 55. Resolución espacial a escala 1:1400. a) Ortomosaico VANT, b) Imagen satelital Google.

7.4 Exactitud de los modelos

Se evaluaron los modelos de salida de los nueve vuelos mencionados anteriormente, el programa Pix4D entrega un reporte de calidad para cada configuración y distribución de los GCP (Figura 56)

En este reporte el programa hace referencia, entre otros datos, al número de puntos clave por imagen que encontró, las imágenes que pudo calibrar, la optimización de la cámara, que quiere decir, que es la diferencia relativa entre los valores optimizados y los valores iniciales de las imágenes, igualmente reporta el numero concordancia entre puntos clave para imágenes adyacentes, por último, indica el número de GCP involucrado en el procesamiento.

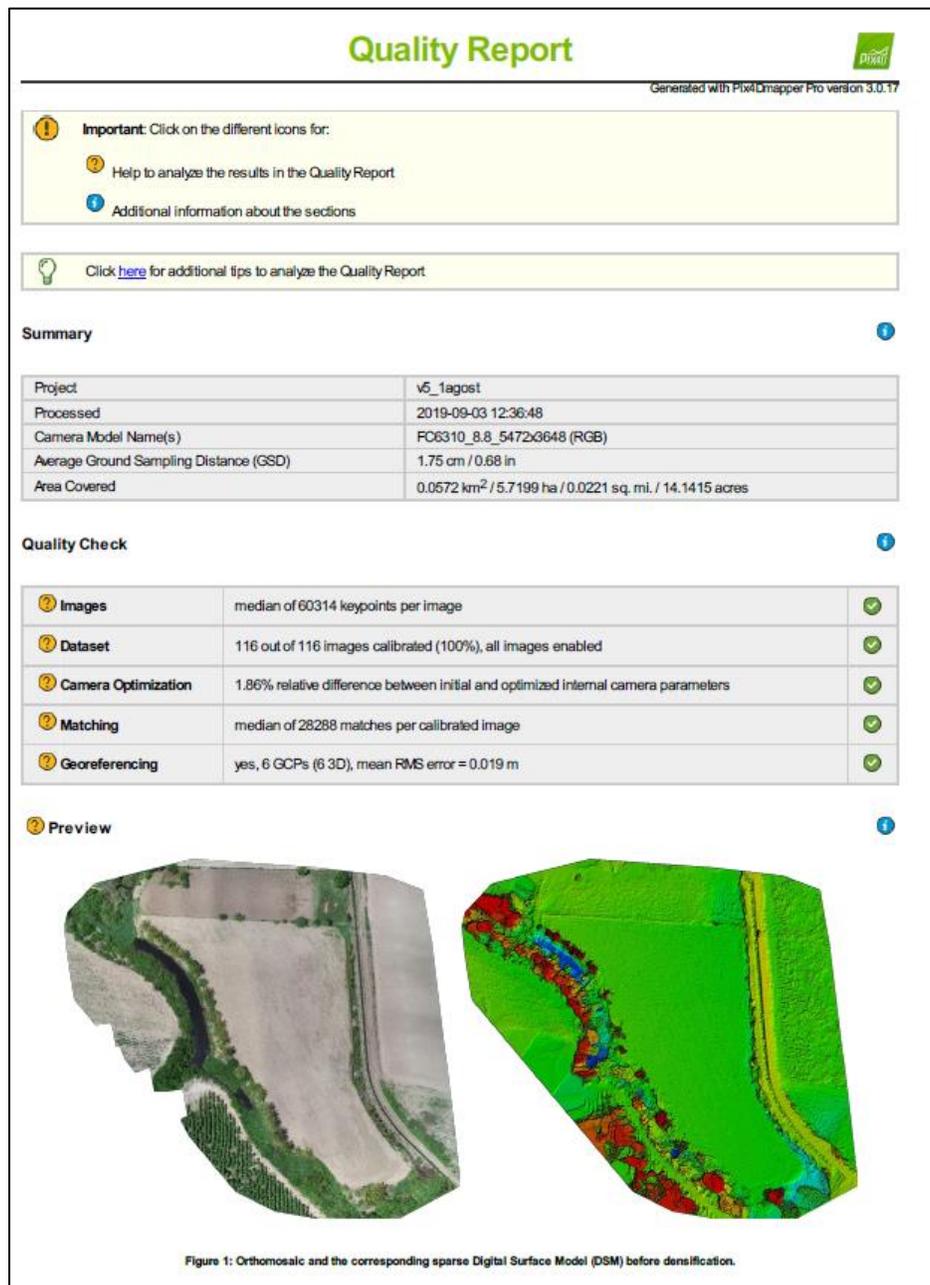


Figura 56. Reporte de calidad del software Pix4d

Uno de los objetivos del trabajo de investigación es conocer la exactitud de los puntos de evaluación del modelo (Check points), el Pix4D hace el cálculo de tres



parámetros: media, desviación y cuadrado medio del error (Figura 57) para los GCP que sirven de evaluación y que no fueron usados en el procesamiento del modelo.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
44	0.0200/0.0200	-0.0470	0.0294	0.0179	0.6057	17 / 17
45	0.0200/0.0200	-0.0405	-0.0508	0.0096	0.5680	16 / 16
46	0.0200/0.0200	-0.0766	-0.0688	0.0075	0.4360	16 / 16
47	0.0200/0.0200	-0.0289	-0.0293	-0.0202	0.4228	21 / 21
48	0.0200/0.0200	-0.0192	-0.0676	0.0366	0.4326	21 / 21
49	0.0200/0.0200	-0.0129	-0.0148	0.0176	0.6401	21 / 21
50	0.0200/0.0200	-0.0029	-0.0124	0.0182	0.5795	16 / 16
52	0.0200/0.0200	0.0505	0.1089	0.0222	0.5145	20 / 20
53	0.0200/0.0200	-0.0177	0.0485	0.0304	0.5551	14 / 14
54	0.0200/0.0200	0.0329	0.0047	0.0133	0.3764	12 / 12
55	0.0200/0.0200	0.0330	0.0390	0.0086	0.6703	17 / 17
57	0.0200/0.0200	-0.0096	0.0373	-0.0111	0.6491	24 / 24
58	0.0200/0.0200	-0.0094	-0.0459	0.0165	0.5033	24 / 24
59	0.0200/0.0200	0.0176	-0.0262	0.0196	0.6676	23 / 23
61	0.0200/0.0200	-0.0103	0.0161	-0.0147	0.6656	20 / 20
62	0.0200/0.0200	-0.0366	-0.0281	0.0037	0.4507	20 / 20
63	0.0200/0.0200	-0.0152	-0.0238	-0.0284	0.3639	18 / 18
64	0.0200/0.0200	-0.0866	-0.0976	-0.0043	0.9827	23 / 23
65	0.0200/0.0200	-0.0573	-0.0465	0.0055	0.6807	23 / 23
66	0.0200/0.0200	-0.0100	-0.0059	-0.0016	0.5283	22 / 22
67	0.0200/0.0200	-0.0236	-0.0777	-0.0071	0.7296	21 / 21
69	0.0200/0.0200	0.0295	0.0273	-0.0299	0.5492	15 / 15
70	0.0200/0.0200	0.0381	-0.0202	-0.0349	0.4711	21 / 21
71	0.0200/0.0200	0.0143	-0.0073	-0.0384	0.4726	23 / 23
72	0.0200/0.0200	0.0273	-0.0276	-0.0507	0.9601	22 / 22
73	0.0200/0.0200	0.0627	-0.0708	-0.0780	0.7553	20 / 20
75	0.0200/0.0200	-0.0606	-0.0254	-0.0489	0.4205	14 / 14
Mean [m]		-0.009592	-0.016124	-0.005229		
Sigma [m]		0.037572	0.044674	0.027439		
RMS Error [m]		0.038777	0.047495	0.027933		

Figura 57. Reporte de la exactitud de los GCP usados para validación.

Por último, se seleccionó al cuadrado medio del error, como parámetro principal y de mayor interés en la evaluación de la exactitud de los modelos.

Cuadro 5. Datos de fecha de vuelo, el número de parcela piloto, la descripción de la parcela, donde se indica si fue el vuelo realizado antes o después de nivelación, la resolución espacial en centímetros (GSD), el número de fotografías capturadas y procesadas con el software, la superficie cubierta en hectáreas, el arreglo y el número de GCP usados (Diseño), por último error cuadrático medio en metros para las tres direcciones (X,Y,Z).



Fecha	Parcela	Descripción	GSD (cm)	N° Fotografías	Cobertura (ha)	Diseño	RMS (m)		
							X	Y	Z
04-jul	1	Antes de Nivelación	1.70	219	6.15	4	0.050621	0.048236	0.052734
				219	6.15	5	0.055192	0.047308	0.033347
				219	6.15	6	0.055982	0.049260	0.024508
				219	6.15	7	0.051176	0.044497	0.025700
				219	6.15	8	0.050105	0.046438	0.025615
				219	6.15	9	0.051055	0.047105	0.024667
				219	6.15	10	0.051324	0.042593	0.023999
01-ago	1	Despues de Nivelación	1.75	116	5.72	4	0.041262	0.048952	0.026122
				116	5.72	5	0.036927	0.047021	0.027098
				116	5.72	6	0.038777	0.047495	0.027933
				116	5.72	7	0.040422	0.046765	0.029376
				116	5.72	8	0.039910	0.046152	0.026010
				116	5.72	9	0.037327	0.043836	0.025556
				116	5.72	10	0.038289	0.043824	0.021465
04-jul	2	Antes de Nivelación	1.69	181	5.07	4	0.063138	0.067377	0.022019
				181	5.07	5	0.063920	0.069842	0.024534
				181	5.07	6	0.066286	0.068651	0.022662
				181	5.07	7	0.068473	0.071304	0.021582
				181	5.07	8	0.069181	0.072099	0.020788
				181	5.07	9	0.069668	0.069240	0.021426
				181	5.07	10	0.071134	0.069939	0.021590
01-ago	2	Despues de Nivelación	1.74	64	3.41	4	0.046676	0.048773	0.223242
				64	3.42	5	0.046924	0.053948	0.017007
				64	3.41	6	0.047732	0.052174	0.016685
				64	3.41	7	0.049549	0.050636	0.015265
				64	3.41	8	0.050264	0.048734	0.012048
				64	3.41	9	0.052815	0.050170	0.011326
				64	3.41	10	0.053970	0.050242	0.011580
11-jun	3	Antes de Nivelación	1.69	189	8.58	4	0.062501	0.028534	0.237707
				189	8.58	5	0.056553	0.024478	0.051463
				189	8.58	6	0.058826	0.023936	0.056337
				188	8.57	7	0.052621	0.029434	0.059261
				188	8.57	8	0.054307	0.030983	0.059739
				188	8.57	9	0.054015	0.026490	0.054320
				188	8.57	10	0.038938	0.028124	0.053214
12-jun	4	Antes de Nivelación	1.99	172	5.48	4	0.030028	0.030101	0.139460
				172	5.48	5	0.030823	0.029368	0.062713
				172	5.48	6	0.033806	0.029033	0.041033
				172	5.48	7	0.036699	0.029271	0.039789
				172	5.48	8	0.036993	0.029361	0.037068
				172	5.48	9	0.038485	0.030006	0.037664
				172	5.48	10	0.032467	0.022656	0.037384
03-jul	4	Despues de Nivelación	1.70	169	4.96	4	0.035043	0.024456	0.050454
				169	4.96	5	0.044336	0.025766	0.033736
				169	4.96	6	0.033838	0.025816	0.034069
				169	4.96	7	0.031439	0.027325	0.034076
				169	4.96	8	0.027515	0.024420	0.037861
				169	4.96	9	0.027604	0.024956	0.033969
				169	4.96	10	0.028805	0.025739	0.034541
12-jun	5	Antes de Nivelación	1.97	150	4.85	4	0.028868	0.032916	0.126419
				150	4.85	5	0.027913	0.034379	0.061763
				150	4.85	6	0.027917	0.037419	0.042884
				150	4.85	7	0.029177	0.037258	0.044506
				150	4.85	8	0.029728	0.037054	0.037486
				150	4.85	9	0.029920	0.036884	0.033459
				150	4.85	10	0.031485	0.038548	0.024889
03-jul	5	Despues de Nivelación	1.74	101	4.77	4	0.026434	0.024428	0.033409
				101	4.77	5	0.028055	0.025817	0.025139
				101	4.77	6	0.024077	0.025333	0.023885
				101	4.77	7	0.025511	0.024698	0.023309
				101	4.77	8	0.025747	0.024710	0.023885
				101	4.78	9	0.025900	0.024722	0.025614
				101	4.78	10	0.019908	0.024009	0.025895



Se graficaron los valores de Error cuadrático medio para ver el comportamiento de este parámetro, en la Figura 58 se muestra cada uno de las comparaciones.

La gráfica de la parcela piloto 1 antes de nivelación, presenta un error en “X” donde se nota que tiene una tendencia a estabilizarse después de 7 puntos de control presentando un error cercano a los 5 cm. Para la dirección “Y”, es un poco menos estable, muestra una mejora del error con 7 puntos, pero el error vuelve a aumentar cuando se evalúa con 9 puntos de control, aunque con 10 puntos presenta una mejora en la exactitud, cercano a los 4 cm. En “Z” se presenta una condición más estable con respecto a las otras dos direcciones ya que el error después de 6 puntos de control tiende a estabilizarse cercano a 2 cm. Se observa que la coordenada “Z” es la que mejor precisión presentó en este vuelo.

Para la parcela piloto 1 después de nivelación, la coordenada “X” muestra que después de 5 GCP el error no supera un valor de 4 cm. En cuanto a “Y” tiene un cambio de pendiente más notorio de 4 GCP a 5, aunque es también visible que el error sigue mejorando hasta 9 GCP y en la parte ultima se ve una estabilización. “Z” tiende a subir de 4 hasta 7 GCP y después el error empieza a mejorar hasta el 10 GCP, lo que también se observa de la gráfica después de nivelación es que los cambios de pendiente para los errores en las tres direcciones son relativamente pequeños, de menos de 1 cm. La coordenada “Z” sigue siendo la dirección en la cual se tiene mayor exactitud.

En la parcela piloto 2 antes de nivelación, las tres direcciones presentan valores de errores muy estables, para las direcciones X,Y empiezan con errores un poco más de 6 cm y terminan estabilizándose cercanos a los 7 cm, se puede observar que después de 6 GCP las dos líneas casi son empalmadas. Para “Z”, solo tiene un pico ligero con 5GCP, pero desde 4 puntos el error es cercano a los 2 cm. En este vuelo la coordina “Z” esta que sigue teniendo mejor precisión haciendo referencia a lo encontrado en el vuelo 1.



La parcela piloto 2 después de nivelación, presenta valores muy estables en las coordenadas "X,Y" con un error cuadrático medio de alrededor de 5cm, en este vuelo, mostro una particularidad, ya que antes de nivelación se podría suponer que es un terreno muy plano y que los puntos de validación no presentan mucho error, en cambio, cuando se evalúa la parcela después de nivelación nos muestra que el terreno es más irregular y que existe mucho error hacia el centro de la parcela, ya que los primeros 4 GCP están distribuidos en la periferia y que cuando agregamos un punto más al centro de la parcela el error mejora considerablemente, presentando un error cuadrático medio cercano a 2 cm. En este vuelo igualmente la coordenada "Z" es donde se obtuvo mayor precisión.

La parcela piloto 3 antes de nivelación, presenta una tendencia constantes para las direcciones "X,Y" desde 4 GCP, donde "X" tiene un error de 5 cm y "Y" de 3 cm. Para "Z" si existe una mejora considerable de 4 a 5 GCP, la cual se observa al disminuir el error mayor a 20 cm hasta estabilizarse en 5 cm.

Para la parcela piloto 4 antes de nivelación, presenta una estabilización para las coordenadas "X,Y" desde 4 GCP con un error medio alrededor de los 3 cm mientras que para "Z" de 4 a 6 GCP existe una mejora notable 16 cm con 4 GCP hasta alcanzar una estabilidad de alrededor de 4 cm con 6 GCP. En este vuelo, aunque la diferencia en error en las tres direcciones es muy poca, la coordenada "Y" es la presenta mayor exactitud.

La parcela piloto 4 después de nivelación se puede observar que las tres direcciones se mantienen estables después de 6 GCP, donde la coordenada Y es la que presenta mayor exactitud.

Los resultados arrojados para la parcela piloto 5 antes de nivelación muestran que "X,Y" se mantienen estables desde 4 GCP donde "X" presenta un error de 3 cm y "Y" de 4 cm, en cuanto a "Z" el cambio si es notorio de 4 a 5 GCP que es donde se presenta el mayor gradiente de pendiente (6cm), aunque el error sigue mejorando después conforme se van agregando GCP, se nota que después de 6GCP error entre



los puntos que se van adicionando no supera los 2 cm. En este vuelo particular la “Z” es la que muestra mayor precisión con 10 GCP.

Por último, la parcela piloto 5 después de nivelación se tienen una tendencia estable en las tres direcciones después de 6 GCP, aunque la pareciera que la coordenada “X” presenta una caída muy abrupta al final de la prueba (10 GCP) el error sería solamente de 5 mm, prácticamente despreciable y que pudiera estar atribuido al GPS de precisión. En general las tres coordenadas presentan un error de 2.5 cm.

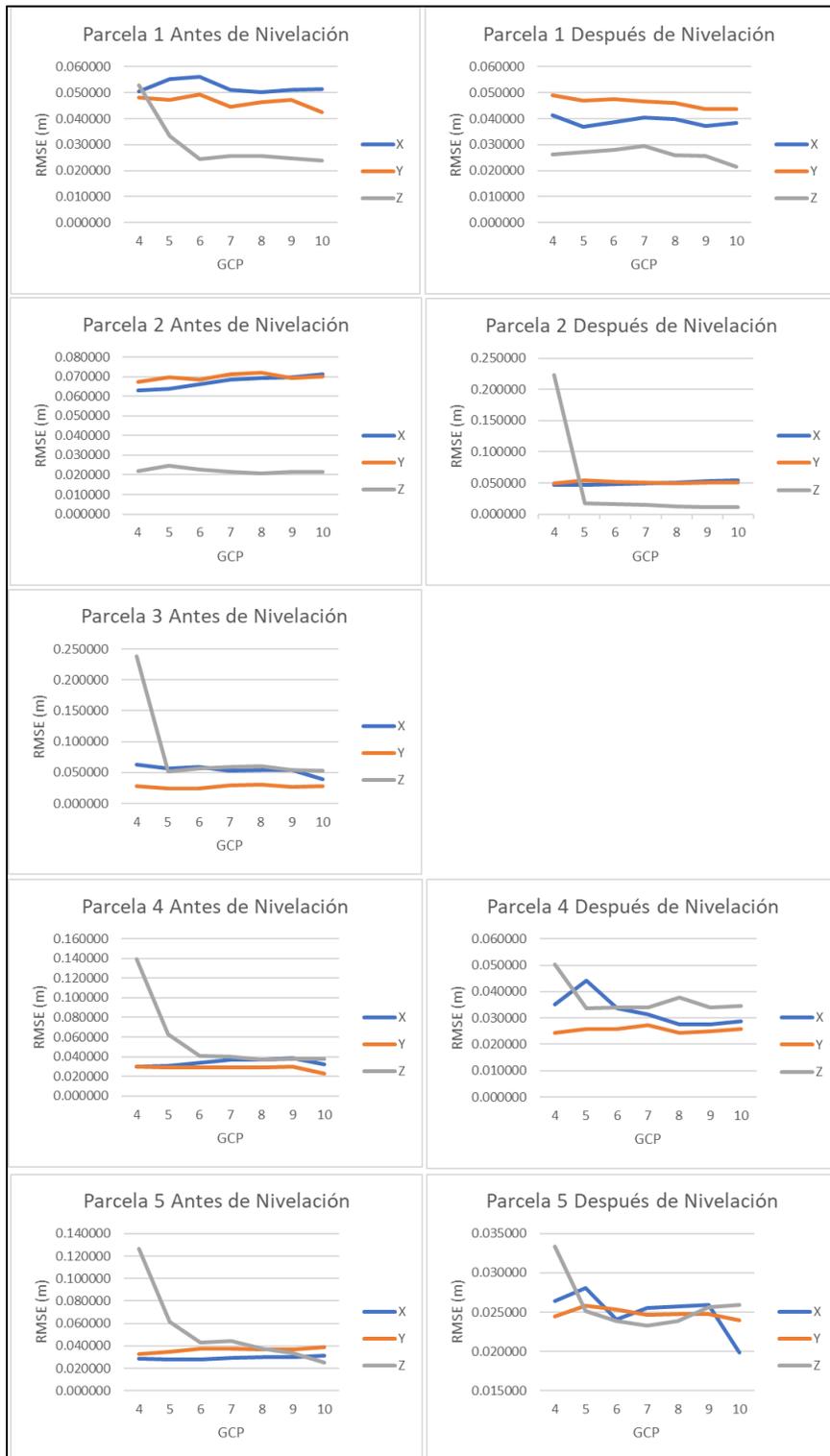


Figura 58. Evaluación de GCP con respecto al error cuadrático medio en 5 parcelas piloto



8 Conclusiones

La principal ventaja fundamental entre técnicas de SfM y la fotogrametría clásica es el uso de una nueva generación de algoritmos de coincidencia de puntos clave (Key points), lo cual permite reconocer características físicas presentes en muchas imágenes y desde diferentes perspectivas, esto quiere decir que es posible procesar imágenes aun con ángulos de movimientos grandes (la fotogrametría clásica solo permite 3°) y no es necesario tener la geolocalización de la fotografías a priori para la realizar la restitución fotogramétrica.

La precisión del DEM basado en la técnica structure from Motion (SfM), para la restitución de la geometría tridimensional de objetos espaciales en imágenes digitales de alta resolución capturadas con drones, aumenta con la cantidad de los GCP utilizados.

La distribución de los GCP es un factor de peso para determinar la precisión de los modelos, se deben colocar los puntos GCP, de manera que la configuración sea representativa del área, cubriendo tanto la periferia con el área central de la zona de interés.

El número mínimo de puntos de control en tierra, encontrado en este trabajo de investigación para parcelas destinadas a nivelación, son de 5 GCP distribuidas de manera uniforme en la periferia y al centro del área de interés.

El rango de error después de nivelación es menor con respecto a una parcela que aún no se ha nivelado incluso tomando en cuenta solo 4 GCP para el procesamiento con distribución a la periferia del terreno, bajo esta premisa se concluye con base en la estabilización de los errores que es posible dar el seguimiento de las parcelas



niveladas con buena precisión después de agregar 5 GCP para el procesamiento de los modelos.

Las actividades de campo como: la adquisición de imágenes con equipos fotográficos montados en drones y el marcado de puntos de control terrestre (GCP) son rápidas.

A diferencia de las actividades de campo, las actividades de gabinete requirieron de mayor tiempo para su realización, debido a que las imágenes al ser de muy alta resolución, requieren de mayor recurso de computadora, por lo cual es necesario contar con equipos de alta gama lo que conlleva a una inversión económica considerable para poder aplicar estas técnicas.

9 Literatura Citada.

Agüera-Vega, F.; Carvajal-Ramírez, F.; Martínez-Carricondo, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement* 2017, 98, 221-227.

Alidoost, F. y Arefi, H. (2017). COMPARISON OF UAS-BASED PHOTOGRAMMETRY SOFTWARE FOR 3D POINT CLOUD GENERATION: A SURVEY OVER A HISTORICAL SITE. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-4/W4, 2017 4th International GeoAdvances Workshop, 14-15 October 2017, Safranbolu, Karabuk, Turkey.

Cheng, Y., Xue, D., & Li, Y. (2007). A Fast Mosaic Approach for Remote Sensing Images. *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009-2013. <http://doi.org/10.1109/ICMA.2007.4303859>.

CONAGUA. (2007). Plan director distrito de riego 043 estado de Nayarit.

DJI. (2017). Manual de usuario Phantom 4 pro/pro+.

<https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro/info#downloads>.



- Enciso, J.; Jung, J.; Chang A. Chavez, J. C.; Yeom, J.; Landivar, J. y Cavazos, G. (2018) Assessing land leveling needs and performance with unmanned aerial system. *J. Appl. Remote Sens.* 12(1), 016001 (2018), doi: 10.1117/1.JRS.12.016001.
- Gallardo, A. I. (1987). Nivelación de suelos agrícolas: una mejora permanente. *IPA Quilamapu* No. 32. Programa de riego. Página 32-34.
- Harwin, S. ; Lucieer, A. ; y Osborn, J. (2015). "The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis," *Remote Sens.* 7(9), 11933-11953.
- Harwin, S. (2017). A comparison of standard fixed-wing vs multicopter drone photogrammetry surveys. *Professional Drone services for Aerial Mapping, Inspection, Filming and more. Australian UAV.*
- INEGI. (visita del 10 de diciembre del 2019) Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción ¿Qué es un modelo digital de elevación?. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>
- James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>.
- Madawalagama, S. L., Munasinghe, N., Dampegama, S. D. & Samarakoon, L., 2016. Low cost aerial mapping with consumer-grade drones. s.l., s.n.
- Qassim A. Abdullah (2018). *Geometry of Vertical Image. Geospatial Applications of Unmanned Aerial Systems (UAS)*. Department of geography. The Pennsylvania State University
- Raczynski, R. J. Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters. MASTER DEGREE THESIS. Course TBA4925 Geomatics, master tesis. Norwegian University of



Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering.

- Ramírez, C. E. J.; Morales, M. L. M. y Coba, P. P. Comparación de softwares comerciales fotogramétrico para procesar imágenes adquiridas por UAV en dos escenarios: marino y terrestre. Laboratorio de SIG y PR. Ciudad Universitaria Puerto Ángel, Distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca, México, C.P. 70902.
- Ramiro García-Luna, Salvador Senent, Rafael Jurado-Piña, Rafael Jimenez. (2019) Structure from Motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels. Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Caminos, C. y P.; C/Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, Spain. 0886-7798/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- Rosnell, T., Honkavaara, E. (2012). Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadcopter typemicro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. Sensors 12 (1), 453-480.
- Sanz, A. E.; Chandler, J.H.; Rodríguez, P. J.R.; y Ordoñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sens. 10, 1606; doi:10.3390/rs10101606. www.mdpi.com/journal/remotesensing.
- Sifuentes, F.J. y Vásquez R., "Introducción a la Fotogrametría" General Duckworth & Co., Londres, 1987.
- Schwind, M., Starek, M.J., (2017). Assessing 3D Point Cloud Fidelity of UAS-SfM Software Solutions over Varying Terrain. In: 18th Annual JALBTCX Airborne Coastal Mapping and Charting Technical Workshop
- Tahar, K.N. (2013). AN EVALUATION ON DIFFERENT NUMBER OF GROUND CONTROL POINTS IN UNMANNED AERIAL VEHICLE PHOTOGRAMMETRIC BLOCK. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial



Information Sciences, Volume XL-2/W2, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27 - 29 November 2013, Istanbul, Turkey

Velasco, J.; Garcia, N. S.; Reynoso, M. G.; Sanchis, J. (2012). Desarrollo y evaluación de una estación de control de tierra para vehículos aéreos no tripulados. XXXIII Jornadas de Automática. Vigo, 5 al 7 de septiembre de 2012.

Villanueva, J.K.S. y Blanco, A.C. (2018). Optimization of ground control point (gcp) configuration for unmanned aerial vehicle (uav) survey using structure from motion (sfm). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W12, 2019 5th International Conference on Geoinformation Science - GeoAdvances 2018, 10-11 October 2018, Casablanca, Morocco

Wolf, Paul R; DeWitt Bon A.; Wilkinson Benjamin E. (2013). Elements of Photogrammetry with Application in GIS, Fourth Edition. McGraw-Hill Education; October 2013 ISBN: 9780071761116 Edition: 4

<http://conf2017.uas4rs.org.au/wp-content/uploads/Session2-Steve-Harwin.pdf>

<https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>

<https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/657>

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204010419-iOS-Pix4Dcapture-Manual-and-Settings#label8>

<https://www.geavis.si/en/2018/01/role-image-matching-photogrammetry/>

<https://support.pix4d.com/>

<https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>

www.microcoptero.com