

**EXACTITUD DE LA RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA USANDO VEHÍCULOS
AÉREOS NO TRIPULADOS A PARTIR DE UN LEVANTAMIENTO
TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL.**

**JEFERSON ANDRÉS FUENTES GONZÁLEZ
MIGUEL ÁNGEL CAMARGO JAIMES**

DIRECTOR

MSc. RICARDO PICO VARGAS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA**

2018

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GENERAL	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3. ALCANCE.....	10
4. MARCO TEÓRICO	11
4.1 CONCEPTOS GENERALES DE FOTOGRAMETRÍA.....	11
4.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	12
4.3 ESTÁNDARES PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD POSICIONAL	14
4.3.1 National Map Accuracy Standard (NMAS)	15
4.3.2 Engineering Map Accuracy Standard (EMAS).....	15
4.3.3 Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps (ASPRS) .	17
4.3.4 Categoría de exactitud del MDT (U.S. Geological Survey - USGS).....	18
4.3.5 National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)	20
5. SELECCIÓN DEL TERRENO DE MUESTRA Y RECONOCIMIENTO DE CAMPO	23
6. TRABAJO DE CAMPO	24
6.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL	24
6.2 LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.....	25
6.3 PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN DEL VUELO FOTOGRAMÉTRICO	25
7. GENERACIÓN DEL MDE Y LA ORTOFOTO	27
7.1 AÑADIR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS ADQUIRIDAS EN EL VUELO PROGRAMADO.	27
7.2 ORIENTAR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS.....	27
7.3 CREAR LA NUBE DE PUNTOS DENSA	28
7.4 CALIBRAR EL MODELO CON LOS PUNTOS DE CONTROL	29
7.5 RE-ORIENTAR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS CON BASE EN LOS PUNTOS DE CONTROL.....	30
7.6 CREAR NUEVAMENTE LA NUBE DE PUNTOS DENSA.....	31
7.7 CREAR LA MALLA DE TRIÁNGULOS INTERPOLADOS.....	31
7.8 TEXTURIZADO DEL MODELO	32

7.9 GENERACIÓN DE LA ORTOFOTO	33
7.10 GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)	34
8. EXTRACCIÓN DE CURVAS DE NIVEL A PARTIR DEL MDE Y DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.	35
9. RESULTADO DE ERRORES EN LOS PUNTOS DE CONTROL.....	38
10. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	39
10.1 ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL	39
10.1.1 Resultados del test NMAS.	39
10.1.2 Resultados test EMAS.	40
10.1.3 Resultados test ASPRS	41
10.1.4 Resultados test USGS	42
10.1.5 Resultados NSSDA.....	42
11. CONCLUSIONES	44
11.1 RECOMENDACIONES	44
12. BIBLIOGRAFÍA.....	45
13. LISTA DE ANEXOS	46
13.1 ANEXO 1. PUNTOS LEVANTAMIENTO.....	46
13.2 ANEXO 2. PUNTOS DE CONTROL	46
13.3 ANEXO 3. INFORME DE AGISOFT PHOTOSCAN	46
13.4 ANEXO 4. MEMORIAS DE CALCULO DE CALIDAD POSICIONAL.....	46
13.5 ANEXO 5. MODELO AGISOFT PHOTOSCAN	46
13.6 ANEXO 6. MANUAL DE USUARIO DJI PHANTOM 4.....	46
13.7 ANEXO 7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTACIÓN TOTAL	46
13.8 ANEXO 8. RASTER DE ELEVACIONES	46
13.9 ANEXO 9. PLANOS.....	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Modelo estereoscópico.....	11
Ilustración 2. Línea de flujo típica en el proceso de adquisición de imágenes por un VANT	13
Ilustración 3. Diferentes formas de ejecución de un vuelo para diferentes calidades de grupos de imágenes.	13
Ilustración 4. Proceso de control de calidad de un proceso por el método de “caja negra”.....	14
Ilustración 5. Ejemplos de Exactitud aconsejable en función del tipo de mapa	22
Ilustración 6. Fotografías del terreno de muestra.....	23
Ilustración 7. Registro fotográfico del levantamiento topográfico.	24
Ilustración 8. Marca de campo para la identificación de puntos de control. ...	25
Ilustración 9. VANT <i>DJI phantom 4</i> utilizado para la toma de fotografías aéreas.....	26
Ilustración 10. Captura de pantalla Aplicación <i>Plx4dcapture</i> para equipos móviles.....	26
Ilustración 11. imágenes añadidas al software <i>PhotoScan</i> para su procesamiento.	27
Ilustración 12. Orientación de las fotografías aéreas en <i>PhotoScan</i>	28
Ilustración 13. Nube de puntos densa a partir de Fotografías aéreas.....	28
Ilustración 14. Calibración de los marcadores de los puntos de control con las marcas del terreno.....	30
Ilustración 15. Re-orientación de las fotografías aéreas en <i>PhotoScan</i> con base en los puntos de control.	30
Ilustración 16. Creacion de la malla de triángulos interpolados a partir de la nube de puntos densa.	31
Ilustración 17. Creacion de la malla de triángulos interpolados a partir de la nube de puntos densa.	32
Ilustración 18. Texturizado del modelo.	32
Ilustración 19. Generación de la ortofoto del área de estudio.	33
Ilustración 20. Modelo digital de elevaciones (DEM) obtenido.	34
Ilustración 21. Curvas de nivel extraídas a partir del (DEM) obtenido.	35
Ilustración 22. Curvas de nivel obtenidas a partir del levantamiento topográfico realizado.	36
Ilustración 23. Superposición de curvas de nivel obtenidas del DEM y levantamiento topográfico.....	37
Ilustración 24. Ejemplos de Exactitud aconsejable en función del tipo de mapa.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites del RMS de componentes X o Y para la <i>Clase I</i>	18
Tabla 2. Errores obtenidos para las componentes X, Y y Z de cada uno de los puntos de control.....	38
Tabla 3. Resultados del Test NMAS para las componentes XY	39
Tabla 4. Resultados del test NMAS para la componente Z	39
Tabla 5. Resultados del Test EMAS para las componentes X, Y y Z	40
Tabla 6. Límites del RMS calculados para los datos obtenidos	41
Tabla 7. Límites del RMS de componentes X o Y para la <i>Clase I</i>	41
Tabla 8. Resultados del test ASPRS para las componentes X, Y y Z.....	41
Tabla 9. Resultados del test USGS, categoría de exactitud del el MDT para la componente Z.....	42
Tabla 10. Límites del RMS calculados para los datos obtenidos.....	42

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EXACTITUD DE LA RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA USANDO VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS A PARTIR DE UN LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL.

AUTOR(ES): Fuentes-González, Jeferson-Andrés
Camargo-Jaimes, Miguel-Ángel

PROGRAMA: Esp. en Vías Terrestres

DIRECTOR(A): MSc. Ricardo Pico Vargas

RESUMEN

En la actualidad es cada vez más fácil adquirir y procesar imágenes aéreas debido a la accesibilidad a diferentes tipos de vehículos aéreos no tripulados (VANT), esto abre un alto rango de aplicabilidad en disciplinas que usan Modelos digitales de terreno en la ejecución de sus actividades, es por esto que la determinación de la exactitud en una restitución fotogramétrica es un factor indispensable en el momento de usar la información cartográfica obtenida. En el presente documento se pretende determinar la exactitud de una restitución fotogramétrica usando vehículos aéreos no tripulados utilizando el software PhotoScan de la casa Agisoft a partir de un levantamiento convencional valiéndose de estándares de calidad posicional basados en métodos estadístico como lo son; NMAP (National Map Accuracy Standard), EMAS (Engineering Map Accuracy Standard), ASPRS (Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps), USGS (U.S. Geological Survey) y NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy).

PALABRAS CLAVE:

Fotogrametría, Exactitud, Estándares, VANT

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ACCURACY OF THE PHOTOGRAMMETRIC RESTITUTION USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FROM A CONVENTIONAL TOPOGRAPHICAL SURVEY.

AUTHOR(S): Fuentes-González, Jeferson-Andrés
Camargo-Jaimes, Miguel-Angel

FACULTY: Esp. en Vías Terrestres

DIRECTOR: MSc. Ricardo Pico vargas

ABSTRACT

Nowadays, it is increasingly easy to acquire and process aerial images due to the accessibility to different types of unmanned aerial vehicles (UAV). These open a wide range of applicability in disciplines that use digital terrain models in the execution of their activities, that is why the determination of the accuracy in a photogrammetric restitution is an indispensable factor when using the obtained cartographic information. The purpose of this document is to determine the accuracy of a photogrammetric restitution using unmanned aerial vehicles using the Agisoft PhotoScan software from a conventional survey using positional quality standards based on statistical methods such as; NMAS (National Map Accuracy Standard), EMAS (Engineering Map Accuracy Standard), ASPRS (Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps), USGS (U.S. Geological Survey) and NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy).

KEYWORDS:

Photogrammetry, Accuracy, Standards, VANT

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay cada vez más accesibilidad a tecnologías para la adquisición y procesamiento de imágenes aéreas. Esto abre un alto rango de aplicabilidad en disciplinas que emplean modelos digitales del terreno como base para la ejecución de sus actividades.

Sin embargo, dependiendo de cuál sea la finalidad de la información obtenida se requiere una exactitud mínima que permita realizar de manera satisfactoria las actividades necesarias, por ejemplo, en el caso específico de la ingeniería de vías no hace falta la misma exactitud en la información (en este caso la topografía) para realizar el trazado de una línea de ceros en un estudio fase I de prefactibilidad que para un estudio fase II de factibilidad, o fase 3 de diseños definitivos. De igual manera sucede en la geotecnia vial en donde los parámetros topográficos más influyentes en la estabilidad de un talud se derivan de su geometría como su altura y pendiente, luego se podría llegar a indagar ¿Hasta qué punto la exactitud del modelo digital de terreno utilizado en los análisis de estabilidad es influyente y aceptable en los resultados obtenidos?

Para el caso particular de este documento se pretende analizar un modelo digital de terreno creado a partir de imágenes aéreas obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) con otro obtenido mediante un método topográfico convencional y estación total, se espera determinar un rango válido de exactitud para su uso (si acaso lo hay).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la exactitud de un modelo digital de terreno obtenido a partir de restitución fotogramétrica usando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) con otro modelo obtenido mediante un levantamiento topográfico convencional

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- validar e implementar el uso del VANT como apoyo a problemas de la ingeniería de vías.
- Obtener un modelo digital de terreno a partir del procesamiento de imágenes aéreas obtenidas por medio de un vehículo aéreo no tripulado usando software de fotogrametría.
- Comparar el modelo digital de terreno obtenido mediante el uso del VANT con otro obtenido a partir de topografía convencional.
- Establecer si el modelo adquirido mediante el uso del VANT alcanza la exactitud necesaria para ser usado en labores de Ingeniería teniendo en cuenta pruebas estadísticas de calidad posicional.

3. ALCANCE

La adquisición de topografía es un elemento común e indispensable en cualquier proyecto de ingeniería civil y más aún en el caso específico de la ingeniería de vías, donde es el insumo principal tanto para el diseño geométrico como para el cálculo de volúmenes en el movimiento de tierras. Además, se utiliza en otras disciplinas complementarias como la geotecnia vial, hidrología, hidráulica y geología entre otras.

Por esta razón es importante tener en cuenta el método de adquisición de la información del terreno y la exactitud requerida para llevar a cabo los levantamientos. Actualmente se pueden identificar diversas herramientas para la captación de datos topográficos como la estación total, GPS de doble frecuencia, escáneres laser, además de imágenes satelitales y vuelos LIDAR, siendo los dos primeros los más utilizados en nuestro medio.

Sin embargo, con el continuo mejoramiento de la tecnología en la captación y procesamiento de imágenes aéreas, la fotogrametría digital ha tenido una evolución importante. Lo anterior se ve reflejado en la accesibilidad a vehículos aéreos no tripulados y software para el procesamiento de imágenes usadas en la construcción de ortomosaicos y elaboración de modelos digitales de elevaciones (MDE) útiles para la Ingeniería de vías en actividades tales como;

- Obtención de cartografía para en el diseño vial.
- Actualización de topografía existente.
- Elaboración de modelos Geotécnicos para el análisis de estabilidad de taludes.
- Reconocimiento del terreno en lugares de difícil acceso
- Estimación rápida de movimientos de tierras.
- Seguimiento de obras viales, entre otros.

No obstante, se requiere de un rango válido de exactitud de la información dependiendo de la actividad requerida. En respuesta al problema planteado esta propuesta está orientada a establecer la calidad posicional de una restitución aerofotogramétrica usando un vehículo aéreo no tripulado y comparándola con un método convencional de mayor exactitud como lo es el levantamiento con estación total, valiéndose de estándares de calidad posicional fundamentados en procesos estadísticos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CONCEPTOS GENERALES DE FOTOGRAMETRÍA

“la reconstrucción de la posición de un par de fotogramas tal y como se hicieron en el momento de la toma, permite una visión estereoscópica del modelo fotogramétrico. Igualmente, esa reconstrucción de la posición de los fotogramas, por analogía geométrica, nos permitirá la medición de coordenadas tridimensionales para la elaboración del mapa.

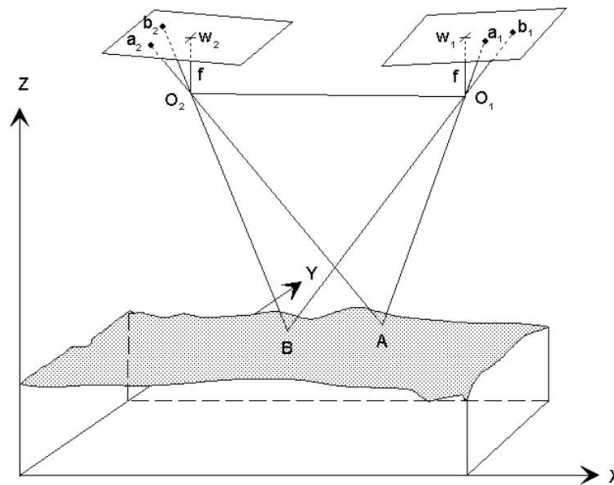


Ilustración 1. Modelo estereoscópico

Fuente: Figura 9, en Sánchez Sobrino, 2006

Este precisamente es el problema fundamental de la fotogrametría en el proceso: la reconstrucción de la geometría en el espacio (a escala) de las posiciones de los fotogramas. Con ello podremos reconstruir geoméricamente (o, mejor dicho, analíticamente) los haces perspectivos que unen pares de puntos en el fotograma izquierdo y derecho con los correspondientes puntos en el terreno. Para reconstruir los haces perspectivos que determinan los puntos A, B, etc., el problema se resuelve con tres orientaciones sucesivas:

- *Orientación interna*: consiste en averiguar la focal (es un parámetro constante de la cámara si se ha hecho la calibración correspondiente) y la posición del punto principal en cada fotograma, w . Esto se puede resolver midiendo las coordenadas en un determinado sistema (que denominaremos sistema fotografía) de las marcas fiduciales.
- *Orientación relativa*: consiste en orientar los dos fotogramas en el espacio en la misma posición que en el instante de toma, es la orientación espacial del haz de rayos perspectivos. Si orientando una foto con respecto a otra

conseguiamos eliminar la paralaje vertical, el problema estará resuelto, el rayo a1O1 se cortará con el rayo a2O2, precisamente en el punto A.

La orientación relativa consistiría en el posicionamiento de un sólido en el espacio, es decir, un problema de 6 incógnitas: 3 translaciones y 3 giros alrededor de los tres ejes principales. En realidad, 5 incógnitas, ya que la modificación de la base en sentido del eje de vuelo (bx) sólo modificará la escala del modelo, modificando asimismo la paralaje horizontal px y no la paralaje vertical, que es la finalidad de la orientación relativa (eliminarla).

Si se ha conseguido esto, fijándonos en la figura anterior, podemos imaginar que tenemos materializado el modelo del terreno (a escala), pero el conjunto rígido de fotogramas con centros de proyección, haces perspectivos y modelo no están fijados aún en una posición en el espacio con respecto al sistema de referencia terrestre de coordenadas.

- Orientación absoluta: sería el posicionamiento y nivelación del modelo con respecto al sistema de referencia terrestre, así como averiguar la escala del modelo. Por ello habría 7 incógnitas en este problema. Se resuelve con la ayuda de puntos de control o puntos de apoyo medidos en el terreno e identificables en los fotogramas. Con las coordenadas terreno de 3 puntos (X, Y, Z) podríamos llevar el modelo a su posición absoluta en el espacio (3 traslaciones) y "nivelarlo", fijar la orientación del modelo respecto al sistema de coordenadas (3 giros).

Realizadas estas tres orientaciones, el modelo estaría orientado y se podría empezar a determinar coordenadas absolutas de los puntos que midamos. En esta idea general y resumida del problema diremos que un instrumento que permite hacer todas estas operaciones se llama restituidor. “(Sánchez Sobrino,2006)

4.2 ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Como lo indican: Nex y Remodino (2012), la adquisición de la información del vuelo requiere de una planeación previa; es necesario conocer el área de interés, la distancia de calibración en el terreno (GSD) (proyección en el terreno, de un píxel en la matriz del plano focal de la cámara) y los parámetros propios de la cámara digital empleada. Para determinar la altura de vuelo es preciso ajustar la escala de la imagen deseada y la distancia focal usada. Adicionalmente, la ruta de vuelo (Waypoints) se debe calcular teniendo en cuenta un traslapeo longitudinal y transversal de las fajas de entre un 60% y 80% dependiendo del objetivo del vuelo; para los modelos 3D usualmente se requieren traslapos grandes y alturas de vuelo bajas, mientras que para manejo de emergencias es necesario levantar grandes áreas en pocos minutos con una menor resolución.

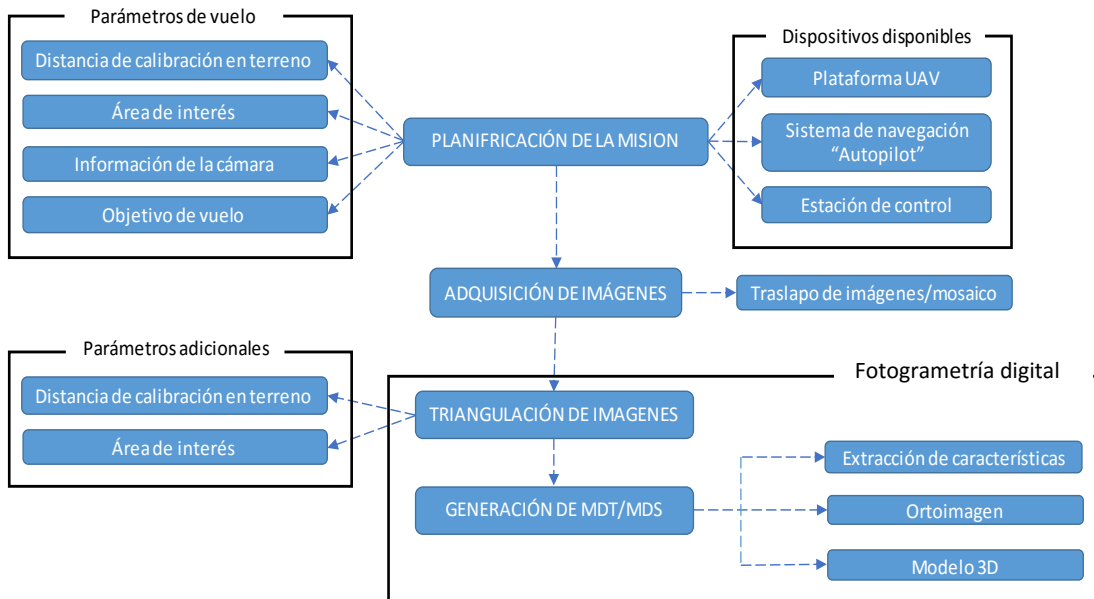


Ilustración 2. Línea de flujo típica en el proceso de adquisición de imágenes por un VANT

Fuente: Figura 2, en Nex y Remodino, 2012

El modo de realizar el vuelo y los dispositivos disponibles en la plataforma del VANT determinan en gran medida la calidad de la red de imágenes. En el modo manual, esto es, exclusivamente dirigido por el usuario, se obtienen traslajos de imágenes y geometrías irregulares, mientras que con la presencia de un sistema global de navegación por satélite junto con sistemas de navegación es posible mejorar la captura de las imágenes.

En la siguiente imagen se esquematiza las diferentes formas de ejecución del vuelo; ya sea a) *modo manual con intervalo programado*, b) *sistemas de navegación de bajo costo con puntos de ruta, pero traslajos irregulares*, o c) *vuelo automatizado con un sistema de navegación de alta calidad*.

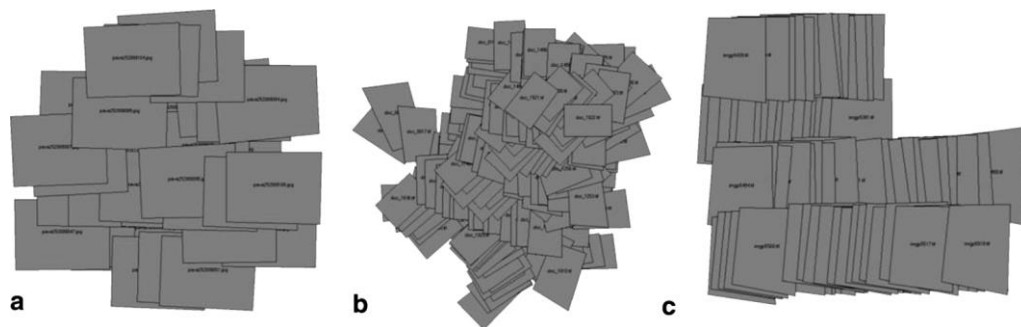


Ilustración 3. Diferentes formas de ejecución de un vuelo para diferentes calidades de grupos de imágenes.

Fuente: Figura 3, en Nex y Remodino, 2012

4.3 ESTÁNDARES PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD POSICIONAL

Si bien es posible generar cartografía usando VANTs, es preciso examinar los errores que se generan en el proceso. Como lo identifica Atkinson-Gordo 2008: “En el proceso cartográfico de generación de un mapa los errores pueden provenir tanto de los datos como de los procesos propiamente dichos, pero, en cualquier caso, el error se transmite y acrecienta en la mayoría de las veces a lo largo de la cadena productiva” (p.47).

Este sugiere dos formas básicas de estudiar el error:

- **Física.** Consiste en medir el error en los procesos identificados a lo largo de toda su cadena productiva.
- **Estadística.** Evalúa la calidad de mapa mediante un test estadístico aplicado a una muestra de datos representativos conocido como “caja negra” como se muestra en la *Ilustración 4*.

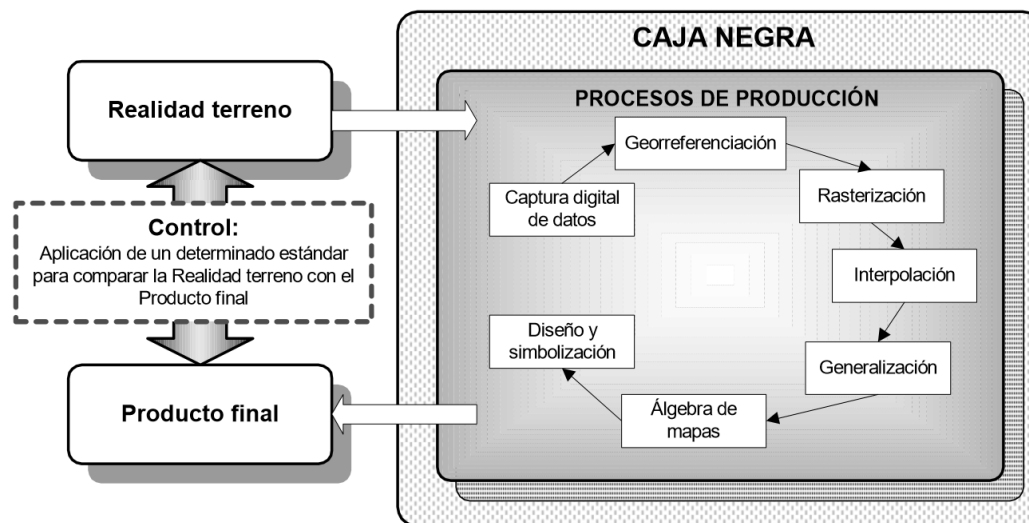


Ilustración 4. Proceso de control de calidad de un proceso por el método de “caja negra”.

Fuente: Atkinson-Gordo (2008).

Existen diversos estándares estadísticos que permiten verificar la exactitud de un producto cartográfico en sus diferentes componentes X, Y o Z, para esto es necesario conocer una muestra de puntos tanto en la cartografía producida como en una fuente de mayor exactitud (FME) como pueden ser los datos tomados en campo. A continuación, se describen algunos de estos métodos estadísticos que fueron usados en el presente proyecto.

4.3.1 National Map Accuracy Standard (NMAS)¹

Surge como una forma de garantizar la exactitud cartográfica tanto en las componentes horizontales X y Y como vertical Z, inicialmente liderado por la sociedad americana de fotogrametría en 1937, posteriormente las agencias federales incluido el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) hacen sus propias investigaciones y emiten los “*Estándares de exactitud de mapas nacionales de los Estados Unidos*”, estos son revisados en varias ocasiones hasta dar con la versión actual emitida en 1947 por la U.S. B.B (U.S Bureau of the Budget) denominada – “*National Map Accuracy Standard*” (NMAS).

El procedimiento para la evaluación de la exactitud en la producción cartográfica consiste en tomar una muestra de puntos de los cuales se conozca sus coordenadas en el mapa y en una fuente de mayor exactitud verificando las siguientes condiciones.

4.3.1.1 Exactitud Horizontal

Para mapas de escala de publicación mayores que 1:20.000, como máximo el 10 por ciento (10%) de los puntos ensayados puede tener un error mayor que 1/30 Pulgadas (0.085 cm) medidos en la escala de publicación; para mapas en publicaciones de 1:20.000 o menores, 1/50 pulgadas (0.05 cm), Estos límites de exactitud se aplicarán en todos los casos únicamente a posiciones de puntos bien definidos, es decir que son fácilmente visibles o reconocibles en el terreno, como por ejemplo; monumentos, intersecciones, esquinas de edificios, marcas de referencia. Etc.

4.3.1.2 Exactitud Vertical

tal como se aplica a los mapas de contorno en todas las escalas de publicación, deberá ser tal que no más del 10 por ciento (10%) de las elevaciones ensayadas sean en error más de la mitad del intervalo de las curvas de nivel. Al verificar las elevaciones tomadas del mapa, el error vertical aparente puede disminuirse al asumir un desplazamiento horizontal dentro del error horizontal permisible para un mapa de esa escala.

El mapa pasará es estándar si cumple con los requerimientos de exactitud tanto en la componente vertical como en la componente horizontal y adicionalmente deben tener en cuenta este hecho en sus leyendas, de la siguiente manera: “*Este mapa cumple con los estándares de exactitud de mapas nacionales*”.

4.3.2 Engineering Map Accuracy Standard (EMAS)

Surge en 1983 por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCI) como otra opción al estándar NMAS, este test establece límites para los errores sistemáticos y errores casuales por medio de umbrales aceptables con base en estadísticos de

¹ United States National Map Accuracy Standards, U.S. BUREAU OF THE BUDGET.

prueba y el nivel de confianza de la muestra de los puntos ensayados, a continuación, se presenta el procedimiento para ejecutar el estándar.

tomar una muestra de puntos de los cuales se conozca sus coordenadas en el mapa y en una fuente de mayor exactitud, posteriormente Calcular;

$$e_{xi} = x_{pi} - x_{ti} \quad (1)$$

Donde:

e_{xi} = Error en la componente X del punto i

X_{ti} = Coordenada del punto i en el terreno

X_{mi} = Coordenada del punto i en el mapa

$$\bar{e}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{xi} \quad (2)$$

Donde:

\bar{e}_x = Error medio en la componente X para n puntos de la muestra

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_{xi} - \bar{e}_x)^2} \quad (3)$$

Donde:

S_x = Desviación estandar de la muestra en la componente X

A continuación, se calcula el límite de error aceptable para los errores sistemáticos²²

$$t_x = \frac{\bar{e}_x \sqrt{n}}{S_x} \quad (4)$$

Se verifica que $|t_x| \leq t_{n-1, \alpha}$

Donde:

$n - 1$ = Grados de libertad

α = nivel de significancia

t = estadístico teórico de la distribución t Student

²² Los errores sistemáticos son aquellos que se producen por defectos en el instrumento de medición o desaciertos en la suposición de parámetros como temperatura, presión atmosférica etc.

Posteriormente se calcula el límite de error aceptable para los errores Aleatorios³

$$X_x^2 = \frac{S_x^2(n-1)}{\sigma_x^2} \quad (5)$$

Se verifica que $|X_x^2| \leq X_{n-1,\alpha}^2$

Donde:

σ_x = *Límite de error aceptable (Varianza máxima) en la componente X*

$n - 1$ = *Grados de libertad*

α = *Nivel de significancia*

X^2 = *Estadístico teórica de la distribución Chi Cuadrado*

Se debe ejecutar el test para cada una de las componentes X, Y y Z, el producto cartográfico se aceptará para el test EMAS si todas las componentes cumplen el estándar.

4.3.3 Spatial Accuracy Specification for Large Scale Topographic Maps (ASPRS)

Este estándar fue desarrollado por la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Cabe resaltar que este estándar surge de la revisión U.S National Map Accuracy Standard para mapas de pequeña y gran escala. Una característica importante de estos estándares ASPRS es que indican la exactitud a la escala del terreno. Por lo tanto, la información espacial digital de exactitud a una escala de terreno conocida se puede relacionar con la escala de mapa apropiada para la presentación gráfica en un estándar reconocido. Estos estándares se refieren a las definiciones de exactitud espacial pertenecientes a mapas topográficos a gran escala preparados para propósitos especiales o aplicaciones de ingeniería. Medición

4.3.3.1 Exactitud Horizontal

la exactitud horizontal de un mapa es definida por el error de la raíz cuadrática media RMS en términos de las coordenadas planimétricas X o Y del proyecto para los puntos de control determinados a la escala del mapa. Los valores límites del RMS son definidos y tabulados por este estándar para la *clase I* (Ver *Tabla 1*)

³ Los errores aleatorios se producen por condiciones imposibles de controlar durante un proceso cuando se mide un parámetro determinado bajo las mismas condiciones y se obtienen valores diferentes.

$$RMSE_{X,Y} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2_{xi,yi}} \quad (6)$$

ESCALA	LIMITE RMSE (m)
1:50	0,0125
1:100	0,025
1:200	0,050
1:500	0,125
1:1.000	0,25
1:2.000	0,50
1:4.000	1,00
1:5.000	1,25
1:10.000	2,50
1:20.000	5,00

Tabla 1. Límites del RMS de componentes X o Y para la Clase I

Fuente: Atkinson-Gordo, 2008.

Si los datos obtenidos no cumplen para la *Clase I*, los valores límite de RMSE de la Tabla 1 deberán ser multiplicados por dos (2) para la *Clase II* o por tres (3) para la *Clase III* según corresponda. Adicionalmente el mapa debe indicar de forma escrita la clase para la cual se ha cumplido el estándar de la siguiente manera;

“Este mapa ha sido comprobado y cumple con el estándar ASPRS para mapas Clase (I, II, III)”

4.3.3.2 Exactitud Vertical

Para la componente altimétrica según lo define *Atkinson-Gordo (2008)* el límite RMSE debe ser de 1/3 del intervalo de las curvas de nivel con excepción de los puntos de control para los cuales será de 1/6 del intervalo.

4.3.4 Categoría de exactitud del MDT (U.S. Geological Survey - USGS)

Este estándar es utilizado por el servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) Para determinar la exactitud de un modelo digital de terreno (MDT), a diferencia de los demás test este solo tiene en cuenta la componente Z. se establecen rangos de error máximos permitidos para el error en la componente vertical y el error cuadrático medio RMSE.

El procedimiento consiste en seleccionar una muestra de puntos del MDT y comparar su componente vertical con la fuente de mayor exactitud FME de la siguiente manera;

- Determinar la cota de la muestra de puntos de control sobre el Modelo digital de terreno MDT
- Determinar la cota de la muestra de los mismos puntos sobre la fuente de mayor exactitud
- Calcular el error en cada uno de los puntos
- Calcular el RMSE para la componente vertical:

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{zi}^2} \quad (7)$$

Donde:

$RMSE_Z$ = Error cuadrático medio en la componente Z

n = Numero de puntos de la muestra

e_{zi} = Error en la componente Z del punto i

Una vez obtenido el valor de RMSE la categoría de exactitud para el MDT se define así:

MDT Categoría 1:

- RMSE máximo: 15m
- La muestra no debe contener puntos con error vertical mayor a 50 m

MDT Categoría 2:

- RMSE máximo: 7m
- La muestra no debe contener puntos con error vertical mayor a dos (2) veces el intervalo de las curvas de nivel de la FME.

MDT Categoría 3:

- RMSE máximo: 7m

- La muestra no debe contener puntos con error vertical mayor al intervalo de las curvas de nivel de la FME

4.3.5 National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

El Estándar (NSSDA) implementa una metodología estadística y de prueba para estimar la exactitud posicional de los puntos en los mapas y en los datos geoespaciales digitales, con respecto a los puntos de terreno georreferenciados de mayor exactitud y se aplica tanto a mapas georreferenciados como información digital geoespacial en formatos ráster al igual que puntos o vectores derivados de fuentes como fotografías aéreas, imágenes satelitales o levantamientos en campo.

Este estándar no define umbrales de exactitud. Cada agencia debe establecer sus propios umbrales para las especificaciones y aplicaciones de sus productos y para fines de contratación. En los usuarios identifican las exactitudes aceptables para sus aplicaciones. Los productores de datos y mapas deben determinar qué exactitud existe o es factible para sus datos y reportarlos de acuerdo con NSSDA.

El procedimiento para ejecutar el test consiste en obtener una muestra de puntos bien definidos tanto en la cartografía como en la fuente de mayor exactitud, posteriormente se calcula el error cuadrático medio RMSE para las componentes horizontales (X y Y) al igual que para la componente vertical (Z) de la siguiente manera;

4.3.5.1 Exactitud Horizontal

- Calcular el RMSE de la componente X

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2_{Xi}} \quad (8)$$

Donde:

$RMSE_x =$ Error cuadrático medio en la componente X

$n =$ Numero de puntos de la muestra

$e_{zi} =$ Error en la componente X del punto i

- Calcular el RMSE de la componente Y aplicando la Ecuación 8
- Calcular el RMSE resultante para la componente XY aplicando la Ecuación 9

$$RMSE_r = \sqrt{RMSE^2_X + RMSE^2_Y} \quad (9)$$

➤ Calcular el coeficiente de exactitud posicional al 95% de confiabilidad teniendo en cuenta:

a) Si $RMSE_x = RMSE_y$ entonces;

$$Exactitud_r = 1.7308 * RMSE_r \quad (10)$$

b) Si $RMSE_x \neq RMSE_y$ si los errores se distribuyen de forma normal e independiente entre la X e Y

$$Exactitud_r = 1.22385 * (RMSE_X + RMSE_Y) \quad (11)$$

4.3.5.2 Exactitud Vertical

➤ Calcular el RMSE de la componente Z aplicando la *Ecuación 12*

$$Exactitud_z = 1.96 * (RMSE_z) \quad (12)$$

Una vez obtenidos los valores de exactitud estos se deben mostrar en el mapa con la siguiente leyenda;

“Comprobado para ___ metros de exactitud al 95% de nivel de confianza”

Debido a que el estándar en si no acepta o rechaza el mapa es deber el usuario establecer el nivel de exactitud necesaria dependiendo de las necesidades de uso, sin embargo, la medida de exactitud de este estándar está dada en unidades reales de campo. En la *Ilustración 5* se presentan algunos ejemplos de recomendaciones de exactitud necesaria en función del tipo de uso de mapa

Tipo de mapa	Escala	Exactitud horizontal	Exactitud vertical	Eq. curvas de nivel
Construcción en general (planos topográficos de detalle)	1/500	100 mm	50 mm	250 mm
Planos de situación de zonas recreativas (campos de golf, campos de atletismo ..)	1/1.000	500 mm	100 mm	500 mm
Planos de Administración (diseño de interiores/exteriores)	1/250	50 mm	N/P	N/P
Planeamiento general de mapas de localización (antenas AM/FM, SIG)	1/5.000	1.000 mm	1.000 mm	1.000 mm
Planos de movimiento de tierras (carreteras, drenajes, bordillos, ...)	1/500	250 mm	100 mm	500 mm
Mapas de los servicios de emergencias/SIG	1/10.000	25.000 mm	N/P	N/P
Mapas de suelos contaminados / Modelización	1/500	1.000 mm	500 mm	500 mm

Ilustración 5. Ejemplos de Exactitud aconsejable en función del tipo de mapa

Fuente: Atkinson-Gordo (2008).

5. SELECCIÓN DEL TERRENO DE MUESTRA Y RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Previamente a la ejecución del trabajo de campo se realizó la selección e inspección del terreno de prueba verificando un área de entre una y dos hectáreas aproximadamente, se eligió un terreno morfológicamente variado con sectores planos, ondulados y escarpados con vegetación generalmente baja para generar una situación ideal en la foto restitución y de esta manera evitar “ruido” en las imágenes obtenidas, sin embargo en algunos sectores se encuentran árboles y rastrojos altos que permitirán evaluar los resultados en estas condiciones.

El terreno de prueba se encuentra localizado en proximidades al casco urbano del municipio de Piedecuesta/Santander sobre las coordenadas geográficas de Latitud: 6°59'14.63"N y Longitud: 73° 2'17.86"O.



Ilustración 6. Fotografías del terreno de muestra.

Fuente: Elaboración propia.

6. TRABAJO DE CAMPO

6.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO CON ESTACIÓN TOTAL

El levantamiento topográfico realizo con un equipo referencia *SPECTRA PRECISION* serie *FOCUS 2* (Ver Anexo 7. Especificaciones técnicas estación total) mediante el método de poligonal cerrada donde se materializaron cuatro (4) estaciones o deltas principales desde los cuales se radiaron 425 puntos de detalle incluidos 20 puntos de control posicional para el vuelo fotogramétrico.

El archivo de puntos obtenidos se encuentra en el *Anexo 1. puntos levantamiento*.



Ilustración 7. Registro fotográfico del levantamiento topográfico.

Fuente: Elaboración propia.

6.2 LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL

Para la identificación de los puntos de control en las fotografías aéreas se localizaron veintiuna (21) Marcas cuadradas de 0.5 m de lado como se observa en la *Ilustración 8*, estas fueron distribuidas aleatoriamente en el área de trabajo y sus coordenadas pueden ser revisadas en el *Anexo 2, Puntos de Control*.

Estas marcas fueron posicionadas minutos antes de realizar la toma de fotografías aéreas simultáneamente con el levantamiento topográfico para disminuir errores relacionados a su movimiento accidental. El procedimiento para la toma de coordenadas fue mediante radiación con estación total desde los deltas de la poligonal cerrada.



Ilustración 8. Marca de campo para la identificación de puntos de control.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN DEL VUELO FOTOGRAMÉTRICO

La planeación y ejecución del vuelo fotogramétrico se llevó a cabo utilizando la herramienta para equipos móviles *Pix4Dcapture*, la altura del vuelo se definió en 60 metros desde el punto más bajo debido a las limitantes del terreno como arboles altos, y laderas cercanas que podían comprometer el VANT, sin embargo antes de esto se verificó la GSD (Ground Sample distance) para la altura definida obteniendo un valor de 2.57cm/Pixel, valor que es aceptable para generar cartografía a escalas de detalle.

Para la ejecución del vuelo se utilizó el vehículo aéreo no tripulado de ala rotatoria *DJI Phantom 4* cuyas especificaciones técnicas están contenidas en el *Anexo 6. manual de usuario dji phantom 4*, se utilizó la función de doble grilla de la aplicación *PIX4dcapture* ver (Ilustración 10) para un área aproximada de 1,3 Hectáreas cubierta en seis (6) líneas de vuelo laterales y cuatro (4) líneas frontales con traslapes de 40%

y 80% respectivamente según sugiere *fernández-hernandez y colaboradores, (2014)*. En total se tomaron 85 fotos en un tiempo aproximado de 20 minutos.



Ilustración 9. VANT *DJI phantom 4* utilizado para la toma de fotografías aéreas.

Fuente: Elaboración propia.

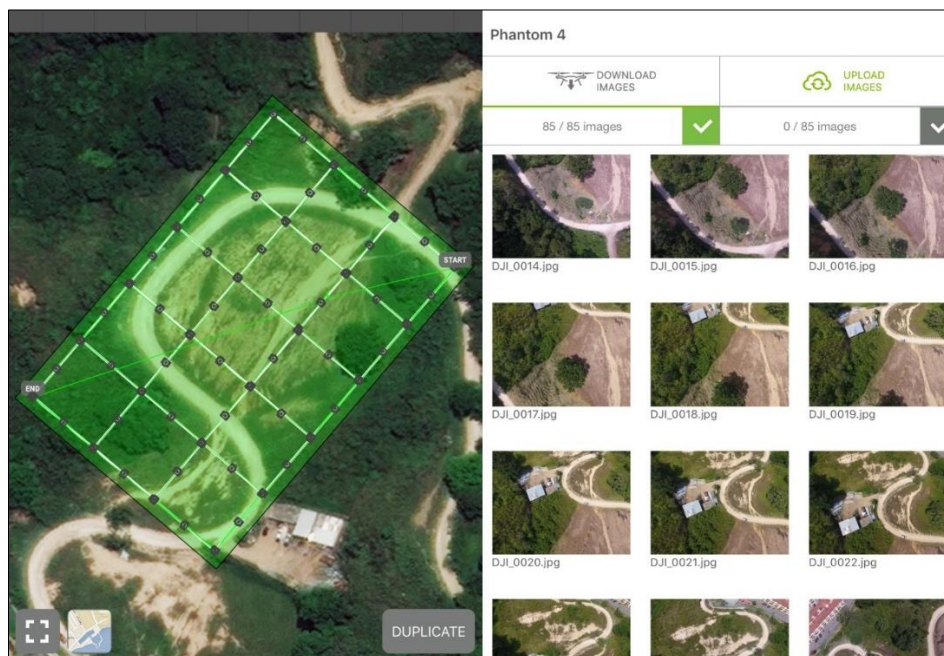


Ilustración 10. Captura de pantalla Aplicación *P1x4dcapture* para equipos móviles.

Fuente: Elaboración propia.

7. GENERACIÓN DEL MDE Y LA ORTOFOTO

Para la generación del modelo digital de elevaciones (MDE) y la ortofoto se utilizó el software PhotoScan de la casa Agisoft el cual es un software fotogramétrico independiente para la generación automática de nubes de puntos densa, texturizado, modelos poligonales, ortomosaicos georreferenciados a partir de imágenes fijas.

A continuación, se describe el flujo de trabajo utilizado para la generación de la autoimagen y el modelo digital de terreno a partir del cual se generaron las curvas de nivel.

7.1 AÑADIR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS ADQUIRIDAS EN EL VUELO PROGRAMADO.

Se cargan las 85 imágenes fijas obtenida a partir el vuelo en el menú *Flujo de trabajo / Añadir fotos*, estas se muestran en la ventana del modelo con la localización espacial obtenida del vehículo aéreo no tripulado (VANT).

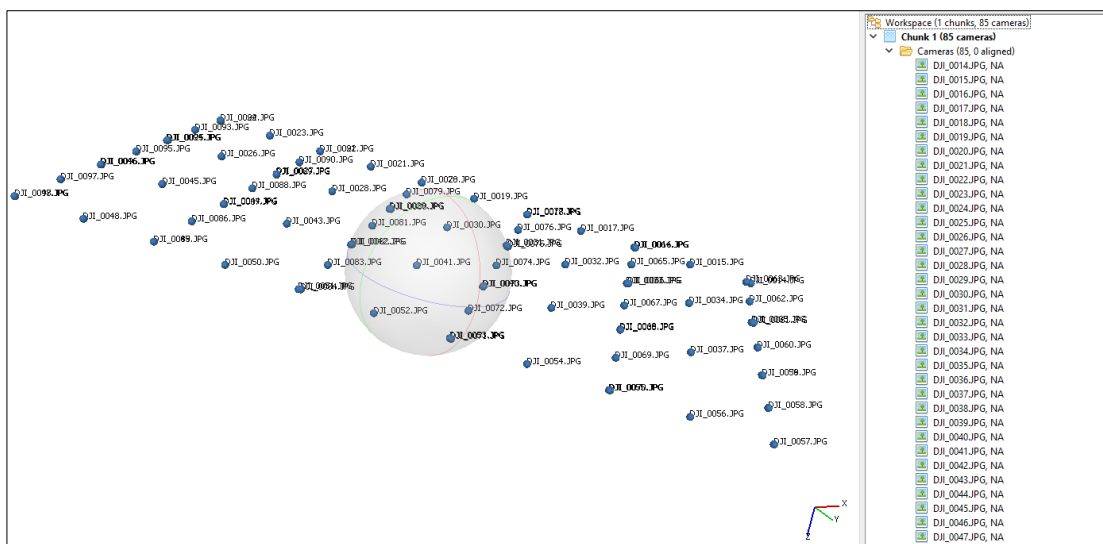


Ilustración 11. imágenes añadidas al software *PhotoScan* para su procesamiento.

Fuente: Elaboración propia.

7.2 ORIENTAR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS.

una vez cargadas las imágenes, estas se orientan usando la información posicional recopilada en cada foto por los instrumentos del VANT accediendo al menú *Flujo de trabajo / Alinear*, en la opción de “pre-procesar emparejamiento de imágenes” se debe escoger la opción “referencia”.

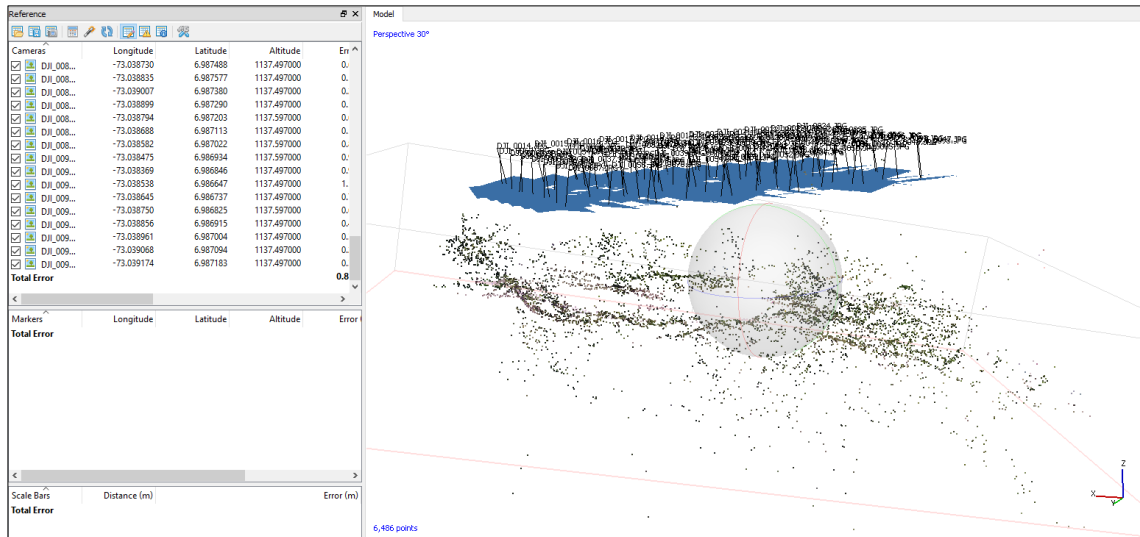


Ilustración 12. Orientación de las fotografías aéreas en *PhotoScan*.

Fuente: Elaboración propia

7.3 CREAR LA NUBE DE PUNTOS DENSA

Una vez orientadas las imágenes se crea la nube de puntos densa que es la base del modelo 3D, para esto se accede al menú *Flujo de trabajo / nube de puntos densa* en donde se escogió la opción de calidad “alta”, la creación de la nube de puntos densa es necesaria antes de calibrar el modelo con los puntos de control como se describe en los pasos posteriores.

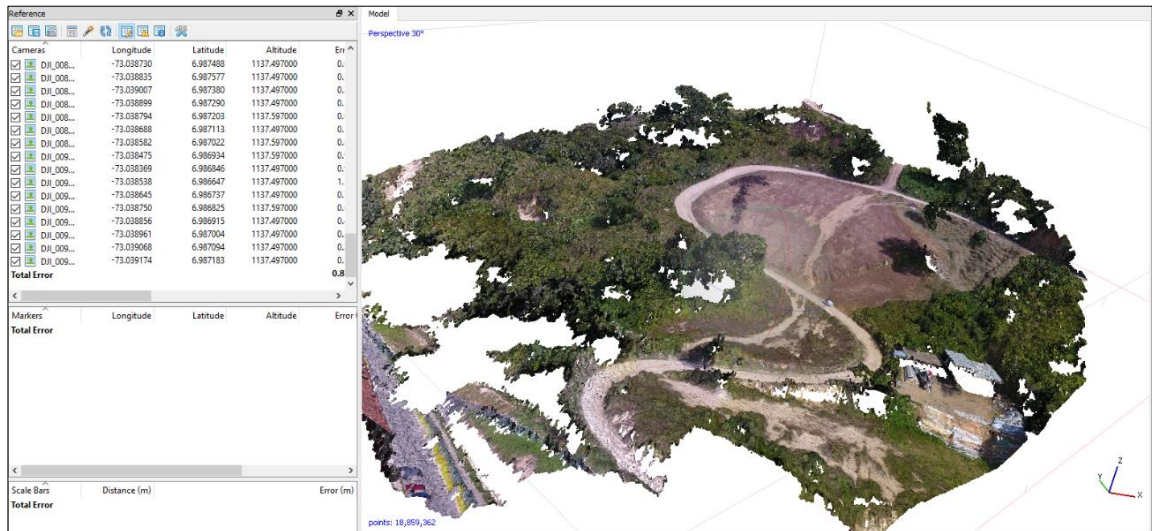


Ilustración 13. Nube de puntos densa a partir de Fotografías aéreas.

Fuente: Elaboración propia.

7.4 CALIBRAR EL MODELO CON LOS PUNTOS DE CONTROL

a continuación, se deben introducir los puntos de control (*Anexo 2. Puntos de control*) al software con el fin de medir el error entre las coordenadas del modelo generado en PhotoScan y el levantamiento topográfico, para esto se deben importar los puntos en formato .txt en el menú *Herramientas / importar/ importar marcadores*



Ilustración 4. Generación de puntos de control a partir del levantamiento topográfico con estación total.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se crea un marcador por cada punto de control es necesario calibrarlos con las marcas puestas en campo haciendo coincidir el centro de cada marca en la fotografía con cada marcador insertado, esto se debe hacer para cada marca y cada fotografía en donde esta esté presente.

Por ejemplo, para el punto de control número once (11) denominado “Estaca 11” existen Treinta y cuatro (34) fotografías donde es necesario realizar el procedimiento de calibración haciendo coincidir los marcadores creados con las coordenadas de campo y las marcas en las fotografías, el software indicará que este procedimiento fue realizado cuando en todas las fotografías del mosaico de imágenes aparezca una banderilla de color verde. Como se muestra en la *Ilustración 14*

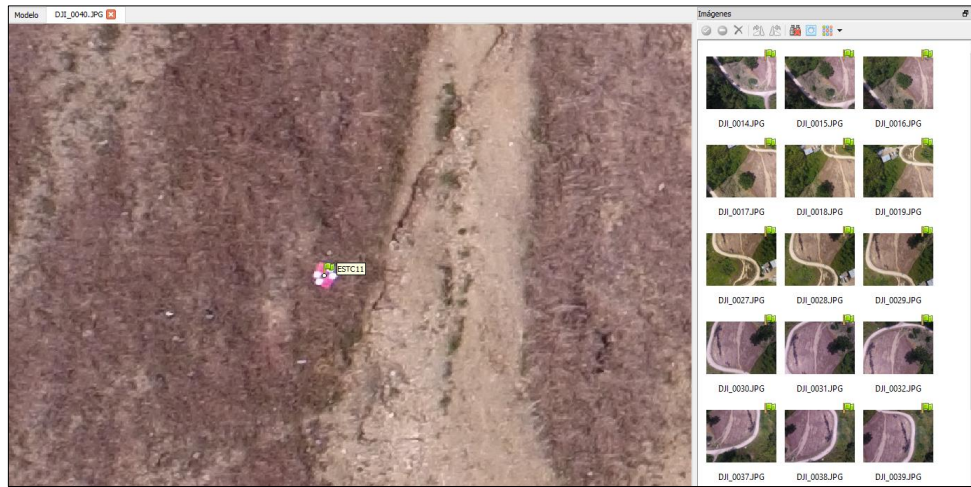


Ilustración 14. Calibración de los marcadores de los puntos de control con las marcas del terreno.

Fuente: Elaboración propia.

7.5 RE-ORIENTAR LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS CON BASE EN LOS PUNTOS DE CONTROL.

Una vez calibrado el modelo con los puntos de control, se vuelven a orientar las fotografías de manera genérica y en calidad alta con referencia a los puntos de control en el menú *Flujo de trabajo / Alinear*, en la opción de “pre-procesar emparejamiento de imágenes” se debe escoger la opción “Genérico”. Para esto se desactivan las imágenes en el panel de referencia y solo se dejan activados los marcadores

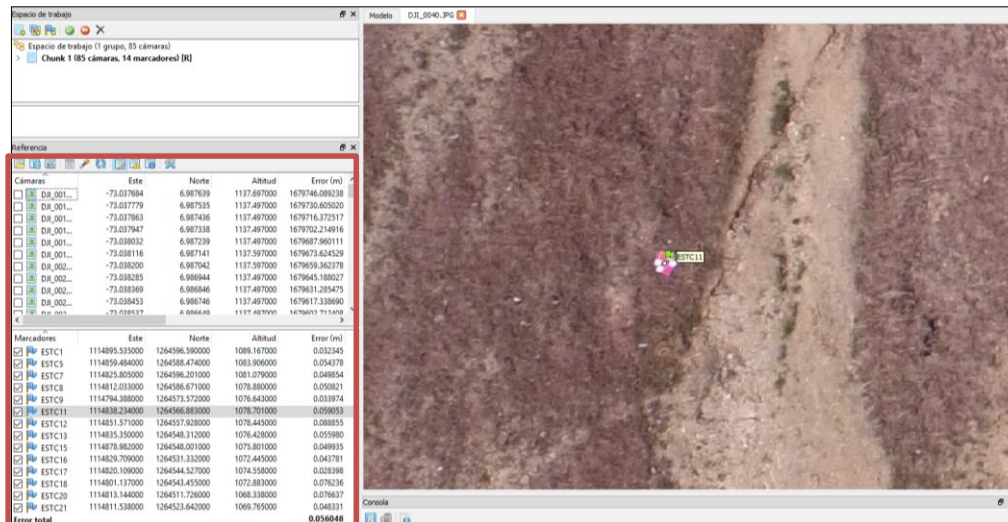


Ilustración 15. Re-orientación de las fotografías aéreas en PhotoScan con base en los puntos de control.

Fuente: Elaboración propia.

7.6 CREAR NUEVAMENTE LA NUBE DE PUNTOS DENSA

Una vez orientadas las imágenes con los puntos de control se crea nuevamente la nube de puntos densa en el menú *Flujo de trabajo / nube de puntos densa* en donde se escogió nuevamente la opción de calidad “alta” debido a que al aumentar la calidad a “Extra Alta” las características del equipo de cómputo utilizado no fueron suficientes para realizar el proceso.

7.7 CREAR LA MALLA DE TRIÁNGULOS INTERPOLADOS

Una vez obtenida la nube de puntos densa final se realiza la interpolación de estos para crear la malla de triángulos y posterior generación del Modelo digital de Terreno del cual se extraerán las curvas de nivel, para esto se accede al menú *Flujo de trabajo / Crear malla* se escogió el tipo de superficie “terreno”, Datos fuente: “Nube de puntos densa” y numero de caras: “Alta” con el fin de realizar una malla detallada.

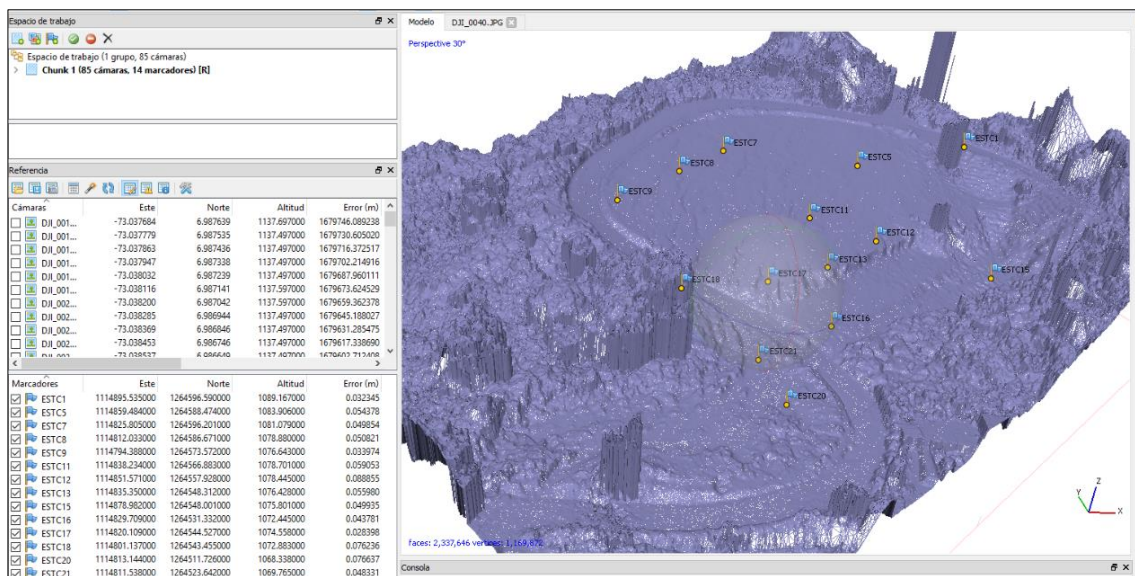


Ilustración 16. Creación de la malla de triángulos interpolados a partir de la nube de puntos densa.

Fuente: Elaboración propia.

Al visualizar la malla se observa que existe gran cantidad de “ruido” proveniente de la vegetación como árboles, arbustos y pastos altos que no son deseados en el modelo, por esta razón se debe ejecutar un filtro a los puntos del terreno con el fin de mejorar la posterior creación del MDE (modelo digital de elevaciones). Para esto se accede al menú *Herramientas / Nube de Puntos densa / Clasificar puntos de terreno* donde se tienen en cuenta parámetros como la pendiente y la distancia entre puntos de análisis, de esta forma se vuelve a generar la triangulación excluyendo los puntos filtrados obteniendo una malla más homogénea y real como se observa en *Ilustración 17*

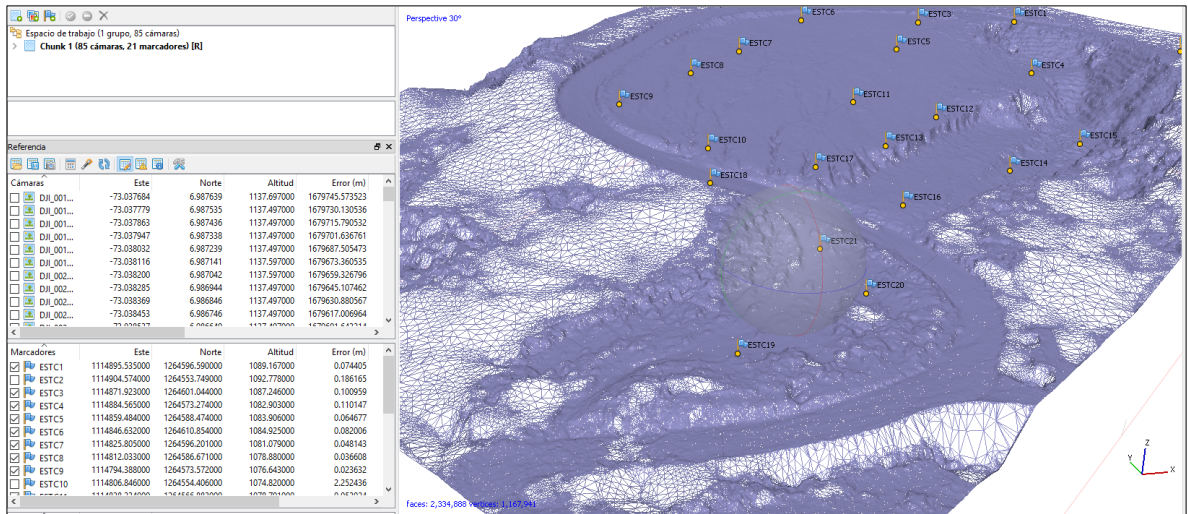


Ilustración 17. Creación de la malla de triángulos interpolados a partir de la nube de puntos densa.

Fuente: Elaboración propia.

7.8 TEXTURIZADO DEL MODELO

antes de crear la ortofoto se lleva a cabo un texturizado de la malla interpolada en el menú Flujo de trabajo / Crear textura.



Ilustración 18. Texturizado del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

7.9 GENERACIÓN DE LA ORTOFOTO

Para la generación de la ortofoto se accede al menú *Archivo / Exportar ortofoto / exportar imagen JPEG/TIFF/PNG* en donde se define el sistema de coordenadas y el formato deseado para la imagen que en este caso es .tif

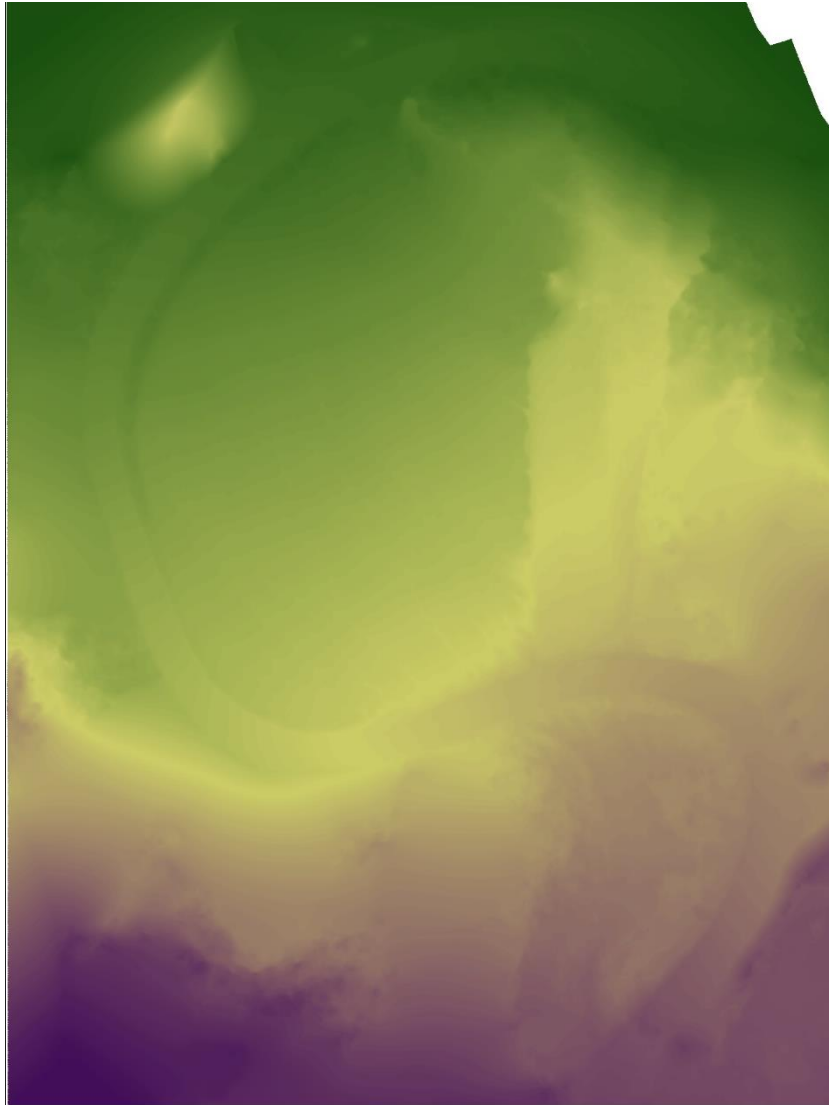


Ilustración 19. Generación de la ortofoto del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

7.10 GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)

Por último, se genera el modelo digital de elevaciones accediendo al menú *Archivo / Exportar DEM / exportar TIF/BILI/XYZ* en donde se define el sistema de coordenadas y el formato deseado para la imagen que en este caso es .tif (Ver anexo 8. Raster de elevaciones)



Elevaciones

Cota

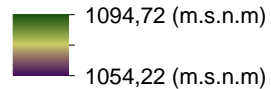


Ilustración 20. Modelo digital de elevaciones (DEM) obtenido.

Fuente: Elaboración propia.

8. EXTRACCIÓN DE CURVAS DE NIVEL A PARTIR DEL MDE Y DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.

Una vez obtenido el MDE en formato raster, es posible extraer las curvas de nivel, en este caso se utilizó la aplicación ArcMap del software ArcGis de la casa ESRI. En la *Ilustración 21* y la *Ilustración 22* se muestran las curvas de nivel obtenidas tanto con el levantamiento topográfico como con el MDE adicionalmente en el anexo 9 se pueden verificar los planos de las plantas y perfiles topográficos con el fin de evaluar cualitativamente los resultados obtenidos.

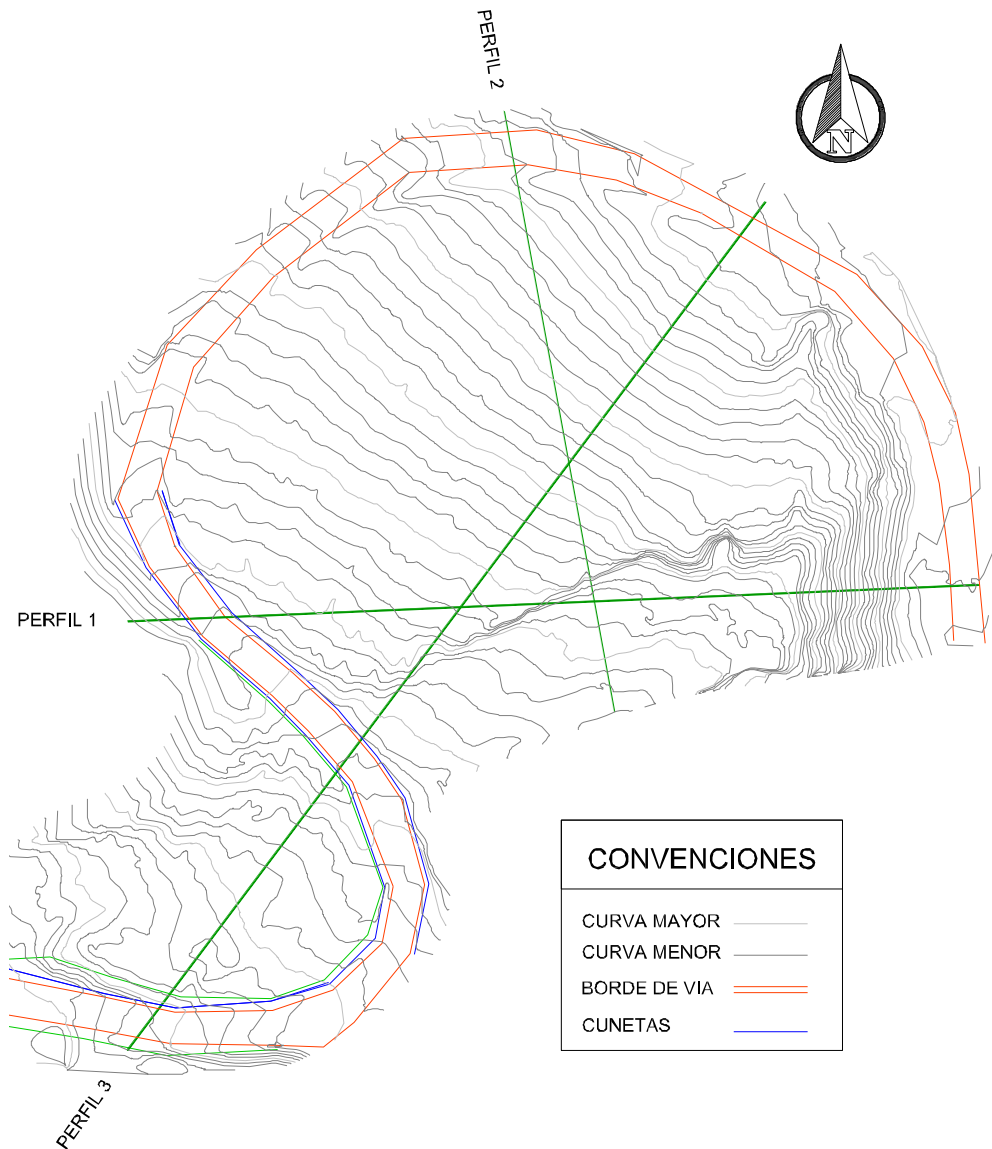


Ilustración 21. Curvas de nivel extraídas a partir del (DEM) obtenido.

Fuente: Elaboración propia.

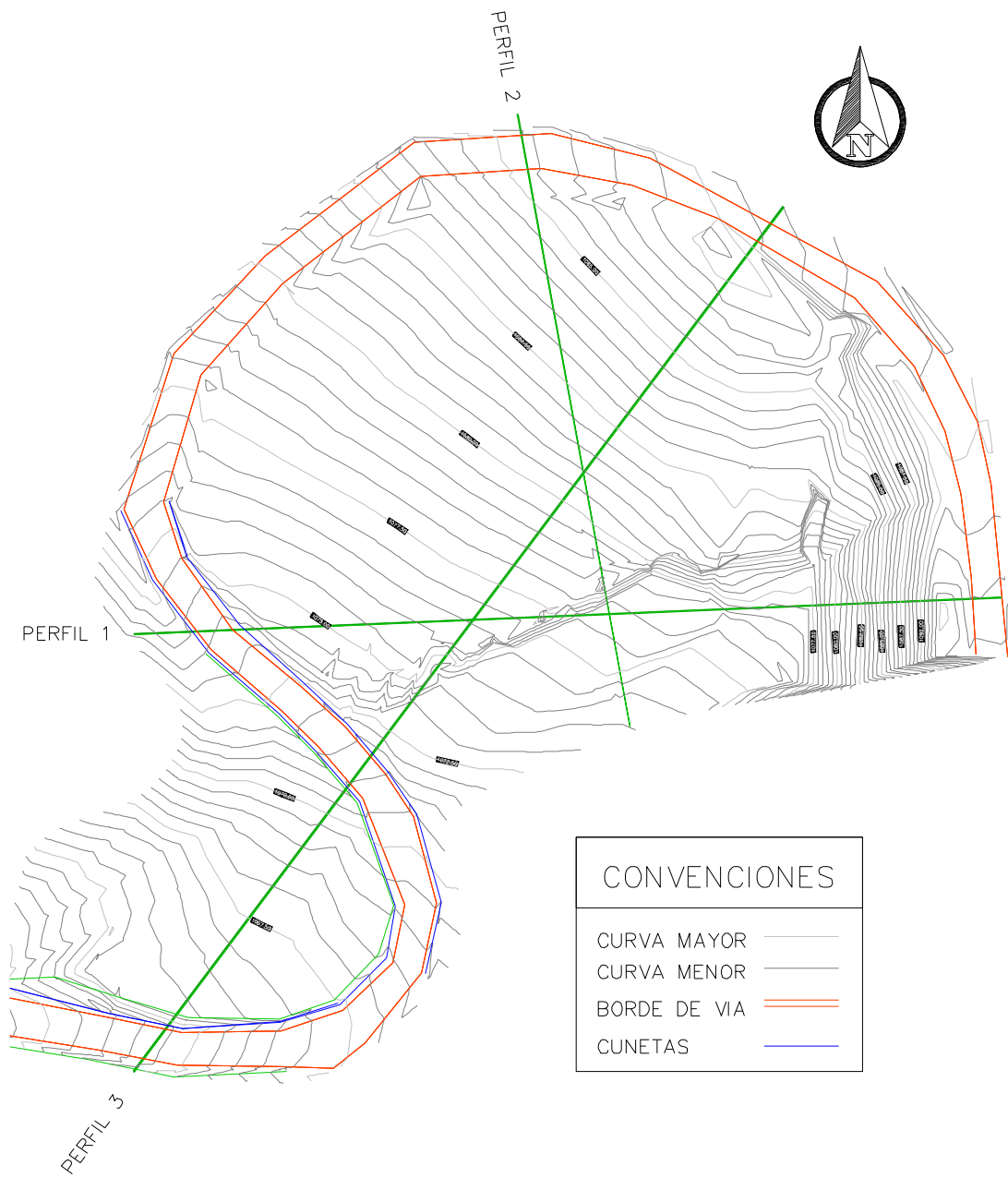


Ilustración 22. Curvas de nivel obtenidas a partir del levantamiento topográfico realizado.

Fuente: Elaboración propia.

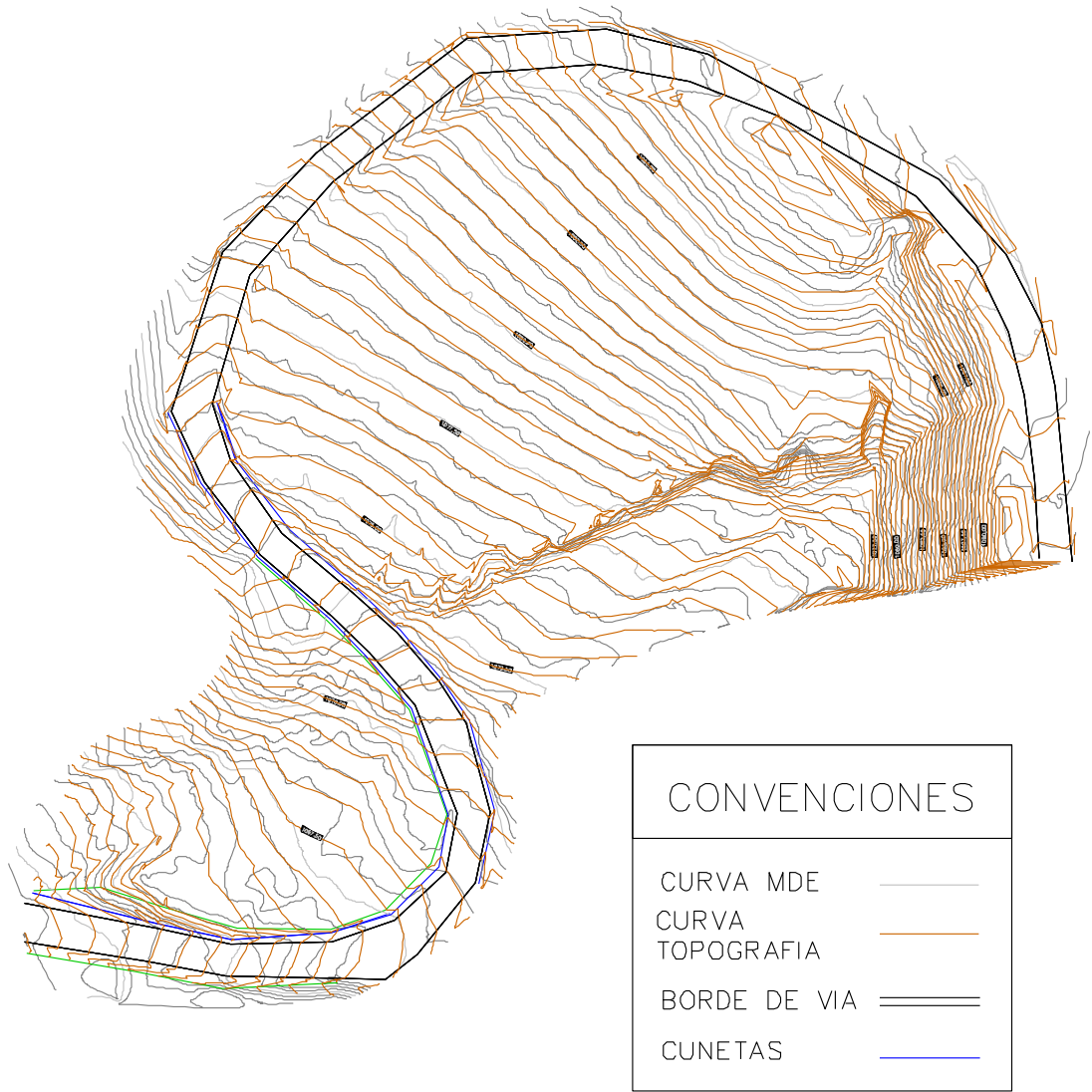


Ilustración 23. Superposición de curvas de nivel obtenidas del DEM y levantamiento topográfico.

Fuente: Elaboración propia.

9. RESULTADO DE ERRORES EN LOS PUNTOS DE CONTROL

Una vez terminado el proceso en el software fotogramétrico es posible obtener el error en las componentes X, Y y Z como resultado de la comparación de las coordenadas del levantamiento topográfico y las obtenidas en el MDE, para esto accedemos al informe de PhotoScan que proporciona dicha información (ver Anexo 3.) tabulada a continuación.

PUNTO	ERROR ESTE [m]	ERROR NORTE [m]	ERROR COTA [m]	ERROR	ERROR [PIXEL]
ESTC1	0,048	0,032	-0,047	0,074	1,443
ESTC3	-0,086	-0,018	0,050	0,101	4,521
ESTC4	0,103	-0,026	-0,030	0,110	4,487
ESTC5	-0,053	-0,034	-0,013	0,065	3,460
ESTC6	-0,028	-0,073	0,024	0,082	1,664
ESTC7	-0,029	-0,038	-0,005	0,048	2,168
ESTC8	0,029	-0,007	-0,021	0,037	2,178
ESTC9	0,014	-0,018	0,006	0,024	1,823
ESTC11	-0,032	0,041	0,011	0,053	4,182
ESTC12	-0,017	0,064	-0,005	0,066	1,572
ESTC13	0,039	0,038	-0,032	0,063	3,644
ESTC14	0,068	0,038	0,157	0,175	2,993
ESTC15	0,053	-0,016	-0,024	0,060	1,677
ESTC16	0,023	-0,006	0,002	0,024	3,359
ESTC17	0,008	-0,021	-0,061	0,065	1,468
ESTC18	-0,013	-0,009	0,009	0,018	2,190
ESTC19	-0,062	0,037	0,071	0,101	4,329
ESTC20	-0,048	0,016	-0,028	0,057	1,878
ESTC21	-0,015	0,001	-0,070	0,071	1,868
TOTAL	0,048	0,034	0,050	0,077	2,835
Resolución	0,056	m/pixel			

Tabla 2. Errores obtenidos para las componentes X, Y y Z de cada uno de los puntos de control.

Fuente: Elaboración propia.

10. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

10.1 ESTIMACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL

10.1.1 Resultados del test NMAS.

TEST NMAS PLANIMETRÍA							
DATOS > ERROR ADMISIBLE						TEST NMAS	
ESCALA		ERROR ADMISIBLE [m]	COORD. ESTE	CUMPLE	COORD. NORTE	CUMPLE	CUMPLE ESTE Y NORTE
1	100	0,0508	31,58%	NO	10,53%	NO	NO
1	200	0,1016	5,26%	SI	0,00%	SI	SI
1	250	0,1270	0,00%	SI	0,00%	SI	SI
1	500	0,2540	0,00%	SI	0,00%	SI	SI
1	1000	0,5080	0,00%	SI	0,00%	SI	SI
1	2000	1,0160	0,00%	SI	0,00%	SI	SI
1	5000	2,5400	0,00%	SI	0,00%	SI	SI

Tabla 3. Resultados del Test NMAS para las componentes XY

Fuente: Elaboración Propia.

TEST NMAS ALTIMETRÍA				
		DATOS > ERROR ADMISIBLE		
ESCALA		ERROR ADMISIBLE [m]	COORD. Z	CUMPLE
1	100	0,05	31,58%	NO
1	200	0,10	5,26%	SI
1	250	0,13	0,00%	SI
1	500	0,25	0,00%	SI
1	1.000	0,50	0,00%	SI
1	2.000	1,00	0,00%	SI
1	5.000	2,50	0,00%	SI

Tabla 4. Resultados del test NMAS para la componente Z

Fuente: Elaboración Propia.

para los datos de errores obtenidos en el proceso de producción cartográfica se puede identificar que el estándar NMAS cumple para escalas mayores a 1:200 tanto para la componente planimétrica como altimétrica.

los resultados obtenidos del análisis del test NMAS para la componente planimétrica y altimétrica se muestran en la *Tabla 3* y *Tabla 4* respectivamente, las memorias de cálculo pueden ser revisadas en el *Anexo 4. Memorias de Cálculo de calidad posicional.*

10.1.2 Resultados test EMAS.

TEST EMAS PARA LAS COMPONENTE X,Y y Z				
ESCALA	COMPONENTE X	COMPONENTE Y	COMPONENTE Z	
1 100	NO CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE	
1 200	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	
1 250	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	
1 500	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	
1 1.000	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	
1 2.000	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	
1 5.000	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	<i>CUMPLE</i>	

Tabla 5. Resultados del Test EMAS para las componentes X, Y y Z

Fuente: Elaboración Propia.

para los datos de errores obtenidos en el proceso de producción cartográfica se puede identificar que el estándar EMAS cumple para escalas mayores a 1:200 para las tres componentes X.Y y Z.

los resultados obtenidos del análisis del test EMAS para las componentes X, Y y Z muestran en la *Tabla 5*, las memorias de cálculo pueden ser revisadas en el *Anexo 4. Memorias de Cálculo de calidad posicional.*

El límite de error aceptable o varianza máxima que se utilizó fue el sugerido por Atkinson Gordo (2005) “(...) 0.2 mm de percepción visual a la escala del mapa, incrementados aproximadamente un 25% (...)”

10.1.3 Resultados test ASPRS

	X	Y	Z
RMSE	0,048	0,034	0,050

Tabla 6. Límites del RMS calculados para los datos obtenidos

Fuente: Atkinson Gordo, 2005.

ESCALA	LIMITE RMSE (m)
1:50	0,0125
1:100	0,025
1:200	0,050
1:500	0,125
1:1.000	0,25
1:2.000	0,50
1:4.000	1,00
1:5.000	1,25
1:10.000	2,50
1:20.000	5,00

Tabla 7. Límites del RMS de componentes X o Y para la Clase I

Fuente: Atkinson Gordo, 2005.

		CLASE ASPRS		
ESCALA		X	Y	Z
1	100	//	//	///
1	200	/	/	//
1	500	/	/	/
1	1000	/	/	/
1	2.000	/	/	/
1	5.000	/	/	/
1	10.000	/	/	/
1	20.000	/	/	/

Tabla 8. Resultados del test ASPRS para las componentes X, Y y Z

Fuente: Elaboración Propia.

para escalas mayores a 1:200 los valores del error cuadrático medio se clasifican como *Clase I* siendo esta la más precisa tanto para las componentes horizontales como la componente vertical.

los resultados obtenidos del análisis del test ASPRS para las componentes X, Y y Z muestran en la *Tabla 8*, las memorias de cálculo pueden ser revisadas en el *Anexo 4. Memorias de Cálculo de calidad posicional*.

10.1.4 Resultados test USGS

TEST USGS COMPONENTE Z				
CATEGORÍA DEL MDT				
ESCALA		NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
1	100	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	200	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	250	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	500	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	1000	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	2000	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
1	5000	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE

Tabla 9. Resultados del test USGS, categoría de exactitud del el MDT para la componente Z

Fuente: Elaboración Propia.

El estándar cumple para escalas mayores o iguales a 1:100 en todas las categorías de exactitud del MDT siendo el la CLASE I la más precisa, esto para la componente vertical Z.

Los resultados obtenidos del análisis del test USGS para las componentes Z se muestran en la *Tabla 9*, las memorias de cálculo pueden ser revisadas en el *Anexo 4. Memorias de Cálculo de calidad posicional*.

10.1.5 Resultados NSSDA

	X	Y	Z
RMSE	0,048	0,034	0,050

Tabla 10. Límites del RMS calculados para los datos obtenidos

Fuente: Atkinson Gordo, 2005.

La exactitud obtenida para las componentes Horizontal y vertical fue;

Exactitud r = 100 mm

Exactitud z = 100 mm

Tipo de mapa	Escala	Exactitud horizontal	Exactitud vertical	Eq. curvas de nivel
Construcción en general (planos topográficos de detalle)	1/500	100 mm	50 mm	250 mm
Planos de situación de zonas recreativas (campos de golf, campos de atletismo ..)	1/1.000	500 mm	100 mm	500 mm
Planos de Administración (diseño de interiores/exteriores)	1/250	50 mm	N/P	N/P
Planeamiento general de mapas de localización (antenas AM/FM, SIG)	1/5.000	1.000 mm	1.000 mm	1.000 mm
Planos de movimiento de tierras (carreteras, drenajes, bordillos, ...)	1/500	250 mm	100 mm	500 mm
Mapas de los servicios de emergencias/SIG	1/10.000	25.000 mm	N/P	N/P
Mapas de suelos contaminados / Modelización	1/500	1.000 mm	500 mm	500 mm

Ilustración 24. Ejemplos de Exactitud aconsejable en función del tipo de mapa

Fuente: Atkinson Gordo (2005).

La exactitud obtenida tanto para la componente horizontal como vertical fue de 100 mm, sin embargo la calidad de la exactitud obtenida tienen un carácter subjetivo a la entidad que desee utilizar el producto cartográfico dependiendo del uso que se le vaya dar, sin embargo a modo de ejemplo en la *Ilustración 24* se acepta un error de 100 mm para planos de construcción general a escala 1:500.

Las memorias de cálculo pueden ser revisadas en el *Anexo 4. Memorias de Cálculo de calidad posicional*.

11. CONCLUSIONES

- La metodología empleada en el presente proyecto alcanzó satisfactoriamente la construcción de un modelo digital de terreno mediante el uso del software fotogramétrico *AgiSoft PhotoScan* logrando una resolución para el modelo digital de elevaciones (MDE) de 0.055m/Pixel
- En general los diversos test estadísticos utilizados aceptan la muestra de datos obtenidos para escalas de trabajo mayores o iguales a 1:200 lo que valida el producto fotogramétrico obtenido mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) comparado con la fuente de mayor exactitud (FME) que para este caso es el levantamiento topográfico con estación total.
- El efecto de la vegetación, así como elementos que no son propios del terreno son influyentes y limitantes a la hora de generar el producto cartográfico en el software fotogramétrico, aunque existe la posibilidad de aplicar filtros para identificar los puntos de terreno, estos podrían no resultar suficientes.
- De acuerdo con lo observado en el reconocimiento de campo, se pudo concluir que la topografía adquirida con el vehículo aéreo no tripulado proporcionó en general un mejor detalle de la forma del terreno en donde se identificaron procesos morfo-dinámicos como surcos y terracetos.
- Se debe tener en cuenta que el producto cartográfico obtenido mediante el vuelo fotogramétrico se validó sobre los puntos de control y es posible que existan diferencias significativas en zonas puntuales como consecuencia del proceso realizado.
- Aunque la evaluación de la relación costo/beneficio no hace parte del presente proyecto se pudo identificar que los tiempos del proceso fotogramétrico son más cortos que en los levantamientos de campo, de igual forma la mano de obra se disminuye lo que puede resultar en una disminución en los costos.

11.1 RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados de exactitud obtenidos se recomienda utilizar el producto obtenido con la metodología planteada para actividades que no sean propias topografías a detalle cómo pueden ser estudios de prefactibilidad, reconocimiento del terreno o atención de emergencias.

12. BIBLIOGRAFÍA

Galván Rangel, J. M. (2017). Control posicional estadístico de productos fotogramétricos de la explotación minera de La Parrilla (Bachelor's thesis).

Atkinson-Gordo, A. D. J. (2008). Control de calidad posicional en cartografía: análisis de los principales estándares y propuesta de mejora. Jaén: Universidad de Jaén.

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.

Agisoft Photoscan. 2018. Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.3 (with Ground Control Points). Recuperado de [http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20\(without%20GCPs\).pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(without%20GCPs).pdf)

Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-González, P., & Mancera-Taboada, J. (2015). Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications. *Archaeometry*, 57(1), 128-145. Sanchis Sobrino

Sobrino, J. A. S. (2010). INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA.

13. LISTA DE ANEXOS

13.1 ANEXO 1. PUNTOS LEVANTAMIENTO

13.2 ANEXO 2. PUNTOS DE CONTROL

13.3 ANEXO 3. INFORME DE AGISOFT PHOTOSCAN

13.4 ANEXO 4. MEMORIAS DE CALCULO DE CALIDAD POSICIONAL

13.5 ANEXO 5. MODELO AGISOFT PHOTOSCAN

13.6 ANEXO 6. MANUAL DE USUARIO DJI PHANTOM 4

13.7 ANEXO 7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTACIÓN TOTAL

13.8 ANEXO 8. RASTER DE ELEVACIONES

13.9 ANEXO 9. PLANOS

(ver carpeta de Anexos)