

**Uso de fotogrametría como metodología alterna para monitoreo de movimiento de tierra en
obra civil**

Wilmer José Grimaldos Villamizar

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director

Julián André Galvis Flórez

MsC. Ingeniero Civil

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Nota de aceptación:

Firma Presidente del Jurado

Firma Jurado N°1

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Enero de 2021

A mis padres, a mi hermano y a mi esposa por el apoyo incondicional a lo largo de este camino y de manera especial a mi hija María Salomé Grimaldos Muñoz; es por ustedes y para ustedes.

Agradecimientos

A todos los docentes que contribuyeron a mi desarrollo académico y personal durante mi formación profesional.

Al MsC. Ricardo Pico Vargas y la MsC. Luz Marina Torrado Gómez, por su colaboración y consejo durante este proyecto.

A mi director de proyecto, MsC. Julián André Galvis Flórez por haberme guiado, no solo durante el proceso de este proyecto, sino a lo largo de mi carrera universitaria brindándome siempre el apoyo necesario para desarrollarme profesionalmente.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Objetivos	3
1.1 Objetivo General	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2. Marco Teórico.....	4
2.1 Historia de la fotogrametría.....	4
2.2 Fotogrametría	6
2.3 Elementos fundamentales en fotogrametría	7
2.3.1 Escala de la fotografía	7
2.3.2 Distancia Focal	8
2.3.3 Altura de vuelo	8
2.4 Visión estereoscópica. paralaje	9
2.5 Clasificación de la fotogrametría	9
2.5.1 Según el tipo de fotografía (Quiros Rosado, s.f.)	10
2.5.2 Según el tipo de tratamiento (Quiros Rosado, s.f.).....	10
2.6 Ventajas y desventajas de la fotogrametría respecto a la topografía clásica (Quiros Rosado, s.f.).....	11
2.6.1 Ventajas	11

2.6.2 Desventajas	11
2.7 Aplicaciones de la fotogrametría en ingeniería civil (Quiros Rosado, s.f.)	11
2.7.1 Vías:	12
2.7.2 Planificación territorial	12
2.7.3 Hidrografía.....	12
2.7.4 Control en obras civiles	12
2.8 Dron (Santos Clavero, 2014).....	12
2.8.1 Equipos radio controlados	13
2.8.2 Vehículo aéreo no tripulado (UAV)	13
2.9 Tipos de vuelo (Santamaria Peña & Saenz Mendez, 2011)	13
2.9.1 Vuelo Nadiral	13
2.9.2 Vuelo Vertical.....	14
2.9.3 Vuelo Inclinado	14
2.10 Proceso fotogramétrico digital	15
2.10.1 Orientación interna	15
2.10.2 Orientación relativa	16
2.10.3 Orientación absoluta.....	16
2.10.4 Puntos de apoyo.....	16
2.10.5 Orientación exterior (relativa y absoluta en un solo paso)	17
2.11 Modelo digital de terreno	17
2.11.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)	17
2.11.2 Modelo Digital de Superficie (MDS)	18
3. Metodología	19

3.1 Fase I: Visita técnica para reconocimiento de la obra.....	22
3.2 Fase 2: Materialización de puntos de apoyo	23
3.3 Fase 3: Georreferenciación de puntos de apoyo.....	31
3.3.1. Proceso de campo	31
3.3.2. Proceso en oficina.....	37
3.4 Fase 4: Programación y ejecución de vuelos fotogramétricos	43
3.4.1 Causas de afectación durante la ejecución de los vuelos fotogramétricos	48
3.5 Fase 5: Procesamiento de información (trabajo de oficina).....	51
3.5.1 Procesamiento Fotogramétrico	51
3.5.2 Calculo de volúmenes.....	77
4. Resultados y Discusión	87
5. Conclusiones y Recomendaciones	91
Referencias Bibliográficas	93
Apéndices.....	95

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas del proyecto.....	19
Tabla 2. Tiempo de rastreo para los puntos de control.....	36
Tabla 3. Vuelos de control ejecutados	47
Tabla 4. Relación de superficies para el cálculo de volumen.....	81
Tabla 5. Registro histórico de movimiento de tierra.....	85

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Primer cuadricóptero construido	5
Figura 2. Fotogrametría Aérea	7
Figura 3. Altitud de vuelo sobre el nivel del mar	8
Figura 4. Principio estereoscópico de la fotogrametría	9
Figura 5. Tipos de vuelo	14
Figura 6. Fases del proceso fotogramétrico digital	15
Figura 7. Localización general del proyecto	20
Figura 8. Proyecto Altos del Bosque	23
Figura 9. Localización de puntos de control (GCP)	24
Figura 10. Proceso de excavación.....	25
Figura 11. Preparación de formaletas	25
Figura 12. Disposición y nivelación de formaletas.....	26
Figura 13. Preparación de la mezcla de concreto	27
Figura 14. Refuerzo de acero - ¼”.....	28
Figura 15. Colocación y terminación del concreto para los puntos de control.....	29
Figura 16. Placa de identificación para punto de control.....	30
Figura 17. Punto de control terminado en campo	31
Figura 18. Condiciones óptimas para el rastreo de GPS.....	32

Figura 19. Triangulación entre estaciones activas del IGAC y puntos de control del proyecto...	34
Figura 20. Tiempo de rastreo con equipo GNSS –Topcon Hiper V	36
Figura 21. Geoportal -IGAC	38
Figura 22. Datos Rinex para estaciones permanentes.....	39
Figura 23. Conversión de coordenadas con Magna Sirgas Pro 4.2	40
Figura 24. Sistema de referencia.....	41
Figura 25. Creación de archivo en MAGNET Tools.....	41
Figura 26. Datos de estaciones permanentes y puntos de control.....	42
Figura 27. Polígono de vuelo	44
Figura 28. Creación de plan de vuelo	45
Figura 29. Vuelo en ejecución con Pix4D Capture.....	46
Figura 30. Phantom 4 Pro - DJI	48
Figura 31. Línea de alta tensión existente.....	49
Figura 32. Carga de Fotografías al Pix4D Mapper	52
Figura 33. Propiedades de fotografías y cámara.....	53
Figura 34. Ángulos de rotación de la cámara	54
Figura 35. Selección de sistema de coordenadas de salida.....	55
Figura 36. Selección de plantilla de trabajo.....	56
Figura 37. Coordenadas de puntos de control (GCP)	57
Figura 38. Carga de GCP's	58
Figura 39. Asociación de GCP a imágenes.....	59
Figura 40. Imágenes y GCP's cargados	60
Figura 41. Configuración de la pestaña “General” de la etapa No.1	62

Figura 42. Configuración de la pestaña “Emparejamiento” de la etapa No.1	63
Figura 43. Configuración de la pestaña “Calibración” de la etapa No.1	64
Figura 44. Resultados de la fase No. 1.....	67
Figura 45. Configuración de la pestaña “Nube de puntos” de la etapa No.2.....	70
Figura 46. Configuración de la pestaña “Malla 3D con textura” de la etapa No.2.....	71
Figura 47. Identificación de nube de punto dispersa y densificada	72
Figura 48. Clasificación y edición de la nube de puntos	73
Figura 49. Configuración de la pestaña “MDS y Ortomosaico” de la etapa No.3	75
Figura 50. Configuración de la pestaña “Resultados Adicionales” de la etapa No.3	76
Figura 51. Carga de curvas de nivel con polígono de trabajo.....	78
Figura 52. Edición de la superficie creada.....	79
Figura 53. Superficie sobrepuesta en ortoimagen.....	80
Figura 54. Superficie obtenida para cálculos de volumen	80
Figura 55. Cálculo de volumen por sobre-posición de superficies.....	82
Figura 56. Sobre-posición de superficie No 1 - No. 11	83
Figura 57. Área de relleno entre superficie No.1 - No.11.....	83
Figura 58. Informe de cálculo de volumen generado por AutoCAD Civil 3D.....	84
Figura 59. Planta Ortoimagen - superficie vuelo No. 1	86
Figura 60. Movimiento de tierra ejecutado entre vuelos de control	88
Figura 61. Comparación de avance Ortoimagen Vuelo No. 1 – Vuelo No. 11	90

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice 1. Informe post-proceso GPS 1 – GPS 2	
Apéndice 2. Informe post-proceso GPS 3 – GPS 4 – GPS 5	
Apéndice 3. Ficha técnica GPS – 1	
Apéndice 4. Ficha técnica GPS – 2	
Apéndice 5. Ficha técnica GPS – 3	
Apéndice 6. Ficha técnica GPS – 4	
Apéndice 7. Ficha técnica GPS – 5	
Apéndice 8. Informe de calidad – Fotogrametría vuelo No. 11	
Apéndice 9. Cálculo de volumen Vuelo No. 1 – Vuelo No. 2	
Apéndice 10. Cálculo de volumen Vuelo No. 2 – Vuelo No. 3	
Apéndice 11. Cálculo de volumen Vuelo No. 3 – Vuelo No. 4	
Apéndice 12. Cálculo de volumen Vuelo No. 4 – Vuelo No. 5	
Apéndice 13. Cálculo de volumen Vuelo No. 5 – Vuelo No. 6	
Apéndice 14. Cálculo de volumen Vuelo No. 6 – Vuelo No. 7	
Apéndice 15. Cálculo de volumen Vuelo No. 7 – Vuelo No. 8	
Apéndice 16. Cálculo de volumen Vuelo No. 8 – Vuelo No. 9	
Apéndice 17. Cálculo de volumen Vuelo No. 9 – Vuelo No. 10	
Apéndice 18. Cálculo de volumen Vuelo No. 10 – Vuelo No. 11	

Apéndice 19. Cálculo de volumen Vuelo No. 1 – Vuelo No. 11

Apéndice 20. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 1

Apéndice 21. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 2

Apéndice 22. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 3

Apéndice 23. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 4

Apéndice 24. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 5

Apéndice 25. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 6

Apéndice 26. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 7

Apéndice 27. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 8

Apéndice 28. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 9

Apéndice 29. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 10

Apéndice 30. Plano Ortoimagen – Superficie vuelo No. 11

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

ITULO: USO DE FOTOGRAMETRÍA COMO METODOLOGÍA ALTERNA PARAMONITOREO DE MOVIMIENTO DE TIERRA EN OBRA CIVIL

AUTOR(ES): WILMER JOSÉ GRIMALDOS VILLAMIZAR

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): MsC. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

RESUMEN

La tecnología es una línea esencial en el campo de la ingeniería civil que permite la modernización de procesos con el fin de optimizar tiempo y recursos a la vez que se aumenta el rendimiento garantizando una buena calidad en los resultados alcanzados. La fotogrametría es el ejemplo perfecto de cómo los diversos y accesibles avances tecnológicos facilitan la posibilidad de implementar esta técnica no invasiva sobre la cual precisamente se radica el objetivo del presente trabajo. Este proyecto tiene como objetivo evaluar la aplicación de la fotogrametría como metodología alterna para el control de obras civiles, con el fin de explorar una de las técnicas de trabajo que más fuerza ha tomado en diversos sectores de la construcción; para ello se llevó a cabo un control de obra en su fase de movimiento de tierra durante un periodo de tres (3) meses, en los cuales se realizaron vuelos fotogramétricos cada cierto tiempo, procesando los datos para la obtención de modelos digitales que derivan en la ortoimagen y la superficie de nivel sobre las cuales se pudo estudiar avance y volúmenes de corte - relleno de tierra ejecutado durante el tiempo dado entre cada vuelo de control; de esta manera y por medio de sobreposición de las superficies generadas se obtuvo un cálculo total de corte durante este periodo de 65677,17 m³ y de relleno de 66324,76 m³. Se puede concluir que el uso de fotogrametría como método alterno de seguimiento de obra es una opción viable para etapas tales como prefactibilidad, factibilidad y seguimiento, en donde se desee monitorear a grandes rasgos un determinado proceso.

PALABRAS CLAVE:

Fotogrametría, Modelo Digital, Monitoreo, Avance de obra, Superficie de nivel.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: USING PHOTOGRAMMETRY AS AN ALTERNATE METHODOLOGY FOR EARTHMOVEMENT MONITORING IN CIVIL WORKS.

AUTHOR(S): WILMER JOSÉ GRIMALDOS VILLAMIZAR

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: MsC. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

ABSTRACT

Technology is an essential line in the civil engineering field, it facilitates the modernization of processes in order to optimize time and resources while increasing performance, and guaranteeing good quality in results. Photogrammetry is a perfect example of the several current technological advances with easy accessibility that open up a possibility of implementing a non-invasive technique. The latter is precisely the premise upon which this work is based. This thesis aims at evaluating the application of photogrammetry as an alternative methodology to control civil works, and explore this work technique techniques that has gained great impact in various sectors of construction due to its organization and stages. First, a civil work control was carried out in its earth movement phase during a period of three (3) months, during this stage, photogrammetric flights were made at organized times, processing the data to obtain digital models that would lead to the orthoimage and the level surface on which the advance assessment and cut volumes could be studied – parallelly, land fill was executed between each control flight; In this way, and by means of superposition of the generated surfaces, a total cut calculation of 65677.17 m³ and a fill of 66324.76 m³ was obtained during the time period. In brief, the use of photogrammetry as an alternative method of monitoring a civil work is a viable option for stages such as pre-feasibility study, feasibility and monitoring, and where a broad study and monitor of a civil work might be desired.

KEYWORDS:

Photogrammetry, Digital Model, Monitoring, Work progress, surface Level.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En el campo de la ingeniería civil la tecnología juega un papel fundamental para el progreso de todas sus fases, ya que permite evaluar aspectos y establecer factores determinantes en el adecuado desarrollo de procesos, apoyándonos desde la captura de datos, tratamiento y generación de resultados en diseños, programación, planeación, ejecución y vida útil del proyecto. Dentro de esta línea tecnológica se encuentra el uso de sistemas de aeronave pilotada remotamente (RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems), los cuales brindan la posibilidad de realizar vuelos de inspección, reconocimiento y registro de un área determinada, hasta llegar a la obtención de imágenes para un procesamiento que permite llevar fotografías 2D a la creación de modelos digitales de tal forma que se pueda estudiar un espacio sin necesidad de interactuar con él, sino a partir de sus imágenes (Nuñez Muñoz, 2019). Esta es una de las razones por las que vale la pena realizar un análisis de esta técnica como metodología alterna al control y seguimiento de proyectos, para lo que se plantea un estudio desde lo histórico, lo conceptual y lo práctico que permita determinar su viabilidad como método de trabajo.

La Fotogrametría bajo el concepto de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS), es la ciencia de efectuar mediciones e interpretaciones fiables mediante las fotografías, para de esa forma conocer características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado. Por otra parte, la sociedad americana de fotogrametría y sensores remotos (ASPRS), sustenta a la Fotogrametría como el arte, la ciencia y

la tecnología de adquirir información confiable de cuerpos físicos y su medio, mediante el proceso de mostrar, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, alcanzadas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos (Jauregui, s.f.).

Al ser el método anteriormente mencionado una técnica no invasiva y con gran accesibilidad para la adquisición de tecnologías que permitan la obtención de fotografías y su procesamiento, se abre una serie de beneficios en su ejecución y en la optimización de procesos en cuanto a tiempos y costos, ya que no implica la interrupción de las labores propias de obra y todos los inconvenientes que se generarían con ella, ni el valor de comisiones de trabajo convencional que comúnmente realizan este tipo de labores, permitiendo incluso llegar a lugares de difícil acceso para de esta forma conocer de mejor manera el área objeto de estudio, obteniendo datos confiables respaldados en las herramientas computacionales que el medio brinda (Fuentes González & Camargo Jaimes, 2018).

El actual trabajo tiene como objetivo evaluar la aplicación de la fotogrametría como metodología alterna para el control de obras civiles, con el fin de explorar una de las técnicas de trabajo que más fuerza ha tomado en diversos sectores de la construcción; para ello se llevará a cabo un seguimiento de obra en su fase de movimiento de tierra durante un periodo de tres (3) meses, en los cuales se hará captura de datos una vez por semana a partir de un plan de vuelo fotogramétrico, con el cual obtendremos el Modelo Digital de Terreno (MDT), el cálculo de volumen de tierra y los avances de obra.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Monitoreo de volúmenes en movimiento de tierra para terraceos aplicando la metodología de fotogrametría aérea por medio del uso de sistemas de aeronave pilotada remotamente (RPAS: Remotely Piloted Aircraft Systems).

1.2 Objetivos Específicos

- Definir puntos de control en campo con el fin de garantizar la obtención de resultados confiables durante el procesamiento de datos en oficina; para ello se materializarán y georreferenciarán puntos de control según la resolución 643 del 30 de Mayo del 2018 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC -.
- Determinar los factores de campo que pueden generar afectación en el uso de la fotogrametría como metodología alterna para el seguimiento de obras civiles.
- Calcular el movimiento de tierra ejecutado entre cada vuelo de control tomando como punto de partida las superficies generadas a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) por los procesos fotogramétricos.

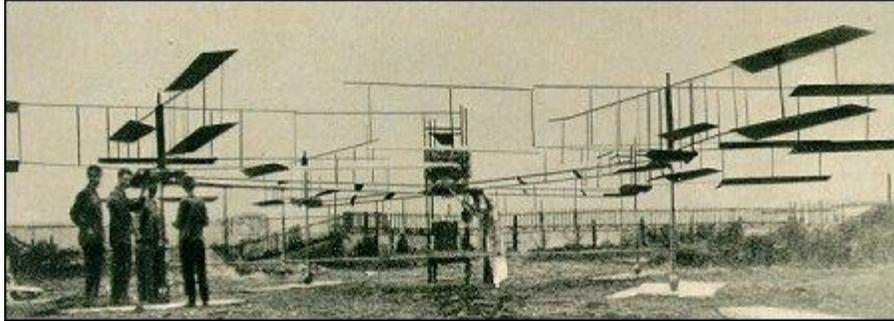
2. Marco Teórico

2.1 Historia de la fotogrametría

En la historia encuentran dos invenciones que en las primeras décadas del siglo XX abrieron las puertas principales de la fotogrametría, la primera de ellas fue la estereoscopia como fundamento de la estereofotogrametría, cuya técnica permite recolectar información tridimensional a partir de imágenes bidimensionales, a esta técnica se le conoció como “*Fotogrametría Analógica*”; la segunda invención fue la construcción de plataformas adecuadas para la ubicación de sensores tales como Zeppelin y aeroplanos de motor que facilitaron la obtención de información fotográfica (Santos Clavero, 2014). El primer registro histórico de construcción de un equipo de vuelo de tipo cuadricóptero data de 1907 y fue obra de Louis y Jacques Breguet en asociación con el profesor Charles Richet, este equipo de 578 kg tenía espacio para una persona y funcionaba con un motor de gasolina de 29 kW, su máxima altura de vuelo alcanzada fue de 1.5 m. (Aviastar, s.f.).

Figura 1.

Primer cuadricóptero construido



Fuente: Aviastar (s.f.) Breguet-Richet Gyroplane No.1 1907 Recuperado de:
http://www.aviastar.org/helicopters_eng/breguet_gyro.php

A mediados del siglo XX con la aparición del ordenador, se avanza a la fotogrametría analítica en donde la toma de información es analógica pero su modelado se da a partir de procesos matemáticos mediante el uso de una estereocomparadora (Santos Clavero, 2014).

La fotogrametría en sus procesos y métodos ha avanzado a pasos agigantados en las últimas décadas gracias al gran desarrollo de la informática, pasando a ser “*Fotogrametría Digital*” (Santos Clavero, 2014); el gran salto fue el uso de vehículos aéreos no tripulados para la obtención de las imágenes con los cuales se obtienen fotografías de gran calidad en vuelos de tiempos cortos, reduciendo así los costos a la vez que aumenta el rendimiento (Lincoln, 2017); es por esto que durante las últimas décadas la fotogrametría se ha convertido en una gran herramienta de medición brindando información con amplitud y alto detalle por medio de capturas fotográficas en donde se pueden evidenciar los detalles naturales y culturales del área fotografiada (Pacheco A. & Pozzobon B., 2006), y en donde su aplicación en conjunto con técnicas de fotogeología y fotointerpretación

han permitido desde principio de siglo XX la determinación de la topografía, relaciones estructurales, unidades litológicas, entre otros (Guerrero, Faranone, & Carrión, 2018).

2.2 Fotogrametría

Bonneval define la fotogrametría como la técnica que tiene por finalidad el estudio detallado de un objeto cualquiera en cuanto a su localización, caracterización física y cuantificación geométrica, partiendo siempre desde medidas tomadas sobre registros fotográficos obtenidos previamente. En su sentido etimológico, la fotogrametría es la métrica de lo escrito con luz y su campo de acción es amplio y se extiende a varias ramas académicas y profesionales (Quiros Rosado, s.f.).

En conclusión, la fotogrametría se puede definir como la ciencia encargada de la captura de datos fotográficos bajo condiciones detalladas y su posterior tratamiento para terminar en la obtención de resultados plasmados en mapas o planos, que permite conocer datos puntuales del área de interés (Quiros Rosado, s.f.).

Figura 2.*Fotogrametría Aérea*

Fuente: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

2.3 Elementos fundamentales en fotogrametría

La fiabilidad en los resultados que se puedan obtener en un proceso fotogramétrico va sujeta a la correcta ejecución de este método, por ello es importante comprender la importancia de los aspectos básicos de esta metodología (Quiros Rosado, s.f.).

2.3.1 Escala de la fotografía

Es el primer factor a considerar ya que relaciona las dimensiones de los objetos que deseamos estudiar, con la escala representativa en la cual vamos a plasmar el resultado final; de manera sencilla, termina siendo el elemento relacionante entre las medidas reales de los objetos de estudio y su representación gráfica (Quiros Rosado, s.f.).

2.3.2 Distancia Focal

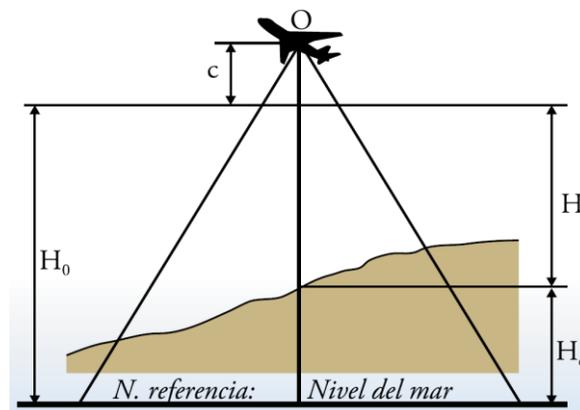
Característica propia de la cámara con la que se desarrolla el registro fotográfico; esta magnitud es un dato graduado y hace referencia a la distancia dada entre el eje óptico del objeto de estudio y el plano focal, en donde se da la captura de la fotografía (Quiros Rosado, s.f.).

2.3.3 Altura de vuelo

Corresponde la altura promedio medida desde el terreno, la cual es constante durante todo el vuelo fotogramétrico; cabe destacar que no es la misma altura sobre el nivel del mar (Quiros Rosado, s.f.)

Figura 3.

Altitud de vuelo sobre el nivel del mar



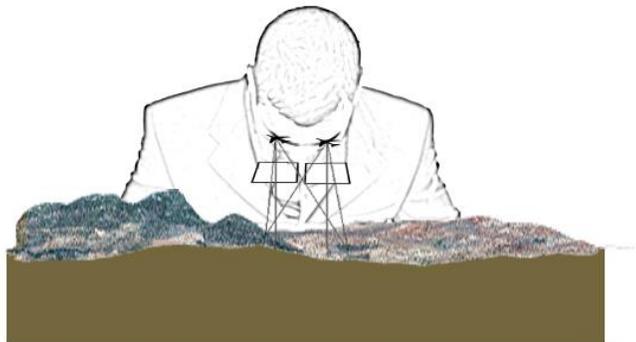
Fuente: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

2.4 Visión estereoscópica. Paralaje

Los seres humanos tienen la capacidad de observar el relieve de todo lo que les rodea, siendo conocida esta característica como visión estereoscópica natural; para ello, cada uno de los ojos captura una imagen del mismo objetivo la cual es procesada por la mente quien entrega como resultado final la visualización de dicho objeto con toda su caracterización física en una sola imagen. Es esa la base de la visión estereoscópica artificial aplicada en la fotogrametría, pues se toman dos imágenes del mismo objetivo desde puntos de observación diferentes para luego obtener una única imagen del objetivo con su relieve (Quiros Rosado, s.f.).

Figura 4.

Principio estereoscópico de la fotogrametría



Fuente: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

2.5 Clasificación de la fotogrametría

Es clasificada según el tipo de fotografía y según su tratamiento, de la siguiente manera (Quiros Rosado, s.f.):

2.5.1 Según el tipo de fotografía (Quiros Rosado, s.f.)

- **Fotogrametría espacial:** Medida en imágenes satelitales.
- **Fotogrametría aérea:** Medición en fotografías aéreas.
- **Fotogrametría terrestre:** Medición en fotografías obtenidas a nivel de suelo.

2.5.2 Según el tipo de tratamiento (Quiros Rosado, s.f.)

- **Fotogrametría analógica:** La alineación de las imágenes se da manualmente con el fin de generar un modelo a escala debidamente nivelado, para ello se usa el principio de marca flotante y un equipo restituidor analógico.
- **Fotogrametría analítica:** Se siguen utilizando imágenes analógicas pero con herramientas computacionales que permiten disminuir tiempos de procesamiento y aumentar calidad en el resultado final.
- **Fotogrametría digital:** Se pasa al uso de imágenes digitales procesadas por medio de softwares que se encargan de disminuir errores, garantizando calidad en el resultado final y generando una modelación tridimensional del área en cuestión (Quiros Rosado, s.f.).

2.6 Ventajas y desventajas de la fotogrametría respecto a la topografía clásica (Quiros Rosado, s.f.)

2.6.1 Ventajas

- Disminución en costos comparado con comisiones de topografía convencional.
- Permite levantar áreas de mayor magnitud en menor tiempo; mayor rendimiento.
- Permite inspeccionar y estudiar tramos cuya accesibilidad es difícil.
- Aumenta el detalle en la consideración de variables cuantificables.

2.6.2 Desventajas

- La fotogrametría es un proceso nulo si la zona de estudio presenta una densidad vegetal considerable, ya que imposibilitará la identificación real del nivel de suelo (Quiros Rosado, s.f.).

2.7 Aplicaciones de la fotogrametría en ingeniería civil (Quiros Rosado, s.f.)

La aplicabilidad de la fotogrametría en la ingeniería civil es en casi todas sus áreas, resaltando principalmente:

2.7.1 Vías:

Gran utilización en las fases de pre factibilidad, planeación y trazado general del proyecto.

2.7.2 Planificación territorial

Su uso ha dado aportes considerables en el ordenamiento territorial de diversos sectores.

2.7.3 Hidrografía

Estudios en fuentes hídricas tales como ríos, pozos, lagos, cuencas, represas, entre otros.

2.7.4 Control en obras civiles

Cálculo y monitoreo en obras civiles durante su etapa de movimiento de tierra (Quiros Rosado, s.f.).

2.8 Dron (Santos Clavero, 2014)

El termino dron proviene de la palabra inglesa drone que significa abeja macho y es debido al zumbido de las hélices que el equipo hace al volar que se le denomina de esta manera. Se le designa dron a cualquier dispositivo controlado remotamente, eliminando la necesidad de

tripulación; los hay en sistemas terrestres, marinos y aéreos, los cuales a su vez se dividen en dos grupos (Santos Clavero, 2014):

2.8.1 Equipos radio controlados

Es el equipo más común y comercial, son aquellos que se controlan desde tierra con un mando el cual va conectado a un dispositivo auxiliar (celular o Tablet) y tiene instalada una cámara que se encarga de transmitir en vivo todo lo que se desee evaluar en la zona; la máxima distancia de control radial, depende del equipo que se esté utilizando (Santos Clavero, 2014).

2.8.2 Vehículo aéreo no tripulado (UAV)

Son equipos capaces de seguir una ruta trazada gracias a un sistema GPS que tiene integrado, el cual permite realizar vuelos de mayor precisión y estabilidad (Santos Clavero, 2014).

2.9 Tipos de vuelo (Santamaria Peña & Saenz Mendez, 2011)

2.9.1 Vuelo Nadiral

Se da cuando el eje del levantamiento es totalmente vertical, es el tipo de vuelo ideal (Santamaria Peña & Saenz Mendez, 2011).

2.9.2 Vuelo Vertical

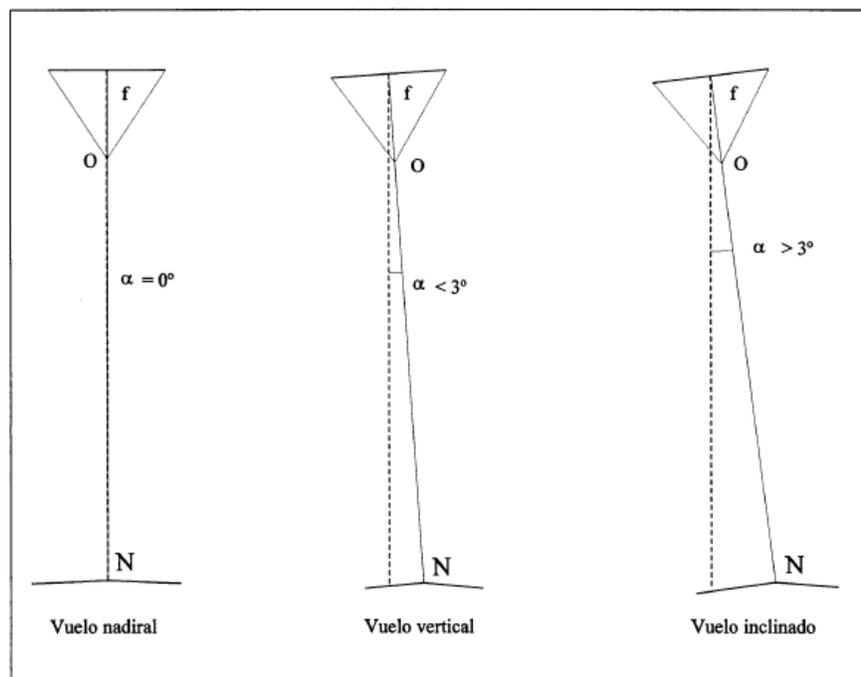
Se denomina de esta manera cuando la diferencia angular entre el eje del levantamiento y la vertical es menor a 3° (Santamaria Peña & Saenz Mendez, 2011).

2.9.3 Vuelo Inclinado

Se denomina de esta manera cuando la diferencia angular entre el eje del levantamiento y la vertical es mayor a 3° (Santamaria Peña & Saenz Mendez, 2011).

Figura 5.

Tipos de vuelo



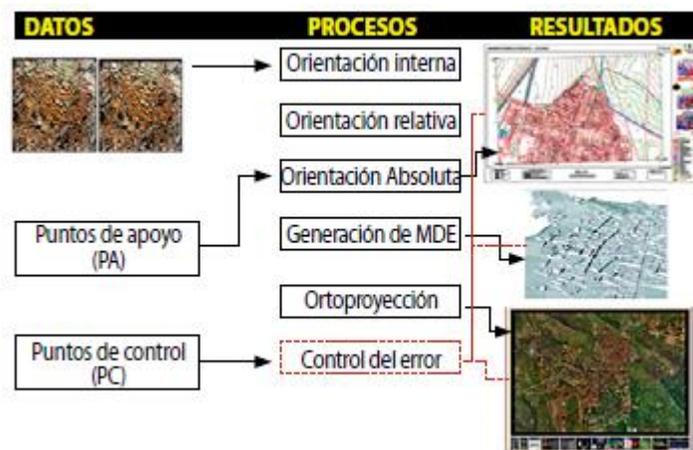
Fuente: Fundamentos de Fotogrametría

2.10 Proceso fotogramétrico digital

El objetivo final de la fotogrametría es lograr construir un modelo que permita tomar coordenadas tridimensionales, a partir de datos fotográficos tomados en la zona. (Quiros Rosado, s.f.)

Figura 6.

Fases del proceso fotogramétrico digital



Fuente: Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil

2.10.1 Orientación interna

Proceso por medio del cual se pasa de un sistema de coordenadas de fila – columna, también llamado píxel al sistema de coordenadas dadas en mm de la cámara; durante esta fase se corrigen errores en la película fotogramétrica (para fotos analógicas), distorsiones del objetivo, refracción atmosférica, esfericidad terrestre y diferencias entre el punto principal con el centro fiducial (Quiros Rosado, s.f.).

2.10.2 Orientación relativa

En esta parte del procedimiento se buscan puntos equivalentes en cada una de las fotografías, vinculándolas geoméricamente con el fin reconstruir los haces, formando así el modelo estereoscópico del estudio. Para este proceso se usa el principio de coplaneidad, el cual obliga a que coincidan en un único plano el punto de terreno con los centros de proyección de dos imágenes homólogas (Quiros Rosado, s.f.).

2.10.3 Orientación absoluta

En este punto se nivela y escala el proyecto, posicionándolo en su ubicación real. En esta fase juegan un papel esencial los puntos de apoyo, los cuales brindan solución al sistema a través del método de mínimos cuadrados (Quiros Rosado, s.f.).

2.10.4 Puntos de apoyo

Son los utilizados para la orientación absoluta del proyecto; con el fin de dar mayor exactitud al trabajo, estos puntos deben ser georreferenciados con base al sistema de coordenadas en el que se desee entregar el resultado final. Los puntos de apoyo han de estar distribuidos en la totalidad del área respetando siempre los siguientes factores:

- Puntos materializados de manera permanente en terreno para controles periódicos.
- Deben ser fácilmente detectables en los registros fotográficos, por lo que han de estar identificados y en áreas despejadas.

- Su proceso de georreferenciación debe cumplir con la normativa vigente (Quiros Rosado, s.f.).

2.10.5 Orientación exterior (relativa y absoluta en un solo paso)

En algunos softwares se puede desarrollar tanto la orientación relativa como la absoluta en un solo paso, en esos casos lo que actúa es el principio conocido como condición de colinealidad, en donde se obliga al punto de terreno proyectado, el punto de imagen y el eje de proyección a encontrarse en una misma recta (Quiros Rosado, s.f.).

2.11 Modelo digital de terreno

Es la representación descriptiva espacial de una superficie dada, por medio de una estructura numérica de datos. Se conocen varios tipos de modelos digitales, siendo los más conocidos los expuestos a continuación (Quiros Rosado, s.f.):

2.11.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Este modelo se centra en la representación altimétrica de la superficie objeto de estudio, permitiendo detallar curvas de nivel y clasificar zonas según su altura. (Quiros Rosado, s.f.)

2.11.2 Modelo Digital de Superficie (MDS)

Considera todos los elementos presentes en la zona, incluyendo las alturas de detalles como árboles, edificios, etc (Quiros Rosado, s.f.).

3. Metodología

La obra sobre la cual se desarrollan las actividades referidas en el presente trabajo, corresponde al proyecto ALTOS DEL BOSQUE, ubicado en la vereda Barro Blanco del municipio de Piedecuesta – Santander. Sus coordenadas de localización son

Tabla 1.

Coordenadas del proyecto

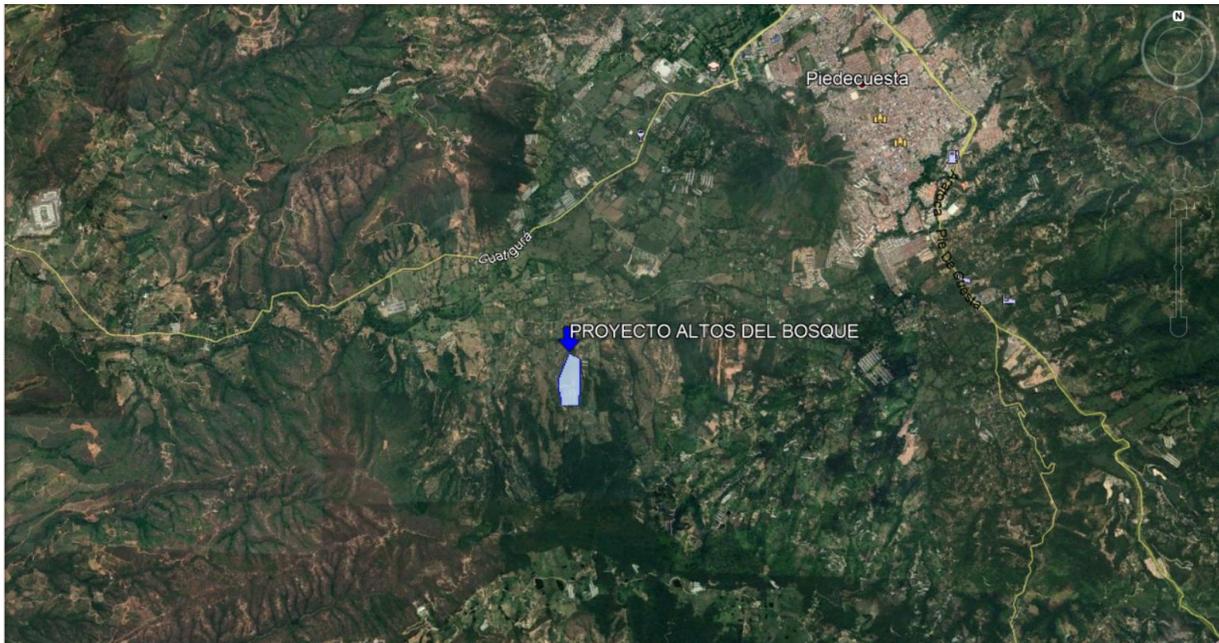
Norte	Este	Cota
1261657.929	1109765.052	944.21

Fuente: Elaboración propia

La obra se desarrolla en un área de 8 Ha en donde se proyectan parcelas de 500 m²; la programación de la obra civil estima 3 meses para movimientos de tierra durante los cuales se adelanta la ejecución de los diseños de terracedos, demarcación de las áreas viales y perfilación de taludes.

Figura 7.

Localización general del proyecto



Fuente: Google Earth Pro

La metodología trazada para el mencionado proyecto se ramifica en 5 fases, las cuales se ejecutan conforme a la programación planteada, teniendo en consideración los siguientes aspectos:

➤ **Equipos**

- ✓ Dos (2) Equipos GNSS L1/L2 (doble frecuencia) - GPS Topcon serie Híper V con accesorios (Controladora, Trípode, Bastón).
- ✓ Un (1) Drone DJI Phantom 4 Pro.

➤ **Materiales**

- ✓ Cemento.
- ✓ Arena.
- ✓ Triturado.

- ✓ Agua.
- ✓ Varillas de acero ¼”.
- ✓ Juego de formaleta.
- ✓ Herramientas menores (Porra, puntillas, cinta métrica, pintura).
- **Topografía y Cartografía**
- ✓ Identificación de zonas de alto riesgo y demás elementos naturales y artificiales presentes en el área objeto de estudio con el fin de considerarlos durante la distribución de los puntos de control y los vuelos de monitoreo.
- ✓ Los datos para la georreferenciación de los puntos de control se tomaron trabajando simultáneamente con dos estaciones permanentes de la red activa MAGNA-ECO del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Antena San Alberto (ALBE) y Antena Barrancabermeja (BEJA), dando así cumplimiento a la doble determinación.
- **Programas y Aplicativos Utilizados Para el Trabajo de Campo y Oficina**
- ✓ Google Earth Pro (Definición de polígono de vuelo).
- ✓ Pix4D Capture (Aplicación para vuelo fotogramétrico).
- ✓ DJI GO 4 (Aplicación para vuelo libre).
- ✓ Magnet Tools (Descarga y post-proceso de datos para puntos de control).
- ✓ Pid4D Mapper (Programa para proceso fotogramétrico).
- ✓ AutoCAD Civil 3D (Cálculo de volúmenes).
- **De Orden Administrativo**
- ✓ Se dispusieron los recursos de personal, implementos y demás servicios necesarios para el normal desarrollo de cada una de las etapas.

- ✓ Junto con el director de proyecto se hicieron acuerdos en cuanto a las zonas necesarias dentro de los alcances del proyecto para ser tenidas en cuenta en el trabajo a ejecutar, de acuerdo al cronograma de actividades, avance del mismo y tiempo de entrega.

3.1 Fase I: Visita técnica para reconocimiento de la obra

El día tres de Julio del año 2020 se realiza la visita técnica a la obra con el fin de determinar linderos del proyecto y estudiar las mejores ubicaciones posibles para los puntos de apoyo, de tal forma que se pueda cubrir la totalidad del área de la obra y que durante el monitoreo proyectado siempre se trabaje sobre los mismos puntos de control, garantizando así continuidad en el manejo de datos y procesos del proyecto obteniendo de esta forma mayor precisión en los resultados finales; se logra concertar un trabajo en conjunto con el ingeniero residente de obra, con el fin de respetar los lineamientos de seguridad industrial y sanitaria del proyecto.

Figura 8.

Proyecto Altos del Bosque



Fuente: Elaboración propia

3.2 Fase 2: Materialización de puntos de apoyo

Después de un análisis de la zona, se determinó la ubicación de cada uno de los cinco puntos de control buscando cubrir la totalidad del perímetro del área objeto de estudio; se localizaron en áreas despejadas, garantizando su visibilidad y estabilidad durante la totalidad de la obra de tal forma que sean usados continuamente para el monitoreo proyectado.

Figura 9.

Localización de puntos de control (GCP)



Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se procedió a realizar las excavaciones manuales de 0.50 m de profundidad por un diámetro de 0.20 m con el fin de empotrar los puntos al suelo en los lugares escogidos para luego pasar a preparar las formaletas.

Figura 10.

Proceso de excavación



Fuente: Elaboración propia

Figura 11.

Preparación de formaletas



Fuente: Elaboración propia

Al tener culminadas las excavaciones, se procede a la disposición y nivelación de las formaletas y a la par se va preparando la mezcla de concreto para el proceso de fundida.

Figura 12.

Disposición y nivelación de formaletas



Fuente: Elaboración propia

Figura 13.

Preparación de la mezcla de concreto



Fuente: Elaboración propia

Cada uno de los mojones lleva refuerzo en acero de $\frac{1}{4}$ " de 0.60 m de longitud y sobresalen del nivel de terreno 0.20 m

Figura 14.

Refuerzo de acero - 1/4”.



Fuente: Elaboración propia

Seguidamente se realizó la colocación del concreto en cada una de las formaletas cuidando el debido proceso con el fin de garantizar un óptimo resultado en su fraguado.

Figura 15.

Colocación y terminación del concreto para los puntos de control



Fuente: Elaboración propia

Posterior a la materialización de puntos de control se procede a hacer la instalación de las placas en aluminio las cuales llevan los datos relevantes del proyecto como lo son: nombre del proyecto, número de punto y año, con el fin de garantizar la clara identificación de cada uno de ellos.

Figura 16.

Placa de identificación para punto de control



Fuente: Elaboración propia

Como parte final de la preparación de los puntos de control materializados, se procede a desencofrar las formaletas de cada uno de ellos, pintándolos de color rojo con el fin de garantizar su fácil visualización en campo y en los registros fotográficos.

Figura 17.

Punto de control terminado en campo



Fuente: Elaboración propia

3.3 Fase 3: Georreferenciación de puntos de apoyo

3.3.1. Proceso de campo

Al culminar las labores de materialización de los puntos de control, se procede a la georreferenciación de cada uno de ellos, debido a que la exactitud en coordenadas que manejen los puntos afectan directamente el resultado final de todo trabajo fotogramétrico, esencialmente si lo que se busca es monitorear un proceso laboral de este tipo; es por ello que con el fin de garantizar la mayor precisión posible se adopta como referencia la resolución 643 del 30 de Mayo del 2018 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, en su Capítulo 8 – Puntos Topográficos Base –

Numeral 8.1 – Puntos Topográficos Base A Partir de Equipos GNSS – (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018).

Con el fin de certificar un adecuado trabajo de los equipos GNSS, se debe destacar que el espacio óptimo para cumplir condiciones que garanticen una buena lectura de los equipos de rastreo obedece a tener una buena ventana satelital, esto se traduce en que la señal del satélite no se vea interrumpida por ningún elemento de característica sólida (construcciones, vegetación, montañas) o campos magnéticos, ya que esta interrupción de señal hace que pierda precisión y calidad el rastreo, por lo que se debe asegurar una máscara de elevación para la visibilidad de satélites menor a los 10° , esto asegura un seguimiento durante una amplia ventana de tiempo de los satélites de manera individual.

Figura 18.

Condiciones óptimas para el rastreo de GPS



Fuente: Elaboración propia

Para la óptima determinación de los vértices se utilizaron dos equipos doble frecuencia de referencia TOPCON Híper V con las siguientes características:

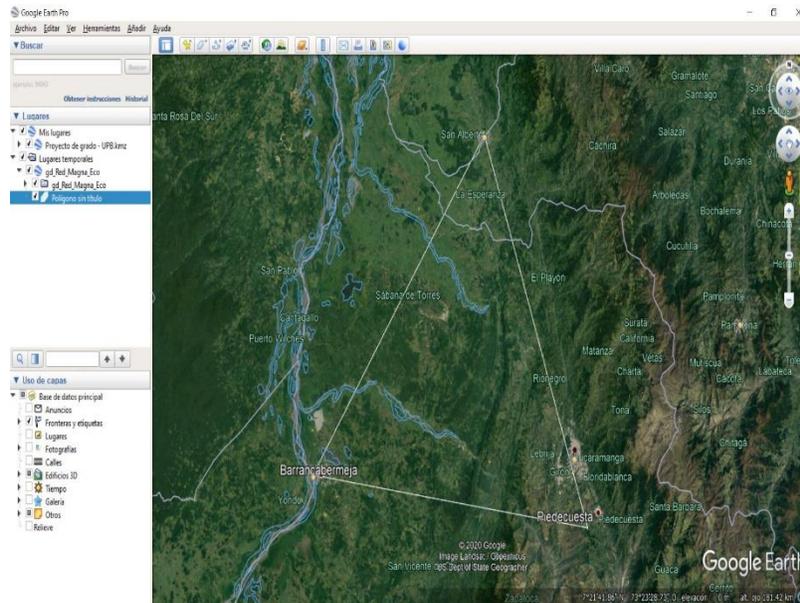
- ✓ Posicionamiento centimétrico en tiempo real con datos RTK/OTF y actualizaciones de posición de hasta 10 Hz.
- ✓ Posicionamiento submétrico en tiempo real usando correcciones de pseudodistancia.
- ✓ Motor adaptativo de doble frecuencia RTK.
- ✓ Funciones de corrección diferencial WAAS/EGNOS.
- ✓ Para la estabilidad del punto y para evitar movimientos vibratorios se utilizaron los GPS con trípode y base nivelante. Esto garantiza una correcta nivelación cenital.

La georreferenciación se cumple empleando el método estático diferencial, el cual funciona a partir de dos puntos geodésicos de la red pasiva, o dos estaciones permanentes de la red activa MAGNA – ECO como es el caso del presente proyecto, o una combinación de ambas; es de gran importancia recalcar que dichos puntos deben trabajar simultáneamente durante el tiempo de rastreo con el fin de dar cumplimiento a la doble determinación requerida por la norma (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018). Para el presente proyecto se dio uso de las siguientes estaciones permanentes de la red activa MAGNA – ECO:

- Antena San Alberto (ALBE)
- Antena Barrancabermeja (BEJA)

Figura 19.

Triangulación entre estaciones activas del IGAC y puntos de control del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Para determinar el tiempo correcto de rastreo correspondiente a los puntos materializados, se utilizó la ecuación referida por la resolución 643 del 30 de Mayo del 2018 en su numeral 8.1, la cual está dada con base en la mayor distancia existente entre las estaciones permanentes de la Red MAGNA - ECO y el punto de control a posicionar; dicha ecuación aplicada para equipos de doble frecuencia L1/L2 es la siguiente (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2018)

$$t = 65 \text{ min} + (3 \text{ min} \times (d - 10))$$

Donde:

t = Tiempo de rastreo en minutos

d = Distancia en kilómetros

Para el trabajo actual las distancias entre las estaciones activas y los puntos de control son:

Proyecto – Antena Barrancabermeja (BEJA): 89 Km

Proyecto – Antena San Alberto (ALBE): 95 Km (Distancia con la que se calcula el tiempo de rastreo por ser la mayor)

Aplicando la ecuación anterior con el dato de 95 Km que es la distancia entre la Antena San Alberto y el proyecto, se obtiene:

$$t = 65 \text{ min} + (3 \text{ min} \times (95 - 10))$$

$$\underline{t = 320 \text{ minutos (5 Horas con 20 minutos)}}$$

Para el presente proyecto el cálculo de tiempo de rastreo arroja un tiempo mínimo de 320 minutos. Se continúa con el posicionamiento de los puntos de control materializados, preparando y armando el equipo en cada uno de ellos según orden numérico establecido del 1 al 5, cumpliendo con el tiempo de rastreo en el primer día para los puntos No. 1 – 2 y en el segundo día para los puntos No. 3 – 4 – 5; se relaciona en la siguiente tabla los tiempos de rastreo cumplidos para cada uno de ellos:

Tabla 2.

Tiempo de rastreo para los puntos de control

PUNTO NO.	TIEMPO DE RASTREO
	Hora:Min:Seg
GPS-1	5:38:07
GPS-2	5:40:38
GPS-3	5:47:50
GPS-4	6:17:03
GPS-5	5:57:09

Fuente: Elaboración propia

Figura 20.

Tiempo de rastreo con equipo GNSS –Topcon Hiper V



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. *Proceso en oficina*

De acuerdo con las recomendaciones técnicas dadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en la Guía Metodológica para la Obtención de Coordenadas utilizando el sistema GNSS, el tiempo mínimo de rastreo utilizado fue de 340 minutos por cada punto materializado contados a partir de la estabilización del equipo.

La descarga de datos se realizó con el programa MAGNET TOOLS en formato .tps para luego ser convertidos a formato rinex (Receiver INdependent Exchange), con el fin de poder ser leídos por cualquier software de post proceso.

Se lleva a cabo el trabajo de oficina generando los resultados en la época en la que se realizaron los rastreos que para nuestro caso es:

$$***Epoca de referencia*** = \frac{\text{Dia del año de rastreo}}{360}$$

$$***Epoca de referencia*** = \frac{188}{360}$$

$$***Epoca de referencia*** = 2020.5$$

Teniendo los datos de campo descargados y definida la época de referencia, se procede a descargar los datos de las estaciones activas de la red MAGNA - ECO con las cuales se trabajaron directamente del geoportal del sitio web del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Figura 21.

Geoportal -IGAC



Archivos Rinex

Título	Descripción	Shapefile	FTP	Geoportal	Documentos
Archivos En Formato Rinex Estaciones Red Magna Eco	Archivos En Formato Rinex De Las Estaciones Red Magna Eco Correspondientes a Los Ultimos 60 Dias Calendario		FTP		
Red Magna Eco - Localización General	Esta información refleja la localización general de las estaciones Red MAGNA ECO, las coordenadas precisas pueden ser descargadas de la página SIRGAS				

Fuente: Elaboración propia

La descarga de los datos de cada una de las estaciones activas se realiza buscando primero el día del año en el que se realizaron los rastreos para que el sitio web nos lleve a una nueva ventana en donde encontramos las tres carpetas principales en formato rinex, las cuales están compuestas por:

- g= Datos observados (Constelación GLONASS)
- n= Datos navegados
- o= Datos observados (Constelación GPS)

Se ingresa a cada una de estas carpetas y se descargan los datos de la estación activa de Barrancabermeja (BEJA) y de la estación activa de San Alberto (ALBE) ya que fueron las dos estaciones con las que se trabajó; el paquete de datos g, n, o, componen el archivo rinex de una estación activa.

Figura 22.

Datos Rinex para estaciones permanentes

Índice de /192/20g/			Índice de /192/20n/			Índice de /192/20o/		
 [directorio principal]			 [directorio principal]			 [directorio principal]		
Nombre	Tamaño	Fecha de modificación	Nombre	Tamaño	Fecha de modificación	Nombre	Tamaño	Fecha de modificación
<input type="checkbox"/> abcc1920.20g.gz	23.9 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> abcc1920.20n.gz	25.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> abcc1920.20o.gz	1.3 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> agca1920.20G.gz	27.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> abpw1920.20n.gz	25.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> abpw1920.20o.gz	556 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> albe1920.20G.gz	28.8 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> agca1920.20N.gz	24.6 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> agca1920.20O.gz	4.9 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> bece1920.20g.gz	25.7 kB	16/09/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> albe1920.20N.gz	26.5 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> albe1920.20O.gz	7.5 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> beja1920.20G.gz	24.0 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> arca1920.20N.gz	24.6 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> arca1920.20O.gz	2.3 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> boga1920.20G.gz	29.0 kB	15/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bece1920.20n.gz	26.4 kB	16/09/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bece1920.20o.gz	6.3 MB	16/09/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> bogt1920.20g.Z	28.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> beja1920.20N.gz	27.5 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> beja1920.20O.gz	2.3 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> bosc1920.20G.gz	28.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> boga1920.20N.gz	26.4 kB	15/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> boga1920.20O.gz	5.1 MB	15/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> buen1920.20g.gz	20.0 kB	23/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bogt1920.20n.Z	27.9 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bogt1920.20o.Z	2.5 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> cali1920.20G.gz	31.1 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bosc1920.20N.gz	27.3 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> bosc1920.20O.gz	3.9 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> cano1920.20G.gz	26.4 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> buen1920.20n.gz	21.2 kB	23/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> buen1920.20o.gz	3.2 MB	23/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> cart1920.20G.gz	29.8 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cali1920.20N.gz	29.2 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cali1920.20O.gz	3.2 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> cucu1920.20G.gz	29.5 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cano1920.20N.gz	15.3 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cano1920.20O.gz	3.7 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> dora1920.20G.gz	24.2 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cart1920.20N.gz	27.9 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cart1920.20O.gz	3.8 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> fque1920.20g.gz	27.5 kB	12/11/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> casi1920.20N.gz	26.3 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> casi1920.20O.gz	2.6 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.
<input type="checkbox"/> gara1920.20G.gz	29.2 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cucu1920.20N.gz	29.6 kB	12/07/20, 7:00:00 p. m.	<input type="checkbox"/> cucu1920.20O.gz	3.0 MB	12/07/20, 7:00:00 p. m.

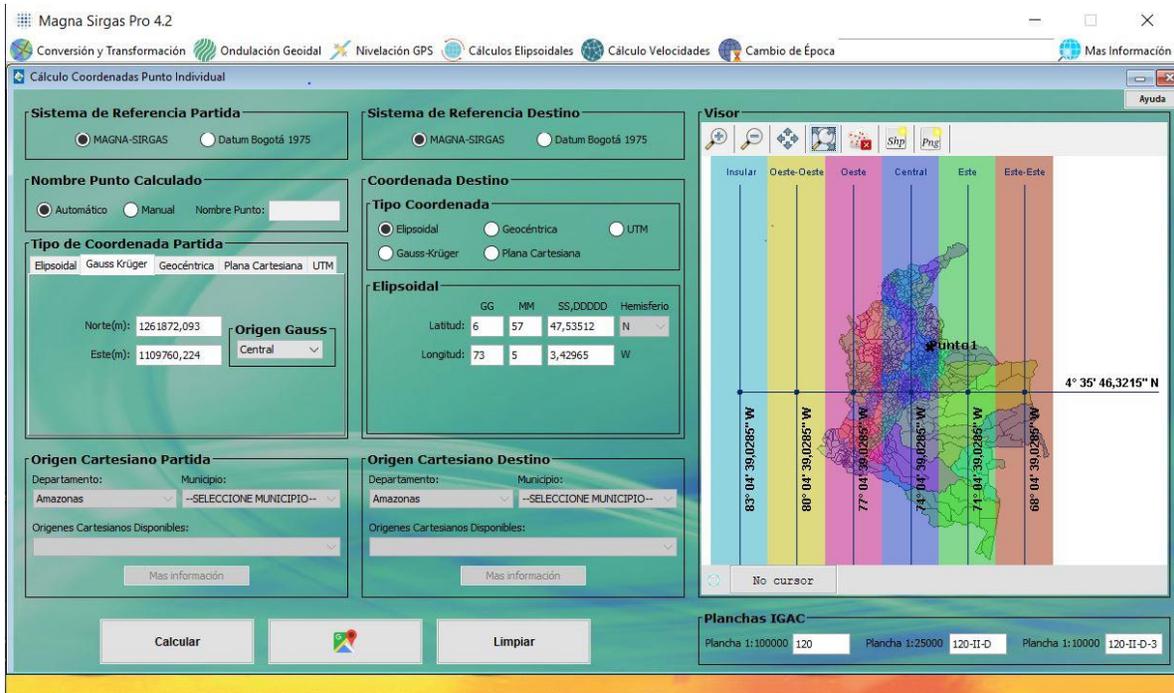
Fuente: Elaboración propia

Al tener los datos tanto de los puntos de control como de las estaciones activas de la red MAGNA ECO bajo el mismo formato rinex, se pasa a la realización del post proceso para lo que es necesario en primera instancia determinar a cuál de los orígenes de Colombia pertenecen los puntos de control, para ello se da uso al software Magna Sirgas Pro en su versión 4.2 del IGAC,

en donde al ingresar una coordenada tomada del lugar de la obra con un GPS, se indica la ubicación de la misma en la franja del origen central.

Figura 23.

Conversión de coordenadas con Magna Sirgas Pro 4.2



Fuente: Elaboración propia

Con base en la imagen anterior se define como el sistema de referencia para el proyecto el MAGNA-SIRGAS Origen Bogotá cuyos parámetros se ven a continuación:

Figura 24.*Sistema de referencia*

Sistema de referencia	MAGNA-SIRGAS Bogotá
Elipsoide de referencia	WGS 84
Proyección	Transversal Mercator
Meridiano Central	74°04'39.02850"O
Paralelo Central	4°35'46.32150"N
Falso Norte	1000000.000m
Falso Este	1000000.000 m

Fuente: Elaboración propia

Teniendo definido el sistema y origen de coordenadas junto con el geoide de referencia al cual estarán asociados los puntos de control, se procede a crear el archivo de trabajo en el software MAGNET Tools en donde se debe indicar toda la información dicha previamente junto con el huso horario para Colombia y la unidad lineal y angular deseada.

Figura 25.*Creación de archivo en MAGNET Tools*

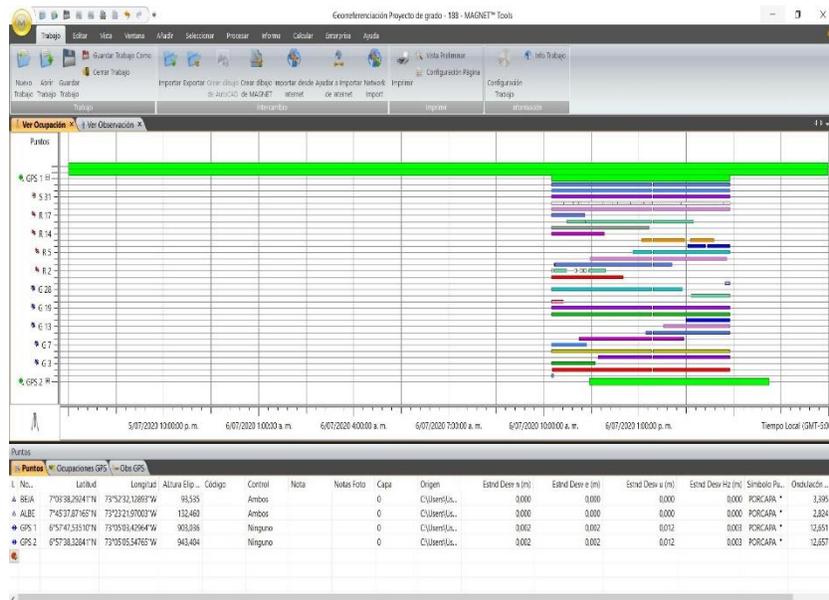
Fuente: Elaboración propia

Después de creado el archivo de trabajo, se cargan los datos de los puntos de control leídos en campo junto con los datos de las estaciones permanentes descargados de la página web del IGAC los cuales son mostrados por el software en la pestaña “Ver ocupación” en donde se visualizan bajo la imagen de una barra color verde trazada a lo largo del eje de tiempo, indicando gráficamente la duración de rastreo de cada uno de ellos. Se garantizó un tratamiento óptimo de los datos durante el post proceso limpiando ruidos presentes en las señales que podían afectar el resultado final de esta etapa.

Para revisar información del proceso nos dirigimos a la parte inferior del área de trabajo en donde están las pestañas “Puntos”, “Ocupación GPS” y “Obs GPS”, en donde se encuentra la duración de rastreo, las coordenadas calculadas, entre otros datos.

Figura 26.

Datos de estaciones permanentes y puntos de control



Fuente: Elaboración propia

Nota: Si se desea ver la ubicación en planta de los puntos y las estaciones en su triangulación, se puede dar a la opción “Ver observación” ubicada en la parte superior del área de trabajo.

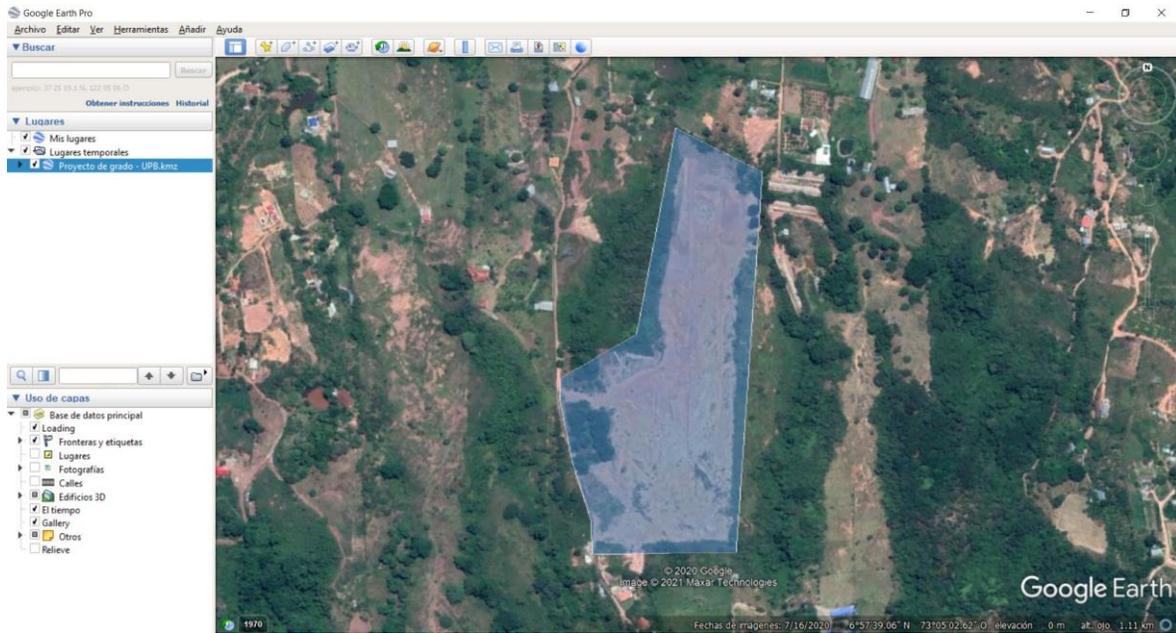
Terminado el proceso de oficina se generan dos informes de post-proceso, el primero para los puntos de control 1 y 2 (Ver Apéndice 1) quienes cumplieron su tiempo de rastreo el día 188 del año 2020, y el segundo informe para los puntos de control 3, 4 y 5 (Ver Apéndice 2) quienes cumplieron su tiempo de rastreo el día 189 del mismo año. Se genera ficha técnica para cada punto de control (Ver Apéndice 3 al Apéndice 7)

3.4 Fase 4: Programación y ejecución de vuelos fotogramétricos

Para la fase de creación del plan de vuelo, se inició generando un polígono sobre el área de trabajo dando uso al programa Google Earth Pro, tomando espacios adicionales a todos los lados del proyecto con el fin de manejar un área adicional suficiente para los cálculos y demás procesos de oficina.

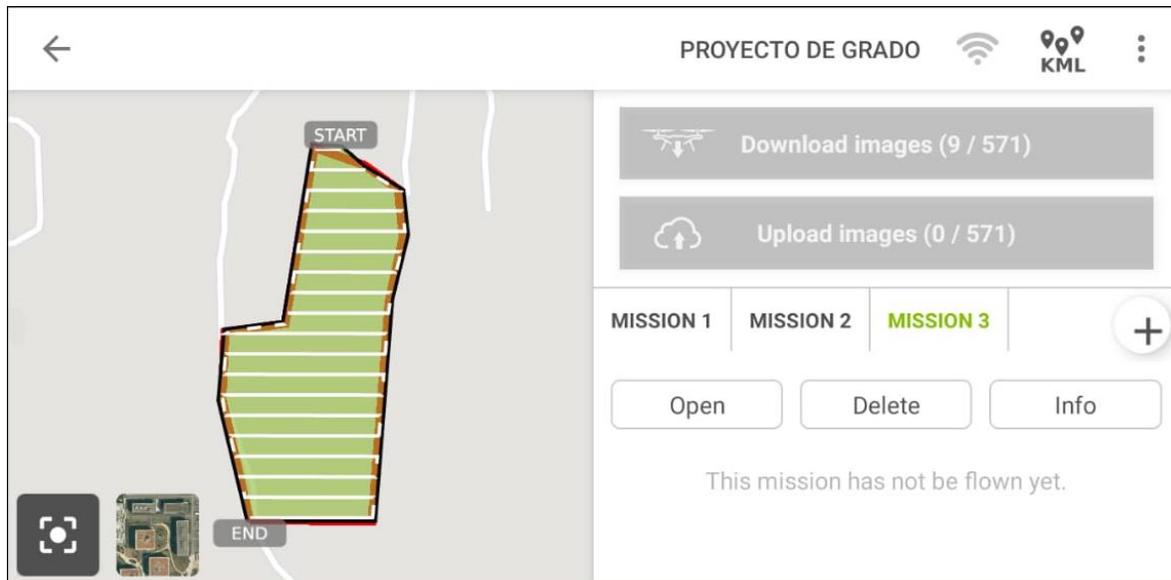
Figura 27.

Polígono de vuelo



Fuente: Google Earth Pro

El área de trabajo previamente definida procede a ser cargada en la aplicación Pix4D Capture que es la que permite conectar el dispositivo móvil al dron, para pasar a la creación del plan de vuelo el cual lleva por nombre “PROYECTO DE GRADO”.

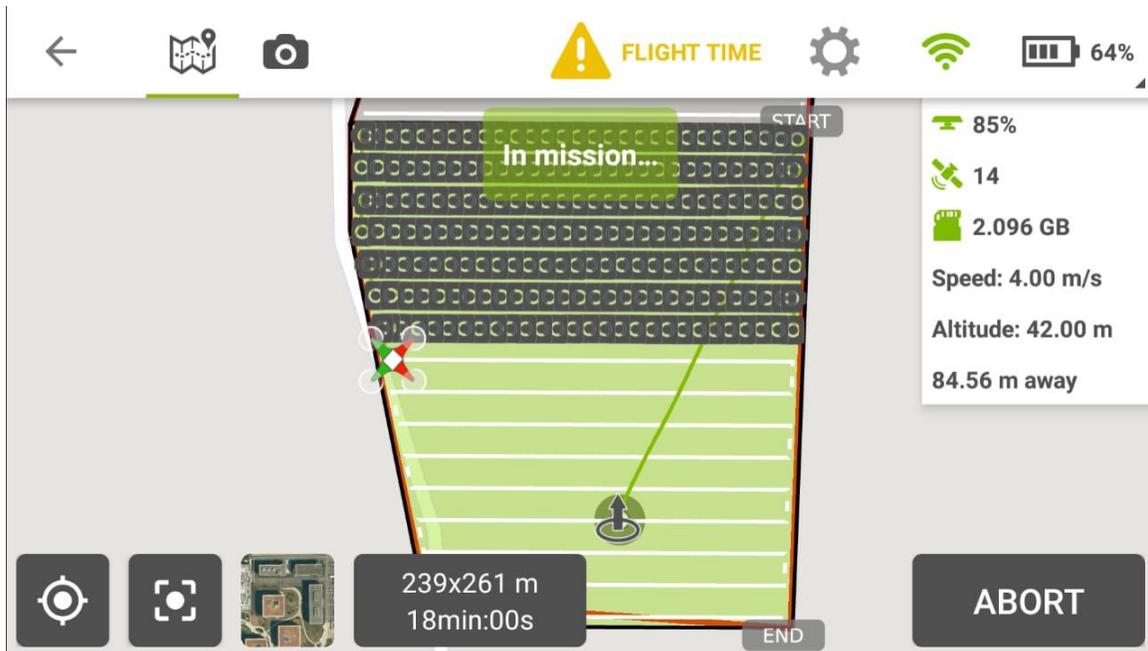
Figura 28.*Creación de plan de vuelo*

Fuente: Elaboración propia

Con la creación del plan de vuelo, se pasa a modificar todo lo relacionado con la altura de vuelo y el sentido de la grilla que el equipo va a recorrer, siempre cuidando el no sobrepasar el tiempo máximo permitido por el dron a utilizar en los vuelos de control.

Figura 29.

Vuelo en ejecución con Pix4D Capture



Fuente: Elaboración propia

Se ejecutaron 12 vuelos de control en el área objeto de estudio, tomando el primer vuelo como reconocimiento por medio de un registro fotográfico de la zona, en otros dos vuelos se presentaron inconvenientes de tipo natural (Vuelo No. 3 y vuelo No. 5) y los últimos dos vuelos programados en el cronograma se pospusieron durante dos meses y medio debido a suspensión de la obra y cambio de personal de trabajo. Se relaciona a continuación un historial de los vuelos ejecutados:

Tabla 3.*Vuelos de control ejecutados*

Vuelo de control No.	Fecha	Altura de vuelo [m]	GSD [cm/px]	Observación
Vuelo Libre	10/07/2020	N.A.	N.A.	Vuelo de reconocimiento
1	17/07/2020	45	1.23	Condiciones normales
2	24/07/2020	35	0.95	Condiciones normales
3	31/07/2020	35	0.95	Inconcluso por lluvias
4	8/08/2020	37	1.01	Condiciones normales
5	14/08/2020	37	1.01	Inconcluso por accidente
6	21/08/2020	37	1.01	Condiciones normales
7	28/08/2020	37	1.01	Condiciones normales
8	4/09/2020	37	1.01	Condiciones normales
9	11/09/2020	37	1.01	Condiciones normales
10	27/11/2020	80	2.18	Condiciones normales
11	4/12/2020	80	2.18	Condiciones normales

Fuente: Elaboración propia

El equipo seleccionado para la ejecución de los vuelos de control fue el Phantom 4 Pro de la casa DJI, cuyas características principales son (CJI INcorporates HDMI Technology, 2017):

- ✓ Peso: 1388 gr
- ✓ Máxima velocidad: 72 kph (Sport)
- ✓ Máxima duración de vuelo: 30 Min
- ✓ Modo GPS: GPS/GLONASS
- ✓ Sensores de obstáculos: En cinco sentidos

- ✓ Cámara: 20 Mpx con sensor de 1”
- ✓ Rango de distancia entre equipo y control: 7Km

Figura 30.

Phantom 4 Pro - DJI



Fuente: Elaboración propia

3.4.1 Causas de afectación durante la ejecución de los vuelos fotogramétricos

El área de trabajo presenta una serie de condiciones que fueron objeto de análisis durante la visita técnica especificada previamente y para las cuales se adoptaron medidas preventivas con el fin de no afectar el proceso del presente proyecto. El aspecto de mayor relevancia notado durante la inspección fue la existencia de una línea eléctrica de alta tensión que pasa por el medio del proyecto a una altura no superior a los 30 metros del suelo en su punto más bajo, por lo que los

puntos de control fueron localizados en áreas lejanas a dicha línea eléctrica respetando un distanciamiento mínimo de 50 metros garantizando así que no presentara interferencia con el equipo GNSS al momento de cumplir con el tiempo de rastreo. Con el dron se tomó la precaución de volar en las áreas superiores del predio con alturas siempre mayores a los 35 metros, de tal forma que al pasar sobre la línea eléctrica existiera una distancia de seguridad mínima de 50 m que evitara interferencia entre la línea eléctrica y el control de mando del equipo que pudiese generar un accidente.

Figura 31.

Línea de alta tensión existente



Fuente: Elaboración propia

Toda la demás área es una zona despejada exceptuando los linderos en donde la alta densidad vegetal fue considerada para respetar alturas de seguridad que mantuvieran la integridad física del equipo.

A pesar de la evaluación de riesgos desarrollada durante la visita técnica, se presentaron inconvenientes de índole natural que siempre están expuestos y cuyo manejo es complejo, el paso de aves y la lluvia; el primer caso siempre fue un tema de preocupación debido a que por volar sobre el medio día (con el fin de garantizar el menor porcentaje de sombras en las fotos), se contaba con un gran número de aves volando alrededor y sobre el predio a causa de la existencia de galpones y la generación de desechos por estas fincas aledañas, a pesar de todo esto nunca se presentó un accidente con un ave en gran parte gracias al fuerte ruido de vuelo que genera el equipo de trabajo, lo que ayuda a alejarlas. El segundo caso obligó a detener el vuelo fotogramétrico de control No.3 el cual estaba en una fase de cumplimiento igual al 75% cuando una lluvia leve empezó a caer en la zona y para evitar daños al equipo debido al agua en los rotores que pueden generar accidentes, se tuvo que detener y ser guardado el dron, pasando primero por una limpieza e inspección de seguridad.

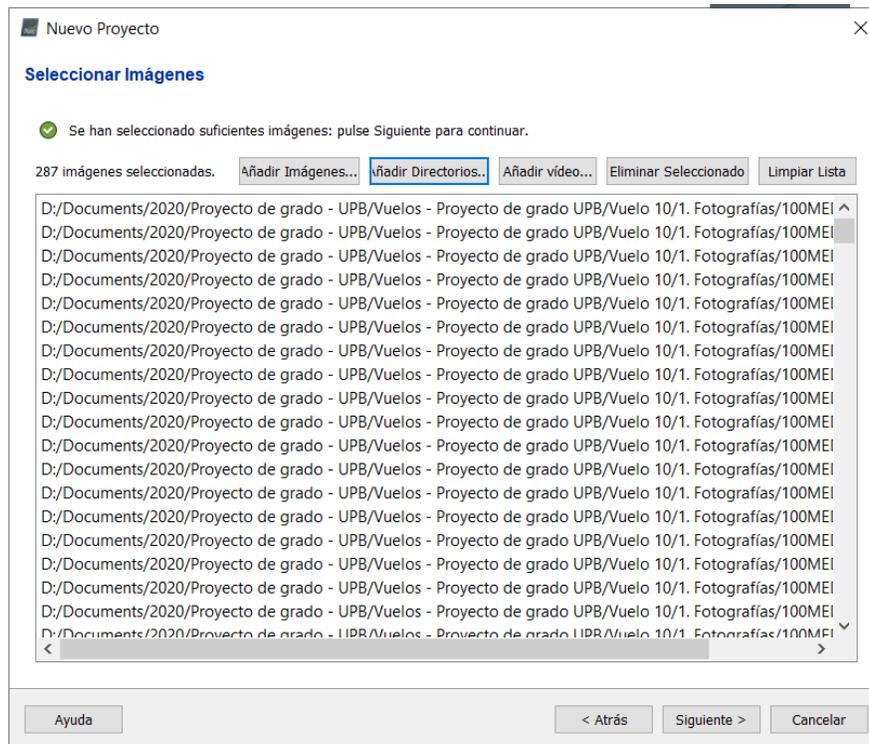
Por último se presentó un accidente de tipo instrumental en la línea final de recorrido del vuelo de control No. 5 al dron perder conexión con el control de mando, bajando a distancias no seguras hasta chocar con la copa de un árbol, en ese momento se tomó el mando manual del equipo y se retornó al punto de partida para su revisión.

3.5 Fase 5: Procesamiento de información (trabajo de oficina)

3.5.1 Procesamiento Fotogramétrico

Para el trabajo de oficina se escoge el software Pix4D Mapper sobre el Agisoft PhotoScan debido a sus mejores resultados en tiempos de procesamiento más cortos (Costales Acuario, 2018). Con el fin de llevar un registro histórico de los vuelos ejecutados, se crea una carpeta de trabajo para cada proceso en donde se organizan las fotografías, los puntos de control del proyecto y una tercera carpeta en donde se irán almacenando todos los datos y resultados propios del proceso fotogramétrico ejecutado en el software Pix4D Mapper.

Después de crear un proyecto, darle nombre y asignarle la carpeta en donde almacenará sus procesos, se cargan todas las imágenes del vuelo que corresponda las cuales deben estar en formato JPG o TIFF., teniendo en cuenta que el programa no recibe menos de tres imágenes.

Figura 32.*Carga de Fotografías al Pix4D Mapper*

Fuente: Elaboración propia

En el siguiente paso, el programa desglosa todas las propiedades de las fotografías con las que vamos a trabajar, empezando por la geolocalización de las imágenes a las cuales el programa por defecto les asigna el sistema de coordenadas World Geodetic System (WGS 84) y el Earth Gravitational Model (EGM 96) como geode de referencia, debido a que el equipo con el que se trabaja es un equipo navegador y es por esa misma razón que el programa asigna una precisión de geolocalización estándar al proyecto. Seguidamente se identifica automáticamente el tipo de cámara con el que está dotado el dron la cual es una FC6310_8.8_5472X3648 (RGB); los valores corresponden a:

FC6310 = Modelo de la cámara.

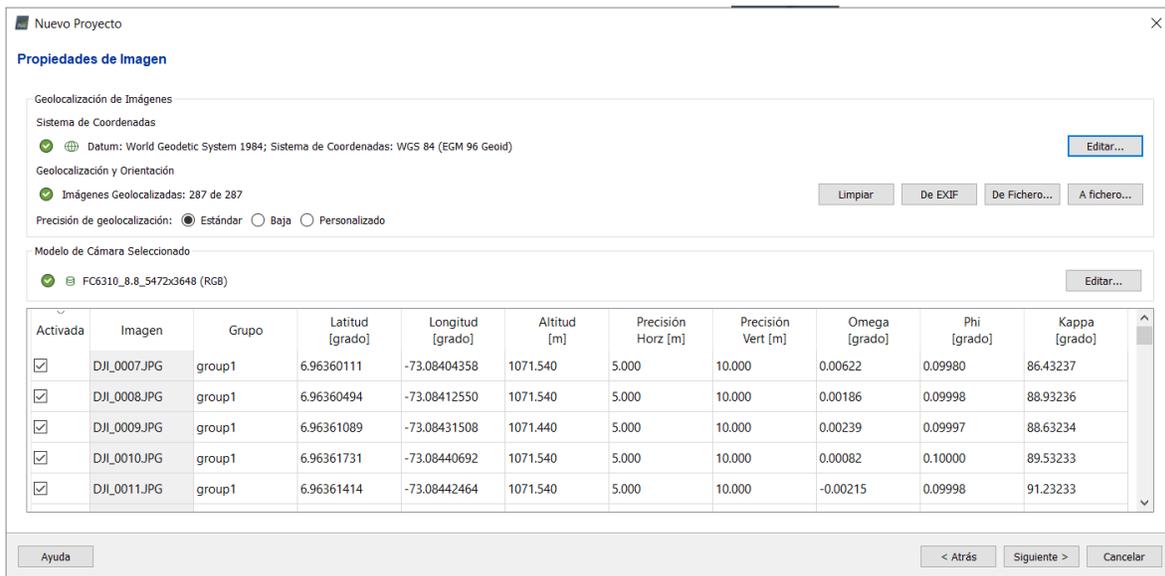
8.8 = Distancia focal de la cámara.

5472 (px de ancho) X 3648 (px de alto) = 19'961.856 px [20Mpx] – Tamaño de las fotografías.

RGB = Red – Green – Blue (Tres bandas de la cámara para el manejo de colores).

Figura 33.

Propiedades de fotografías y cámara



Fuente: Elaboración propia

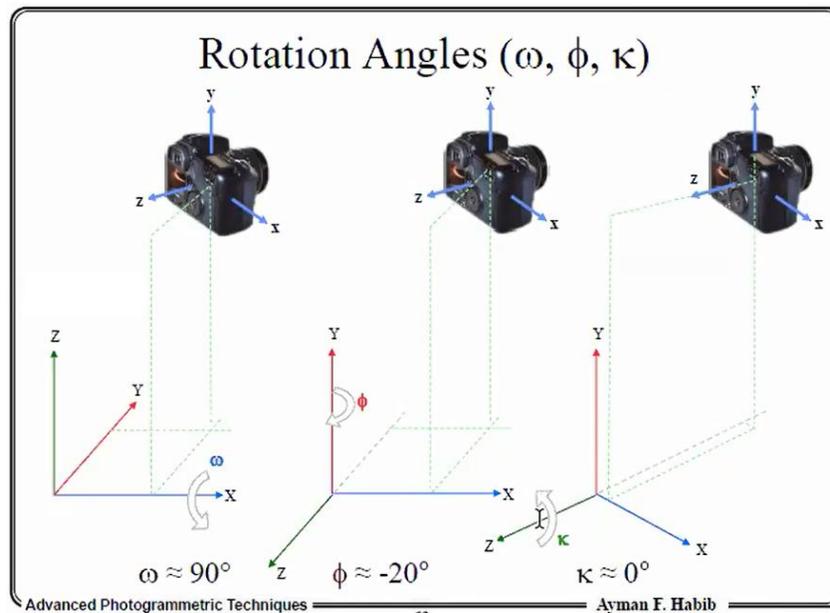
En la parte inferior de la imagen anterior, se observa como el programa clasifica todas las imágenes en un único grupo, esto debido al tipo de cámara utilizada (RGB) y le asigna una coordenada a cada uno de los centros de perspectiva de las fotografías en latitud, longitud y altitud, referida al sistema previamente mencionado con sus debidas precisiones propias de un equipo navegador (5 metro en la horizontal y 10 m en la vertical); dichas precisiones no tienen relación

con el trabajo ejecutado en campo, son simplemente indicadas de manera automatizada por el programa cuando este no conoce las precisiones reales, por lo que durante el procesamiento disminuirán al incorporar al trabajo los datos coordenados de los puntos de control materializados y georreferenciados, pasando a tener un error centimétrico.

Por último, se observan los valores de los ángulos Omega [ω], Phi [Φ] y Kappa [κ], los cuales indican la orientación de la cámara en cada uno de los tres ejes en el momento de tomar las fotografías, siendo Omega [ω] la rotación en el eje X, Phi [Φ] la rotación en el eje Y y Kappa [κ] la rotación en el eje Z.

Figura 34.

Ángulos de rotación de la cámara



Fuente: (Habib, s.f.)

Al continuar con la configuración del trabajo, se pasa a una nueva ventana en donde se selecciona el sistema de coordenadas al cual va a estar ligado el proyecto, pasando del sistema de

coordenadas internacional WGS-84 asignado por el software a un sistema de coordenadas local, que para nuestro caso es el MAGNA SIRGAS origen BOGOTA, el cual es indicado según el código *European Petroleum Survey Group* (EPSG) definido por el origen en donde se encuentre el proyecto, siendo para el actual ejercicio académico el origen central como se mostró en la figura No. 23 cuyo código EPSG es 3116; en cuanto al geoide internacional (EGM 96) asumido por el programa, debe ser actualizado al modelo geoidal oficial utilizado en Colombia; Pix4D Mapper no permite cargar un geoide local el cual para el presente caso es el GEOCOL 2004, pero debido a que los puntos de control durante su post proceso fueron referenciados al sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS origen BOGOTA utilizando el modelo geoidal GEOCOL 2004, al programa en la sección de “Sistema de coordenadas vertical” se le indica la opción “Arbitrario” de tal forma que el software asume las elevaciones de los puntos de control, ajustando toda la información al sistema nacional deseado.

Figura 35.

Selección de sistema de coordenadas de salida

The image shows a software dialog box titled "Nuevo Proyecto" with a close button (X) in the top right corner. The main heading is "Seleccionar Sistema de Coordenadas de Salida".

Under "Sistema de coordenadas seleccionado", there is a grid icon and the text "Datum: Marco Geocentrico Nacional de Referencia" and "Sistema de Coordenadas: MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone (2D)".

Under "Sistema de Coordenadas de Salida/Puntos de Apoyo", there is a "Unidad:" dropdown menu set to "m". Below it are three radio button options: "Sistema de coordenadas arbitrario [m]", "Auto detectado: WGS 84 / UTM zone 18N", and "Sistema de coordenadas conocido [m]" (which is selected). Below these is a search box containing "MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogota zone" and three buttons: "Desde PRJ...", "Desde la Lista...", and "Desde EPSG...".

A link is provided: "Más sistemas de proyección disponibles en <http://spatialreference.org/>".

Under "Sistema de coordenadas vertical", there are three radio button options: "MSL" (with a dropdown menu), "Altura del geoide GRS 1980 sobre el elipsoide [m]" (with a text input field), and "Arbitrario" (which is selected).

At the bottom, there is a checked checkbox for "Opciones avanzadas de coordenadas".

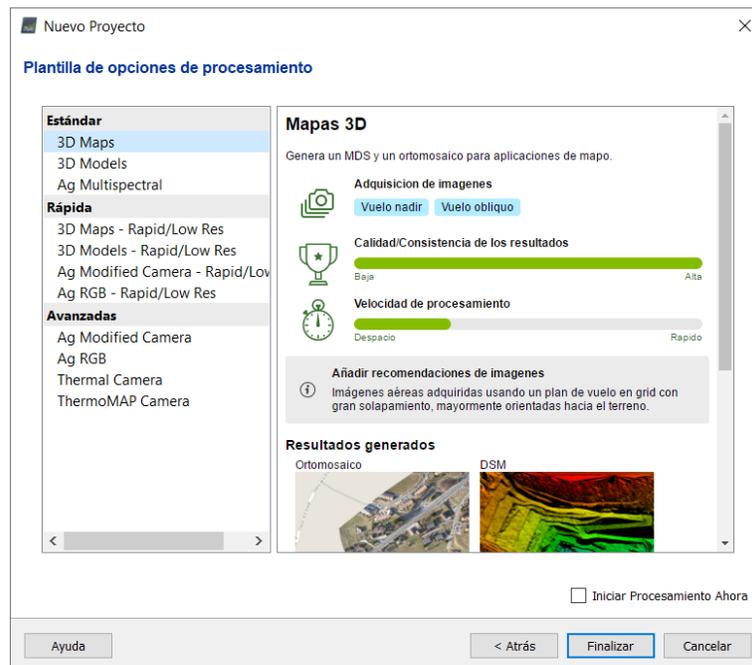
At the very bottom are four buttons: "Ayuda", "< Atrás", "Siguiente >", and "Cancelar".

Fuente: Elaboración propia

Después de seleccionar el sistema de coordenadas de salida del trabajo, el programa abre una nueva ventana en donde se despliega una serie de plantillas con diversas características según la necesidad del proyecto y el producto final que se desee obtener, el uso de estas plantillas está sujeto a un formato de imagen determinado (multiespectrales, térmicas, RGB, etc); como lo identificó el programa en los primeros pasos, las imágenes fueron adquiridas en campo con una cámara RGB por medio de un vuelo fotogramétrico nadiral con solapamiento del 80%, el producto que se necesita obtener es el ortofotomosaico y el MDT, por lo que la plantilla que se adapta a dicha necesidad es la plantilla 3D Maps, la cual permite realizar ejercicios tales como el cálculo de volumen, generación de líneas de contorno, digitalización de elementos naturales y artificiales, entre otros.

Figura 36.

Selección de plantilla de trabajo



Fuente: Elaboración propia

Tan pronto como se escoge la plantilla deseada, Pix4D abre una vista en planta satelital en donde se ve la grilla del plan de vuelo con el cual se adquirieron las imágenes a procesar, mostrando círculos rojos en los puntos en donde la cámara registró cada fotografía, siendo el círculo rojo de mayor tamaño el punto de partida del vuelo fotogramétrico. Pix4D Mapper recomienda asociar por lo menos 3 Puntos de Control Terrestres (GCP) en dos imágenes cada uno antes de configurar y ejecutar el paso No. 1 de procesamiento (Pix4Dmapper 4.1, s.f.), dichos puntos se cargan en formato .txt con un orden definido (Nombre, Norte, Este, Cota, Precisión Horizontal, Precisión Vertical) y sus datos deben estar separados por comas como se muestra en la siguiente imagen:

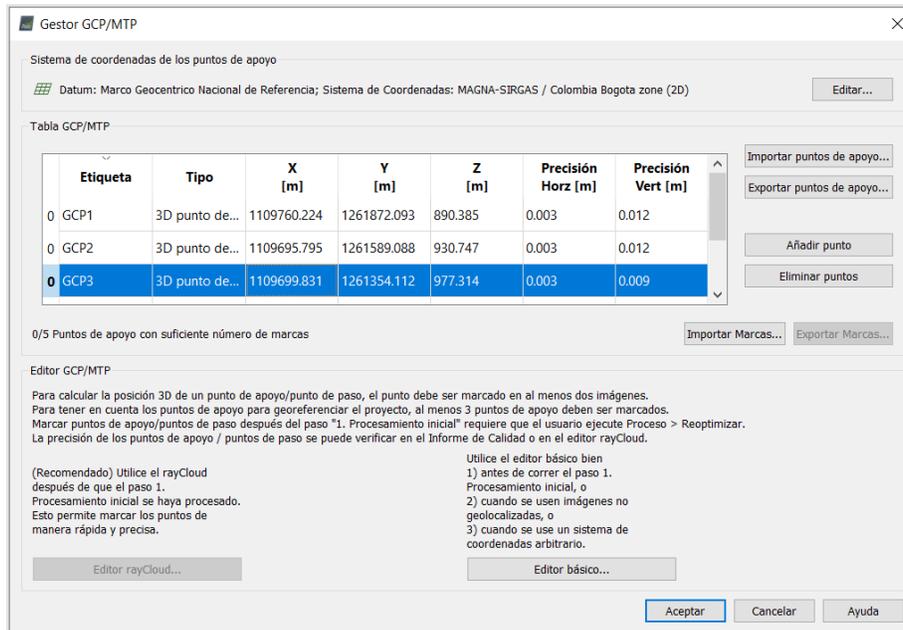
Figura 37.

Coordenadas de puntos de control (GCP)

```
GCP1,1261872.093,1109760.224,890.385,0.003,0.012  
GCP2,1261589.088,1109695.795,930.747,0.003,0.012  
GCP3,1261354.112,1109699.831,977.314,0.003,0.009  
GCP4,1261461.799,1109831.290,971.751,0.003,0.009  
GCP5,1261738.465,1109841.570,912.296,0.003,0.009
```

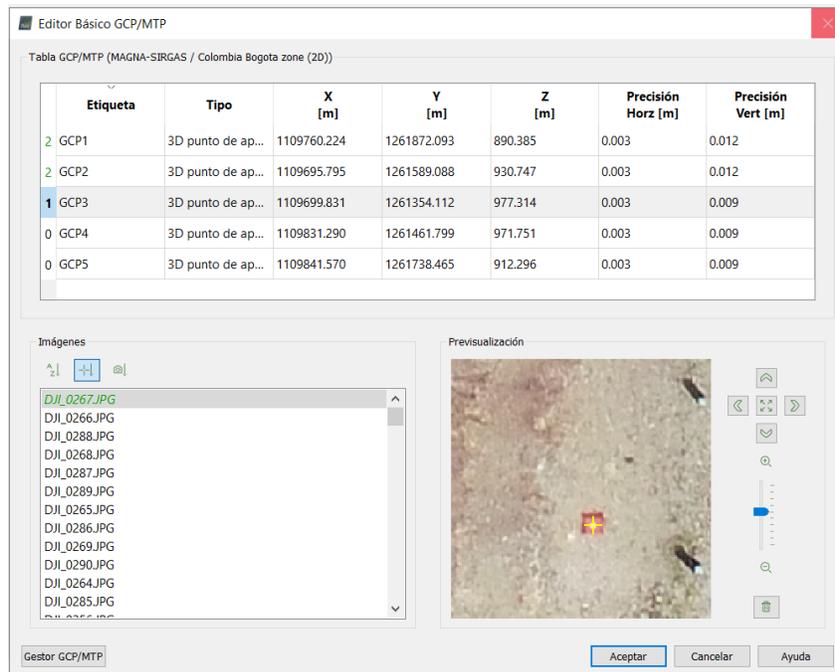
Fuente: Elaboración propia

Al cargar los datos de los puntos de control por medio de la opción “GCP/MTP Manager” el programa en la ventana auxiliar que abre no solo muestra los datos de los puntos de control, sino que además les asigna un “tipo” que es la forma en la que el software los asumirá y tratará en relación a las imágenes; los puntos de control al cumplir con su debido proceso de georreferenciación tienen una alta precisión en X – Y – Z, por lo que son puntos de control 3D de tal forma que todo el proceso se ajustará a sus coordenadas y cota.

Figura 38.*Carga de GCP's*

Fuente: Elaboración propia

En la imagen anterior se puede detallar en la parte inferior central, una opción llamada “Editor Básico”, la cual es la que permite asociar los 3 primeros GCP's a dos imágenes cada uno antes de dar inicio a la primera fase, con el fin de ajustar todas las imágenes durante el procesamiento inicial al sistema coordinado de los puntos de control; se puede detallar a la izquierda de la columna “Etiqueta” como la herramienta va indicando con números verdes las imágenes en las que un GCP determinado ha sido asociado.

Figura 39.*Asociación de GCP a imágenes*

Fuente: Elaboración propia

Tan pronto como se cargan los GCP's y se asocian tres de ellos en dos imágenes cada uno tratando de cubrir la mayor área posible de la manera más homogénea, se identifican en la grilla del plan de vuelo con una cruz de color azul (todos los GCP's, asociados y no asociados) como se detalla en la figura No. 40, en donde también se ve como si toco un círculo rojo de la grilla, este me despliega la fotografía exacta capturada por el dron en ese preciso punto.

Figura 40.*Imágenes y GCP's cargados*

Fuente: Elaboración propia

Para dar inicio a la primera etapa del proceso se acude a la parte inferior izquierda en “Opciones de procesamiento” en donde el programa permite modificar las características y valores predeterminados de la plantilla escogida con el fin de ajustar los procesos y resultados a las necesidades del proyecto. El software realiza el proceso total en tres pasos, brindando la posibilidad de ejecutarlos de manera consecutiva sin necesidad de su previa activación, pero no es recomendable debido a que entre cada uno de estos pasos es necesario hacer una debida revisión del estado actual del proceso y unos ajustes que garanticen la obtención de resultados óptimos de cada uno de ellos.

La ventana “Opciones de procesamiento” nos muestra para la etapa No. 1 (Procesamiento inicial) tres pestañas que permiten modificar los valores predeterminados para los métodos generales, de emparejamiento y calibración del proceso, los cuales se desglosan a continuación con el fin de mostrar la metodología usada para el tratamiento de la información.

En la primera pestaña (General) de la etapa No. 1 (Procesamiento inicial) se encuentra la posibilidad de modificar la escala de imagen de puntos clave con una serie de parámetros que se ajustan a diversas necesidades; un punto clave es un punto representativo que pertenece a una imagen determinada que el software genera automáticamente para más adelante realizar la tarea de emparejamiento, la cual consiste en buscar puntos homólogos en las imágenes; ajustar la escala de imagen de estos puntos clave es darle la orden al programa de cambiar el tamaño de la imagen según la necesidad que se tenga en cuanto a resultado y tiempo. Los valores de escala que el software ofrece para los puntos clave son:

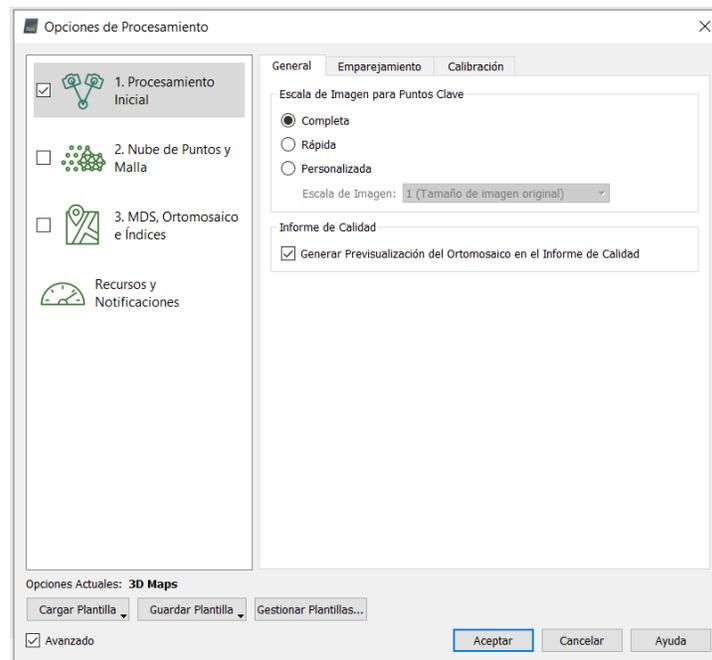
- COMPLETA (Predeterminada) - Tamaño original (mantiene la escala de la imagen).
- RAPIDA - $\frac{1}{4}$ de imagen (escala la imagen a un 25% de su tamaño original generando un tiempo de procesamiento menor a costa de perder calidad en la imagen ya que aumenta el tamaño del pixel).
- PERSONALIZADA – $\frac{1}{8}$ del tamaño original de la imagen.
 - $\frac{1}{4}$ del tamaño original de la imagen. (Opción anterior)
 - $\frac{1}{2}$ del tamaño original de la imagen.
 - 1 del tamaño original de la imagen (Primera opción).
 - 2 del tamaño original de la imagen (máxima calidad)

Para el presente proyecto se trabaja con la opción “COMPLETA” predeterminada que es la primera, manteniendo la escala original de las imágenes.

Seguidamente se encuentra la posibilidad de generar u omitir una pre visualización del ortofomosaico en el informe de calidad que genera el programa automáticamente al final de cada paso, para el presente ejercicio si se genera esta vista en cada uno de los informes de los procesos ejecutados.

Figura 41.

Configuración de la pestaña “General” de la etapa No.1



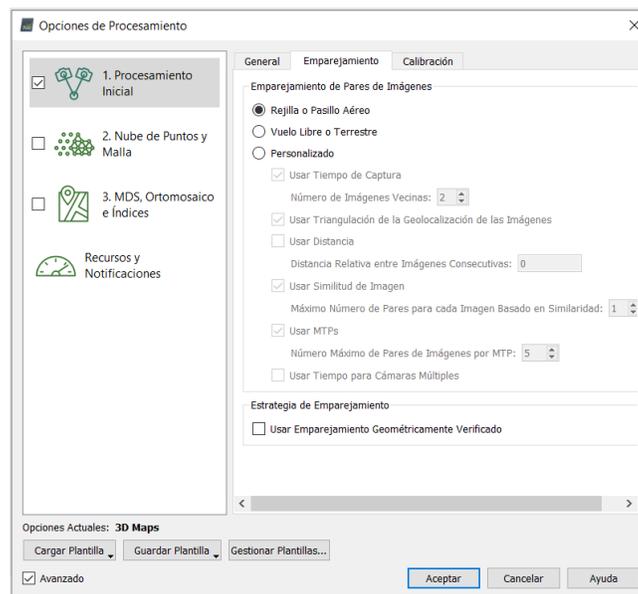
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, para la pestaña de “Emparejamiento” no es necesario generar ningún tipo de cambio debido a que el programa asume que la obtención de fotografías se realizó por medio

de una grilla de vuelo lo cual es correcto y para la última opción de esta pestaña “Estrategia de emparejamiento” no aplica ningún cambio ya que este campo se usa principalmente cuando son estudios de cultivos en donde es importante determinar el porcentaje de cobertura vegetal (Perea Moreno, Aguilera Ureña, Meroño de la Larriva, & Manzano Agugliaro, 2017) y dichas imágenes necesitan ser verificadas geoméricamente debido a la textura y similitud de las mismas.

Figura 42.

Configuración de la pestaña “Emparejamiento” de la etapa No.1



Fuente: Elaboración propia

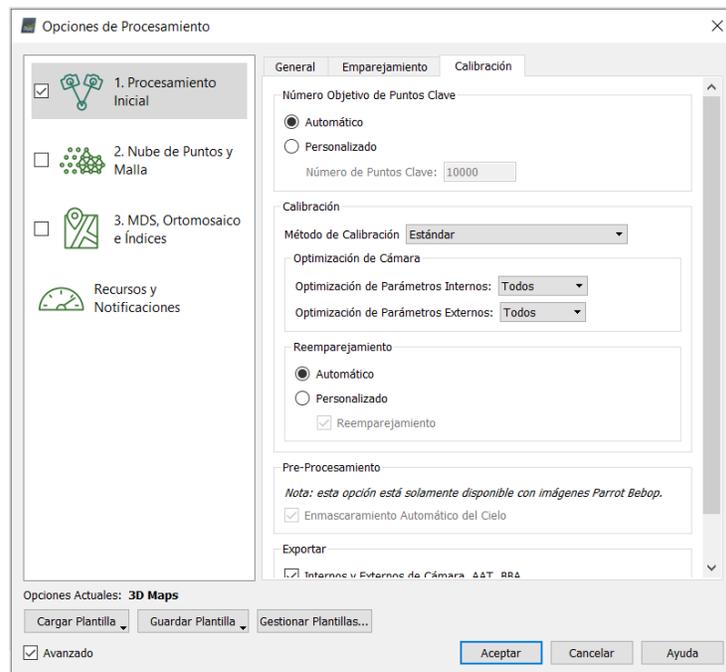
Por último, en la pestaña “Calibración” se encuentra en primera instancia el número de puntos clave que el software le exige a sus procesos alcanzar con el fin de obtener suficiente información para la calibración de las imágenes, dichos puntos claves requeridos por defecto de la plantilla es de 10000 los cuales mostraron un buen comportamiento en los resultados obtenidos para los vuelos de control por lo que no fue necesario modificar su valor. En el método de

calibración del programa se maneja el método estándar ideal para imágenes obtenidas con cámara RGB ya que el método alternativo aplica para imágenes multiespectrales cuyo emparejamiento requiere una verificación geométrica debido a texturas similares y homogéneas.

Para la optimización de parámetros internos y externos de la cámara, el re-emparejamiento y el pre-procesamiento se manejan valores predeterminados por la plantilla de trabajo, ideales para imágenes RGB

Figura 43.

Configuración de la pestaña “Calibración” de la etapa No.1



Fuente: Elaboración propia

Configurados los parámetros de la fase No. 1 se procede a la opción “Procesamiento” ubicada en la parte inferior izquierda del área de trabajo del software, la cual nos mostrará el avance de cada una de las fases y sus sub-procesos, en esta etapa el programa se encargará de:

- Recopilar información de la imagen.
- Generar normalizado en miniatura.
- Calcular los puntos clave.
- Emparejar las imágenes.
- Analizar los puntos de enlace automáticos.
- Calibrar las imágenes.
- Optimizar el proceso con la geoinformación.
- Generar el informe de calidad.

En la terminación de esta primera fase se puede observar cuando algunas imágenes no se calibran, esto se da principalmente en las imágenes ubicadas en los extremos del área de vuelo puesto que allí el programa cuenta con menos fotografías para trabajar y también se afecta al escalar la imagen de puntos clave en la configuración de parámetros de esta primera fase; estas imágenes no calibradas pasan a ser ignoradas por el programa para las siguientes fases ya que de ser usadas generarían errores en los resultados finales.

También se evidencia la discrepancia entre los centros de perspectiva de las fotografías en relación a su posicionamiento inicial con base en el sistema internacional de coordenadas al cual fueron vinculadas por el software (WGS-84 / EGM-96) y el posicionamiento final de las mismas

al ser asociadas a los puntos de control GCP's referenciados al sistema de coordenadas oficial para Colombia (MAGNA SIRGAS / GEOCOL 2004).

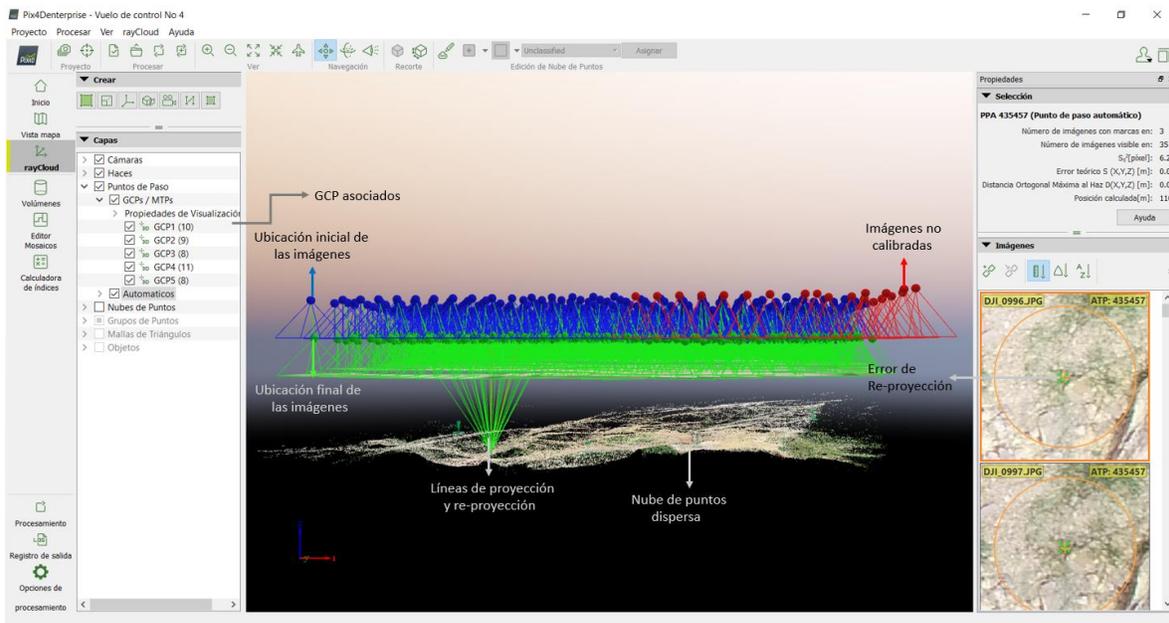
Como resultado final de este primer paso se obtiene una reconstrucción fotogramétrica visualizada a partir de la llamada *Nube de puntos dispersa* la cual está compuesta por puntos de paso automáticos (Automatic Tie Points - ATP -) generados por el programa los cuales provienen de la marcación de puntos clave en varias imágenes para pasar por un procesamiento interno de emparejamiento hasta proyectarlo como un ATP, después de esto el programa re-proyecta ese mismo punto hacia diversas imágenes tanto en aquellas en donde se marcó el punto original como en aquellas en donde no se marcó inicialmente, estas proyecciones y re-proyecciones se identifican en el software con líneas de color naranja y verde respectivamente al seleccionar un ATP cualquiera y pueden presentar una diferencia al ser revisadas en las fotografías por medio de la herramienta “rayCloud” en la barra de propiedades y dicha diferencia se conoce como *error de re-proyección*, este error debe ser menor a un pixel. El resumen del procesamiento y los resultados de esta primera fase se muestran en el informe de calidad que el programa arroja por defecto, dicho informe se va actualizando automáticamente al finalizar cada una de las dos etapas restantes por lo que al concluir la tercera fase se tendrá el informe de calidad final del proyecto.

Antes de iniciar con la segunda etapa del proceso, se deben asociar la totalidad de los GCP con las fotografías cargadas, esto se ejecuta por medio de la herramienta “rayCloud” en la pestaña de capas en donde el grupo de “puntos de paso” contiene los GCP que se cargaron y allí mismo se indican los tres primeros que se asociaron al inicio; al tocar cualquiera de los GCP montados al software, en la ventana de propiedades se muestran las imágenes en donde ese GCP aparece para

que de manera manual se le indique al programa la ubicación exacta de cada uno de ellos en al menos ocho imágenes (incluyendo los tres GCP que se utilizaron al principio); culminada esta tarea se re-optimiza el proceso de tal forma que el programa adopte la totalidad de los GCP montados y quede listo para continuar con la segunda parte del procesamiento, no sin antes generar el reporte de calidad nuevamente con el fin de actualizar datos y resultados después de cargar la totalidad de los GCP.

Figura 44.

Resultados de la fase No. 1



Fuente: Elaboración propia

La ventana “Opciones de procesamiento” muestra para la etapa No. 2 (Nube de puntos y malla) dos pestañas que permiten modificar los valores predeterminados correspondientes a la generación de la nube de puntos y de la malla 3D con textura del proceso las cuales se pasan a

desglosar a continuación con el fin de mostrar la metodología usada para el tratamiento de la información.

En la pestaña (Nube de puntos) se encuentra en la primera subdivisión la posibilidad de modificar la escala de imagen para la generación de la nube de puntos densificada con una opción adicional de “multi escala” que indica como el programa parte desde la escala que se le asigne, pasando por las diferentes escalas durante el proceso dependiendo de la textura de las imágenes, llegando normalmente a las escalas inferiores en zonas arborizadas para que sea más fácil la determinación de puntos de la nube densificada y tomando las escalas superiores para áreas urbanas en donde la identificación de objetos es más sencilla; los valores de escala que el software ofrece para los puntos clave son:

- Tamaño de imagen original - Lento (mantiene la escala de la imagen).
- $\frac{1}{2}$ del tamaño original de la imagen – Por defecto.
- $\frac{1}{4}$ del tamaño original de la imagen – Rápido.
- $\frac{1}{8}$ del tamaño original de la imagen - Tolerante

Para el presente proyecto se trabaja con la opción predeterminada que es la segunda, tomando $\frac{1}{2}$ de la escala original de las imágenes. En el segundo componente de esta primera subdivisión, se define la densidad de los puntos, esto consiste en indicarle al programa cada cuantos pixeles se desea obtener un punto 3D de la nube de puntos densificada, las posibilidades que brinda el software son:

- Alta (Lento) – El software genera un punto 3D de la nube de puntos densificada por cada pixel de las imágenes escalas.

- Óptima (Por defecto) – El software en esta opción toma la escala escogida en el paso anterior para trabajar bajo la siguiente ecuación (Pix4Dmapper 4.1, s.f.):

$$1 \text{ Punto 3D} = 4/\text{escala de imagen}$$

$$1 \text{ Punto 3D} = 4/0.5$$

$$1 \text{ Punto 3D} = 8 \text{ pixeles}$$

Eso quiere decir que por cada 8 pixeles el software generará un punto 3D de la nube de puntos densificada.

- Baja (Rápido) – El software en esta opción toma la escala escogida en el paso anterior para trabajar bajo la siguiente ecuación (Pix4Dmapper 4.1, s.f.):

$$1 \text{ Punto 3D} = 16/\text{escala de imagen}$$

$$1 \text{ Punto 3D} = 16/0.5$$

$$1 \text{ Punto 3D} = 32 \text{ pixeles}$$

Eso quiere decir que por cada 32 pixeles el software generará un punto 3D de la nube de puntos densificada.

Para el actual trabajo se toma la opción predeterminada que es la segunda (Óptima), tomando 1 punto 3D por cada 8 pixeles de las imágenes escaladas. En el tercer componente de esta primera subdivisión, se le indica al software cuantas veces debe ser re-proyectado como mínimo un punto en las imágenes para ser considerado punto 3D de la nube de puntos densificada, para el proyecto se le ordena que dichos puntos deben ser re-proyectados como mínimo 3 veces.

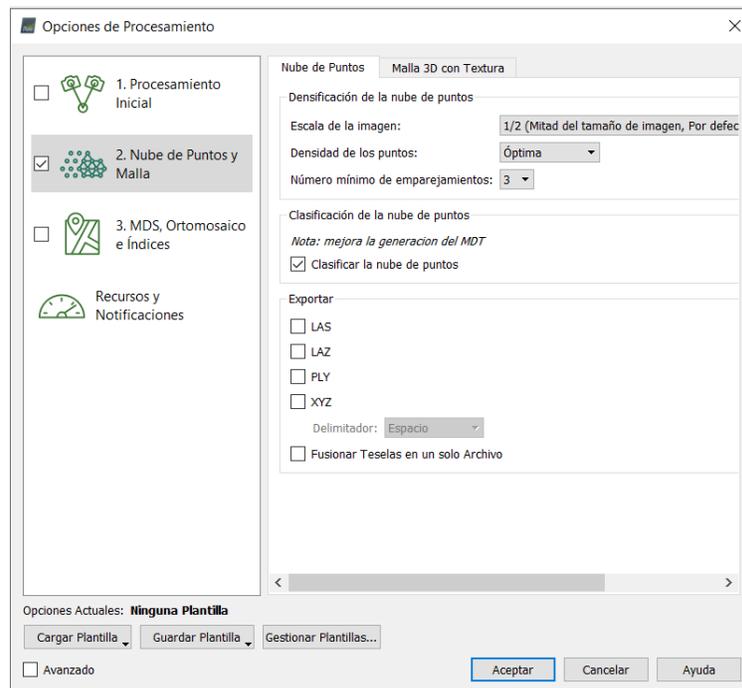
La segunda subdivisión de esta primera pestaña es fundamental ya que en este paso el programa pregunta si se desea hacer una clasificación de nube de puntos, esta clasificación es

primordial ya que a partir de ella se genera el Modelo Digital de Terreno (MDT) desde el cual se obtendrán las curvas de nivel de la superficie para el cálculo de volumen; dicho modelo raster (compuesto por píxeles) toma para su creación solo a los puntos pertenecientes al grupo suelo (ground), por lo que los puntos pertenecientes a otros grupos serán ignorados para la generación del MDT.

En la tercera subdivisión se tiene la posibilidad de exportar la nube de puntos densificada al formato que se desee (.LAS, .LAZ, .PLY, .XYZ).

Figura 45.

Configuración de la pestaña “Nube de puntos” de la etapa No.2

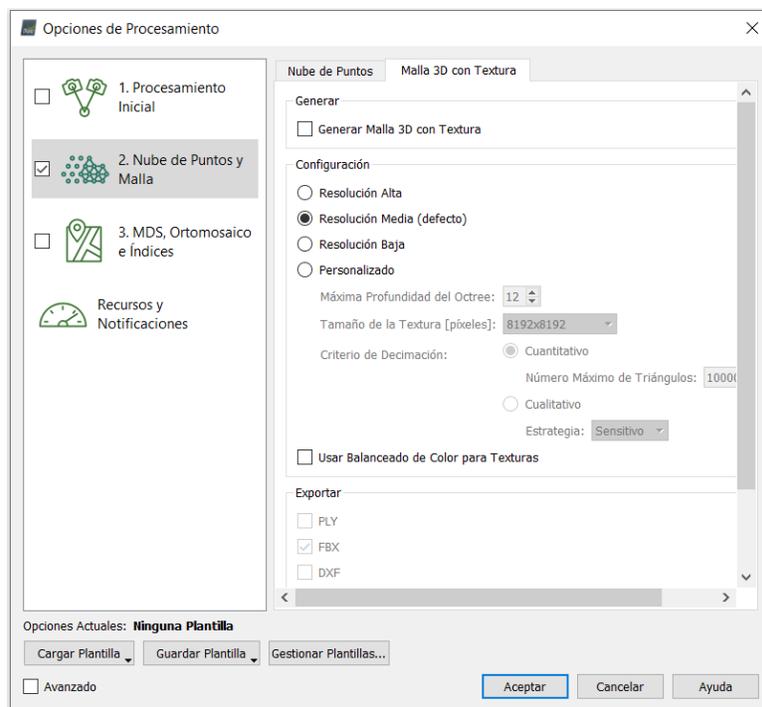


Fuente: Elaboración propia

En la segunda pestaña se encuentra la posibilidad de generar la malla 3D con textura bajo diferentes parámetros de resolución, para ser exportada en diversos formatos disponibles por el software; este producto no es necesario para el actual proceso puesto que es solo un resultado adicional generado a partir de la nube de puntos densificada por lo que simplemente no se genera.

Figura 46.

Configuración de la pestaña “Malla 3D con textura” de la etapa No.2



Fuente: Elaboración propia

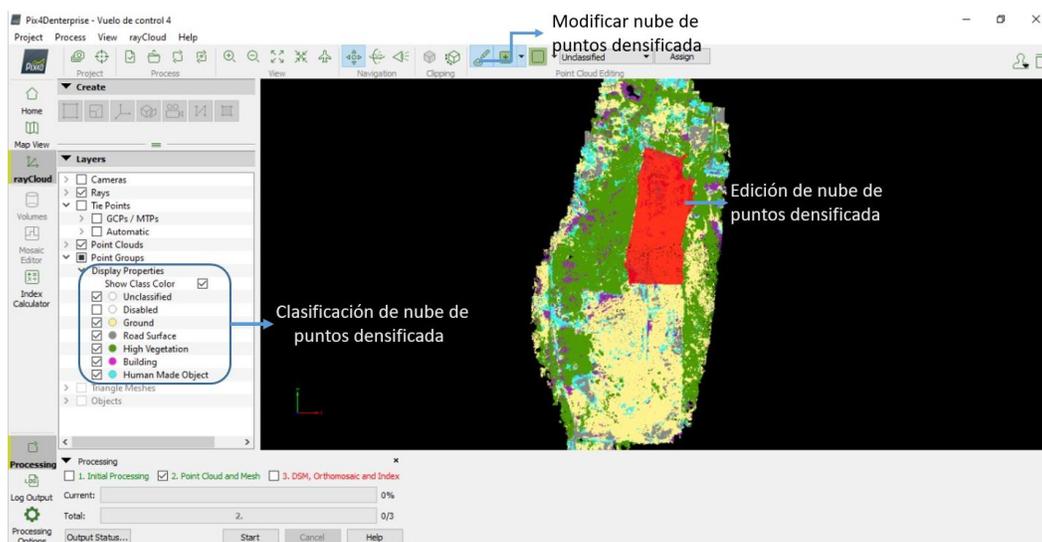
Configurados los parámetros de la fase No. 2 se pasa a la opción “Procesamiento” ubicada en la parte inferior izquierda del área de trabajo del software, en esta etapa el programa se encargará de:

- Procesamiento denso

El segundo resultado entregado por el programa es la clasificación de la nube de puntos densa la cual es visible por medio de la pestaña “*capas*” en la herramienta “*rayCloud*”; dado que las curvas de nivel requeridas para el cálculo de volumen provienen del Modelo Digital de Terreno (MDT) y de la clasificación previamente mencionada la cual es realizada por el software (para la generación de curvas de nivel el software solo toma los puntos clasificados dentro del grupo “*Ground*”), es necesario realizar una revisión debido a que dicha clasificación puede presentar diferencias importantes en relación a lo existente en campo, esta edición se desarrolla desde la opción “*Editar nube de puntos densificada*” presente en la barra de herramientas superior la cual permite vincular puntos deseados de un grupo determinado a otro, de esta forma todos aquellos puntos presentes en el área de superficie del movimiento de tierra que hayan sido clasificados erróneamente a otros grupos, pueden ser redirigidos al grupo “*Ground*” con el fin de garantizar un óptimo procesamiento en la generación de la curvas de nivel del área de trabajo requerida.

Figura 48.

Clasificación y edición de la nube de puntos



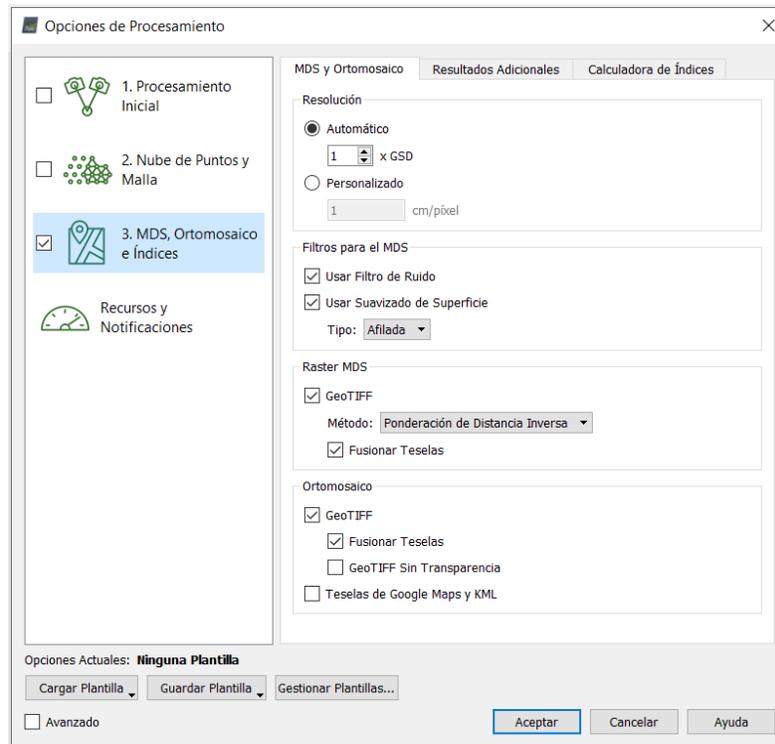
Fuente: Elaboración propia

La ventana “Opciones de procesamiento” muestra para la etapa No. 3 (MDS, Ortomosaico e Índices) tres pestañas, siendo las dos primeras las que permiten modificar los valores predeterminados correspondientes a la creación del Modelo Digital de Superficie (MDS), el Ortofotomosaico, el Modelo Digital de Terreno (MDT) y las curvas de nivel de superficie.

En la primera pestaña “*MDS y Ortomosaico*” se encuentran cuatro subdivisiones siendo la primera la resolución a la que se generará el MDS, en esta opción se deja el valor automático que es igual al valor del GSD (cm/pixel) promedio del proyecto; en esta misma parte podemos aumentar el valor del GSD con el fin disminuir tiempo de procesamiento a costa de obtener menor resolución. Cabe destacar que el programa toma el mismo valor de GSD con el que genera el MDS para crear el Ortofotomosaico. En la segunda subdivisión se ubican las herramientas de filtros para el MDS debido a que pueden salir puntos equívocos que generan el error denominado “*ruido*” el cual consiste en puntos 3D con alta variación en sus coordenadas que generan fallas en el modelo, en este caso se toma la opción “*Usar filtro de ruido*”; el error nombrado anteriormente conlleva a una superficie deforme y con fallas para lo cual se da uso al filtro “*Usar suavizado de superficie*”. En la tercera subdivisión se muestra la extensión en la que se exportará el MDS el cual es un archivo GeoTIFF debidamente georreferenciado, este archivo se genera por medio de un método de interpolación que se escoge en esta misma subdivisión y puede ser por triangulación o por ponderación de distancia inversa. La cuarta subdivisión muestra la extensión en la que se exportará el Ortofotomosaico según lo requerido por el proyecto.

Figura 49.

Configuración de la pestaña “MDS y Ortomosaico” de la etapa No.3



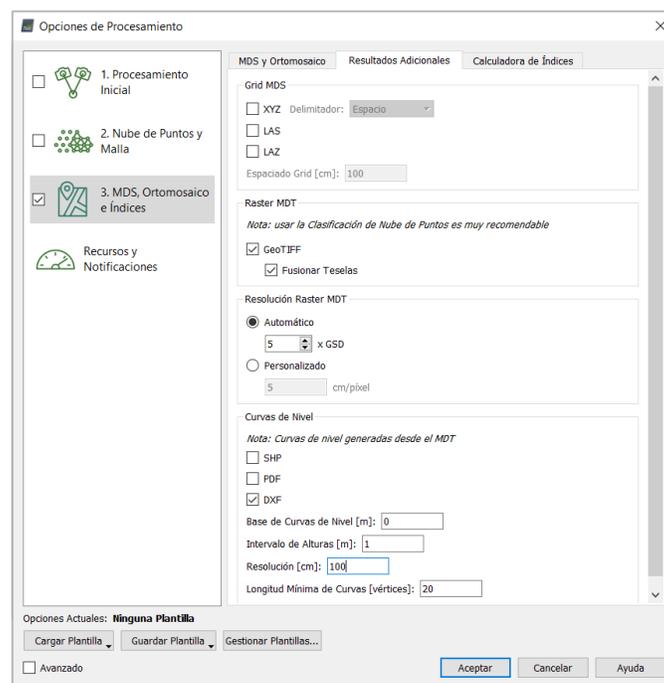
Fuente: Elaboración propia

En la segunda pestaña “*Resultados adicionales*” se hallan cuatro subdivisiones siendo la primera la posibilidad de exportar la cuadrícula del MDS en alguno de los formatos disponibles por el programa lo cual para el caso no es necesario. La segunda subdivisión de esta pestaña es fundamental para el proyecto debido a que en esta parte es donde se le ordena al programa crear el Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir del cual se generarán las curvas de nivel del área objeto de estudio; tal y como se mencionó anteriormente el software crea el MDT desde la clasificación de puntos de la nube densificada obtenida de la fase No. 2. La tercera subdivisión da la posibilidad de modificar el valor de GSD para la resolución del MDT, dicha resolución esta dada por el programa en función al GSD con el que se generó el MDS y el Ortofotomosaico, siendo

igual a cinco veces el valor de este; si se desea este valor se puede aumentar para disminuir tiempo de procesamiento a costo de perder resolución. La última subdivisión de esta segunda pestaña da la posibilidad de generar y exportar las curvas de nivel de la superficie a partir del MDT en el formato requerido que para el proyecto es .dxf, en esta misma parte se le indica la distancia, la resolución y longitud mínima a la que se desean crear las curvas de la superficie.

Figura 50.

Configuración de la pestaña “Resultados Adicionales” de la etapa No.3



Fuente: Elaboración propia

Configurados los parámetros de la fase No. 3 se pasa a la opción “Procesamiento” ubicada en la parte inferior izquierda del área de trabajo del software, en esta etapa el programa se encargará de:

- Cargar la nube de puntos

- Generar MDS
- Generar el Ortomosaico
- Generar el MDT
- Generar las curvas de nivel.
- Generar informe de calidad final.

En la terminación de esta tercera fase se obtiene el informe de calidad final del proceso en donde se exponen todos los resultados obtenidos, también quedan organizadas todas las carpetas creadas automáticamente por el software en su debido orden en donde se pueden encontrar los archivos correspondientes al MDT, MDS, Ortofotomosaico, Curva de nivel y demás archivos complementarios generados por el programa. Se anexa el informe de calidad del último vuelo de control ejecutado para su revisión (Ver Apéndice 8).

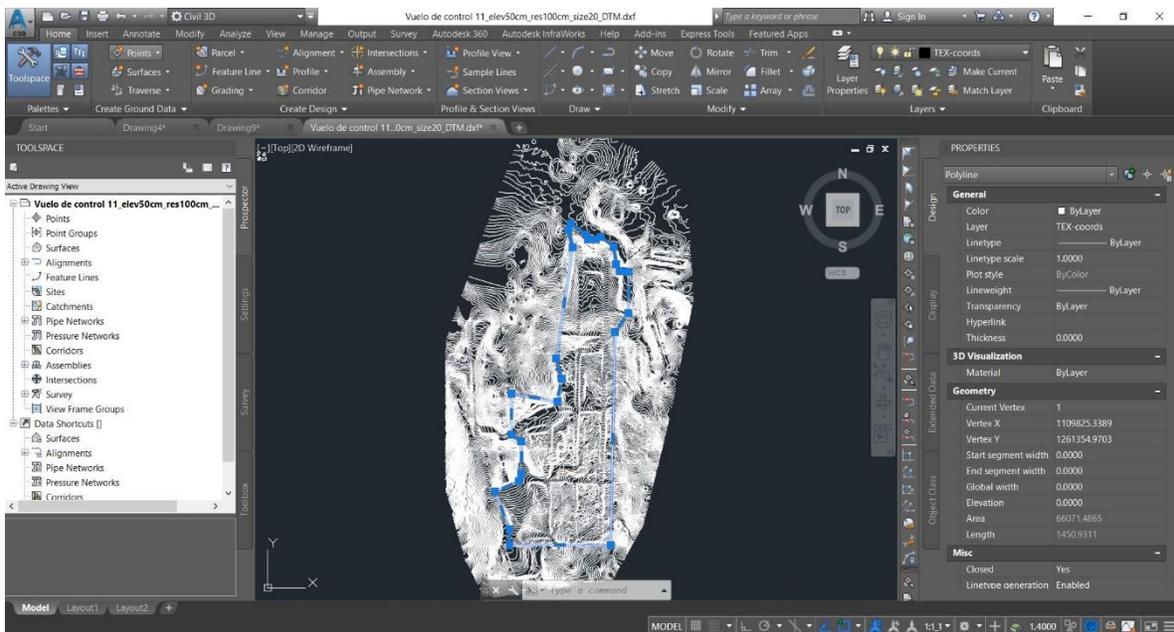
3.5.2 Calculo de volúmenes

Debido a la magnitud de la obra y al constante movimiento de tierra en diferentes partes de la misma, se optó por realizar el cálculo de volúmenes dando uso al software AutoCAD Civil 3D de la casa Autodesk a partir de las curvas de nivel obtenidas del proceso fotogramétrico de cada uno de los vuelos de control ejecutados. Este cálculo se llevó a cabo por medio de la superposición de superficies entre un vuelo y otro para de esta manera poder determinar volumen de corte y relleno ejecutado durante el tiempo transcurrido entre cada vuelo.

Se inició cargando en civil las curvas obtenidas por Pix4D Mapper en formato .dxf las cuales vienen como polilíneas con sus respectivas alturas; antes de crear la superficie fue necesario generar un polígono de corte base para todos los vuelos que se ajustara solo al área de trabajo puesto que Pix4D da la superficie completa del área de vuelo en donde salen zonas que no hacen parte del estudio, este polígono es la línea límite del área de trabajo para todos los vuelos con el fin de mantener uniformidad en los registros históricos; el corte de las polilíneas no deseadas se ejecuta por medio del comando “*extrim*” tomando como base el polígono previamente definido.

Figura 51.

Carga de curvas de nivel con polígono de trabajo



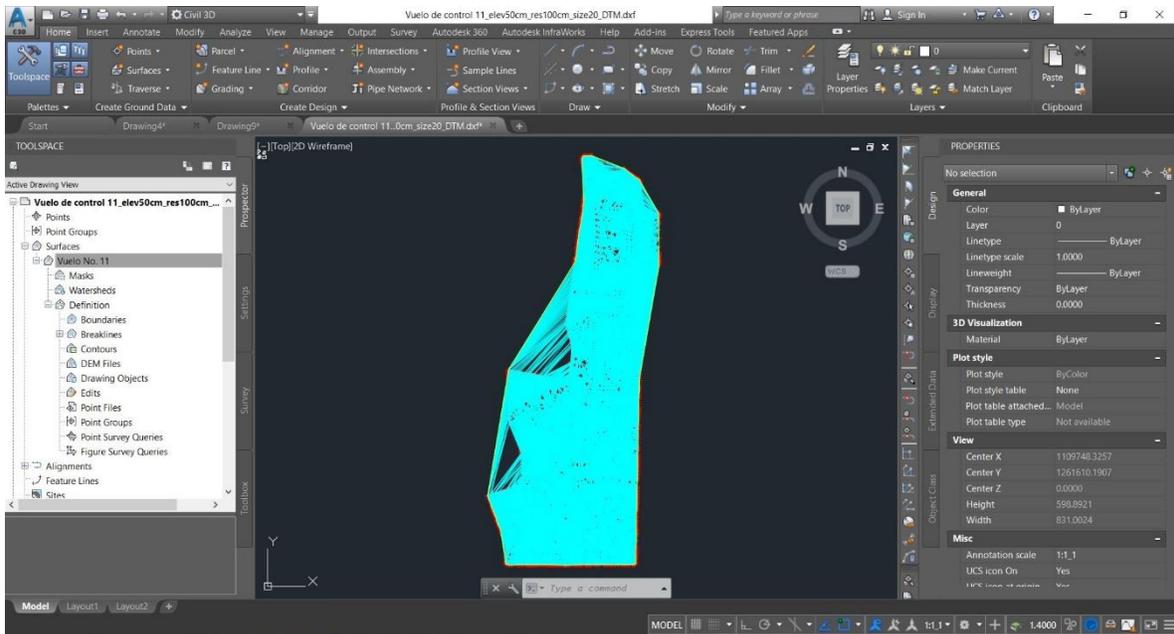
Fuente: Elaboración propia

Se procede a buscar en la paleta “*Prospector*” del “*Toolspace*” la pestaña “*Surface*” para desde allí crear y definir la superficie a partir de “*breaklines*” en donde se pide seleccionar

directamente del dibujo las curvas con las que se desea trabajar; es importante revisar la superficie creada con el fin de eliminar aquellas líneas de triangulación erróneas que durante el proceso de generación se puedan presentar, esto se trabaja desde la pestaña edición de la superficie y desde allí se modifica todo lo necesario de la misma.

Figura 52.

Edición de la superficie creada

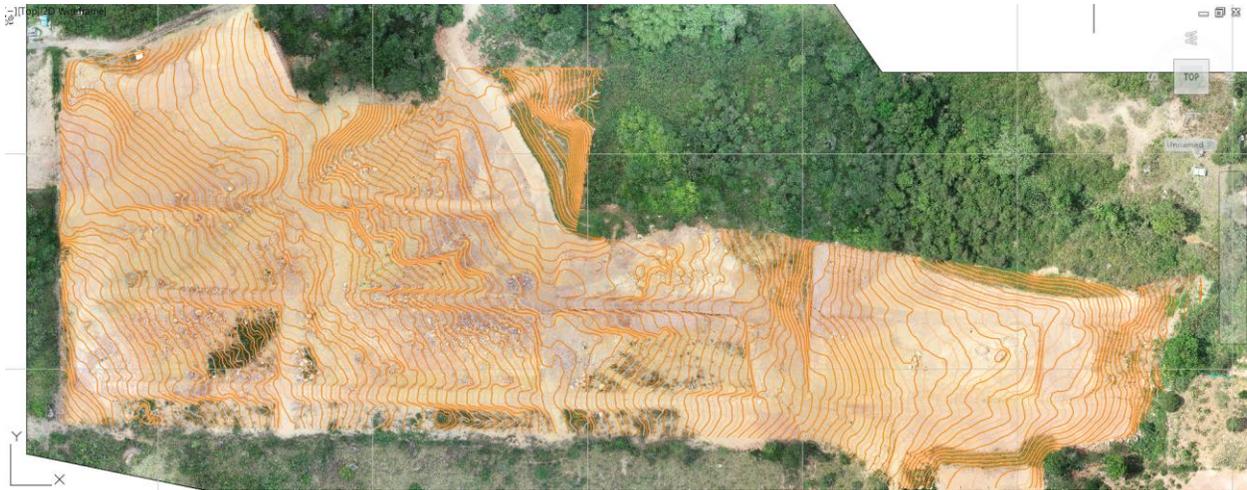


Fuente: Elaboración propia

Como parte final se exporta la superficie creada como archivo .xml para su posterior uso en los cálculos de volumen. Este proceso de creación de superficies aplica para todos y cada uno de los archivos de curvas de nivel entregado por Pix4D Mapper en sus procesos fotogramétricos.

Figura 53.

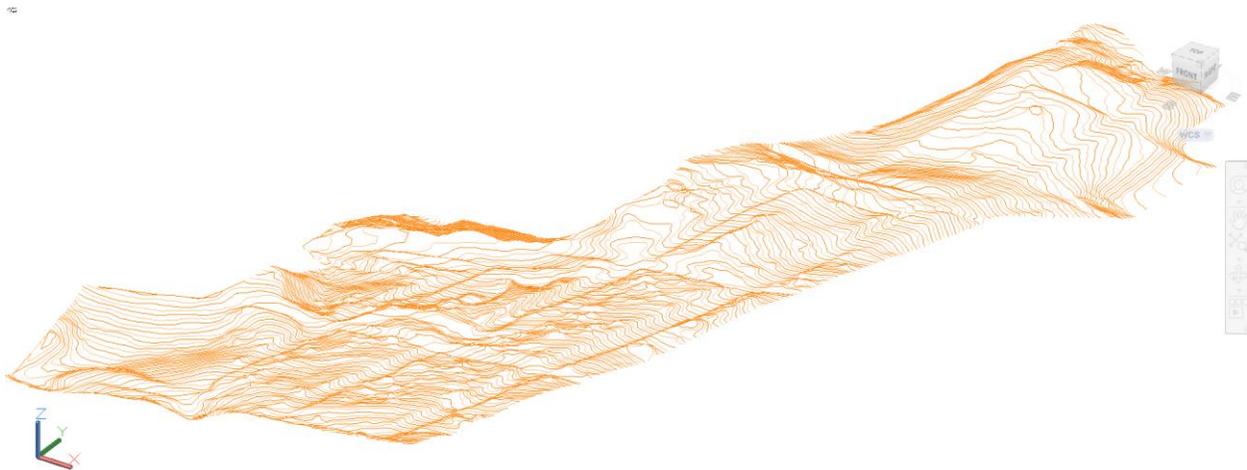
Superficie sobrepuesta en ortoimagen



Fuente: Elaboración propia

Figura 54.

Superficie obtenida para cálculos de volumen



Fuente: Elaboración propia

Después de tener creadas todas las superficies de trabajo para cada uno de los vuelos de control, se procede con el cálculo de volúmenes sobre-poniendo las superficies de vuelos deseadas con el fin de definir el volumen de relleno y corte ejecutado durante el tiempo entre los dos vuelos; a continuación se especifica el orden en que se realizaron los cálculos:

Tabla 4.

Relación de superficies para el cálculo de volumen

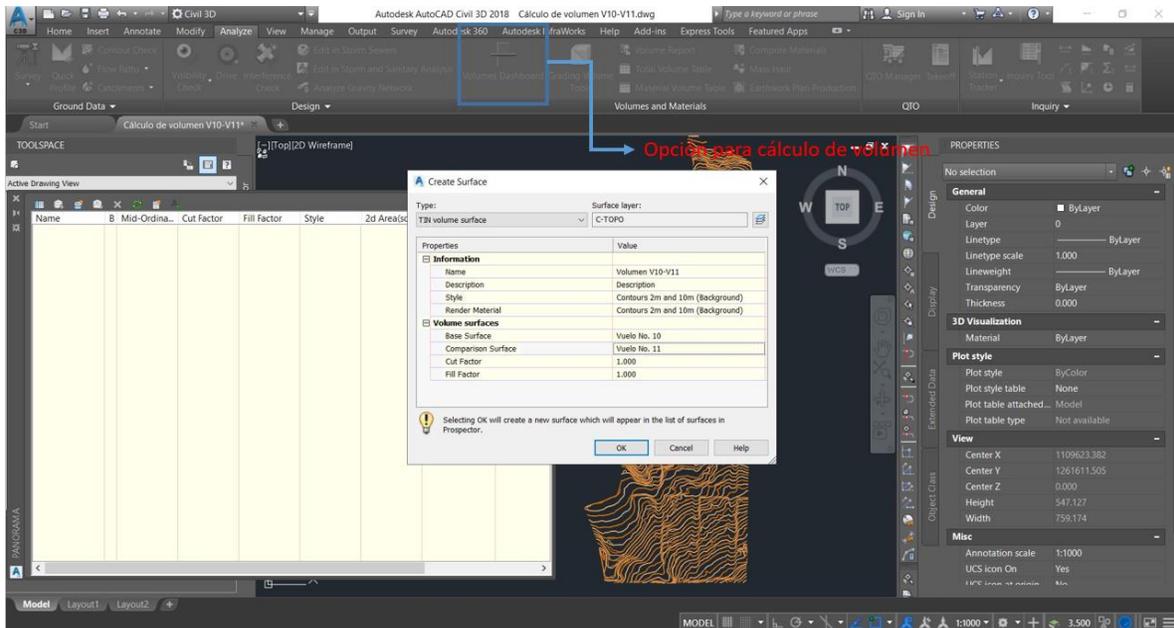
Cálculo No.	Superficie Base	Fecha de vuelo	Superficie de comparación	Fecha de vuelo
1	Superficie De Vuelo No. 1	17/07/2020	Superficie De Vuelo No. 2	24/07/2020
2	Superficie De Vuelo No. 2	24/07/2020	Superficie De Vuelo No. 3	31/07/2020
3	Superficie De Vuelo No. 3	31/07/2020	Superficie De Vuelo No. 4	8/08/2020
4	Superficie De Vuelo No. 4	8/08/2020	Superficie De Vuelo No. 5	14/08/2020
5	Superficie De Vuelo No. 5	14/08/2020	Superficie De Vuelo No. 6	21/08/2020
6	Superficie De Vuelo No. 6	21/08/2020	Superficie De Vuelo No. 7	28/08/2020
7	Superficie De Vuelo No. 7	28/08/2020	Superficie De Vuelo No. 8	4/09/2020
8	Superficie De Vuelo No. 8	4/09/2020	Superficie De Vuelo No. 9	11/09/2020
9	Superficie De Vuelo No. 9	11/09/2020	Superficie De Vuelo No. 10	27/11/2020
10	Superficie De Vuelo No. 10	27/11/2020	Superficie De Vuelo No. 11	4/12/2020
11	Superficie De Vuelo No. 1	17/07/2020	Superficie De Vuelo No. 11	4/12/2020

Fuente: Elaboración propia

Para iniciar con el cálculo se insertan las dos superficies deseadas en el formato .xml al cual fueron exportadas cuando se generaron, para luego ir a la pestaña “*Analizar*” y en el ícono “*Volumes Dashboard*” abrir la ventana auxiliar que permite relacionar las dos superficies de trabajo especificando la superficie base y la superficie de comparación.

Figura 55.

Cálculo de volumen por sobre-posición de superficies

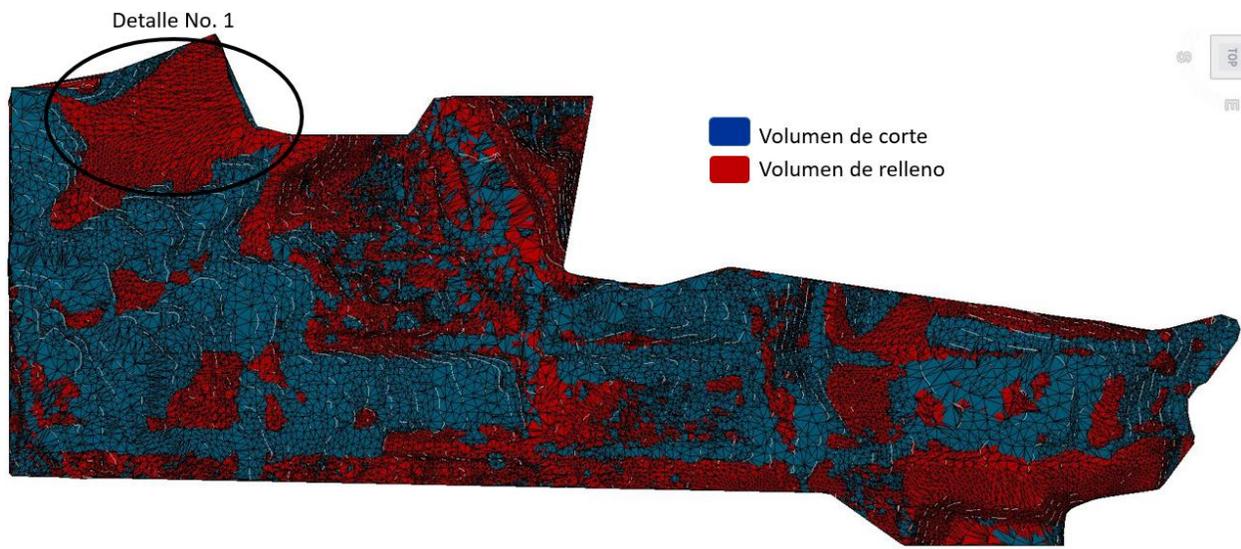


Fuente: Elaboración propia

Después de determinar el volumen de variación dado en el tiempo entre cada vuelo de control los cuales fueron trabajos generales de excavación para preparación del terreno y áreas de trabajo, se pasa a generar un último calculo el cual consistió en sobreponer la superficie creada para los datos del vuelo No. 1 y la superficie generada para los datos del vuelo No. 11 de tal forma que se halló la variación real entre el punto de partida y el punto final a lo largo de todo este periodo, dando así un valor de 23858.94 m³ de corte y 24628.00 m³ de relleno.

Figura 56.

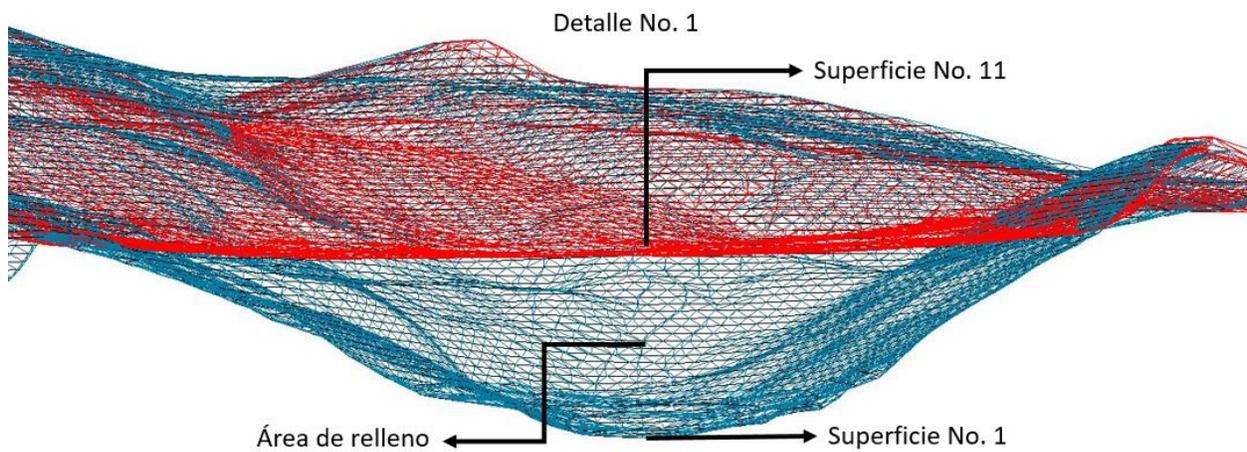
Sobre-posición de superficie No 1 - No. 11



Fuente: Elaboración propia

Figura 57.

Área de relleno entre superficie No.1 - No.11



Fuente: Elaboración propia

El resultado de los cálculos se refleja por medio de un informe que arroja AutoCAD Civil 3D en donde indica el área de trabajo, el volumen de corte, el volumen de relleno y el volumen neto (diferencia entre los dos anteriores). Con el fin de enriquecer el presente trabajo se muestra a continuación el informe de cantidad de volumen generado para el vuelo anteriormente especificado, los demás informes de cálculos de volúmenes podrán ser revisados en los anexos del presente trabajo.

Figura 58.

Informe de cálculo de volumen generado por AutoCAD Civil 3D

Cut/Fill Report

Generated: 2021-01-28 16:42:02
By user: Usuario
Drawing: D:\Documents\2020\Proyecto de grado - UPB\Vuelos - Proyecto de grado UPB\Cálculo de volúmenes\Volumen V1-V11\D:\Documents\2020\Proyecto de grado - UPB\Vuelos - Proyecto de grado UPB\Cálculo de volúmenes\Volumen V1-V11\Cálculo de volumen V1 - V11.dwg

Volume Summary							
Name	Type	Cut Factor	Fill Factor	2d Area (sq.m)	Cut (Cu. M.)	Fill (Cu. M.)	Net (Cu. M.)
Surface1	full	1.000	1.000	65929.05	23858.94	24628.00	769.07<Fill>

Totals					
		2d Area (sq.m)	Cut (Cu. M.)	Fill (Cu. M.)	Net (Cu. M.)
Total		65929.05	23858.94	24628.00	769.07<Fill>

* Value adjusted by cut or fill factor other than 1.0

Fuente: Elaboración propia

Se relaciona en la siguiente tabla el registro histórico de los movimientos de tierra ejecutados durante los vuelos de control:

Tabla 5.

Registro histórico de movimiento de tierra

Cálculo de volumen No.	Superficies Usadas (S.Base - S.Comp)	Volumen de corte (m3)	Volumen de relleno (m3)
1	Vuelo No. 1 - Vuelo No. 2	1793,45	7764,12
2	Vuelo No. 2 - Vuelo No. 3	4159,49	1611,37
3	Vuelo No. 3 - Vuelo No. 4	3877,39	4832,86
4	Vuelo No. 4 - Vuelo No. 5	11151,25	7016,55
5	Vuelo No. 5 - Vuelo No. 6	8028,37	12590,23
6	Vuelo No. 6 - Vuelo No. 7	6192,57	1958,47
7	Vuelo No. 7 - Vuelo No. 8	6412,74	504,01
8	Vuelo No. 8 - Vuelo No. 9	8293,1	3344,07
9	Vuelo No. 9 - Vuelo No. 10	14029,01	25275,21
10	Vuelo No. 10 - Vuelo No. 11	1739,8	1427,87
11	Vuelo No. 1 - Vuelo No. 11	23858,94	24628

Fuente: Elaboración propia

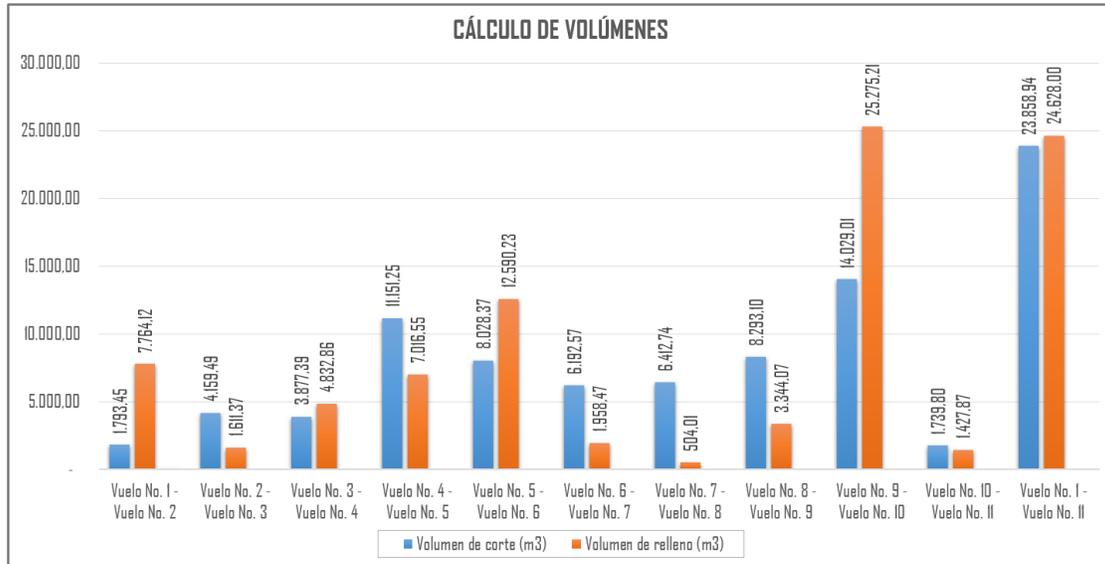
Con el fin de enriquecer el presente documento, se anexa a continuación el plano en planta de la ortoimagen y la superficie generada para el cálculo de volumen del vuelo No. 1; los demás planos podrán ser revisados en los anexos del presente informe.

4. Resultados y Discusión

Los cálculos de volúmenes a partir de las superficies generadas con las curvas de nivel provenientes de los procesos fotogramétricos evidencian grandes diferencias entre sí en relación a los intervalos de tiempo dados entre cada vuelo, esto debido a la forma en la que se desarrolla la obra pues el movimiento de tierra es constante pero la intensidad del mismo es variable, contando en ocasiones con 4 o 5 volquetas y otros días solo con 1 o 2, también se debe entender que el movimiento de tierra obedece a la necesidad de la fase en la que se encuentre el proyecto, por lo que termina siendo un producto de labores varias según la etapa de avance (adecuación de taludes, perfilaciones viales, rellenos, entre otros); así mismo el clima afecta el progreso de obra puesto que en los días con lluvia no se trabaja debido a que los carros corren el peligro de quedar atorados en las vías carreteables. Sumado a todo esto también se encuentra el tiempo en el que no se pudo visitar la obra debido a daños sufridos en el equipo de vuelo Phantom 4 Pro a causa de baterías, por lo que el lapso entre el vuelo No. 9 y vuelo No.10 fue de dos meses y medio, espacio en el que se evidencia el mayor movimiento de tierra en el registro de cálculos.

Figura 60.

Movimiento de tierra ejecutado entre vuelos de control



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se pueden observar como los cálculos de volumen ejecutados en relación a la superficie del vuelo No. 3 (Vuelo No. 2 – Vuelo No. 3 y Vuelo No. 3 – Vuelo No. 4) están en el valor promedio de los demás cálculos, esto se resalta porque tal y como se mencionó en el presente proyecto, dicho vuelo no se pudo terminar por motivos de lluvia y se procesó con los datos que el dron logró tomar durante el tiempo de trabajo (75% del plan de vuelo), con esa superficie inconclusa se realizaron los cálculos obteniendo valores que porcentualmente no se salieron del rango promedio de los demás vuelos de control, mostrando así la consistencia del trabajo fotogramétrico a lo largo del periodo de estudio.

Pasando a la revisión del avance de obra se puede observar en el siguiente plano en donde se compara la ortoimagen del vuelo No.1 (Planta superior) y la ortoimagen del vuelo No. 11 (Planta

inferior) los avances totales ejecutados a lo largo del periodo de estudio, como se evidencia en la fase No. 1 en donde inicialmente solo tenían trazos generales de la vía de acceso y actualmente ya han adelantado los trabajos de terraceos dándole manejo a los taludes de la parte inferior y a los presentes en los costados del predio, permitiendo así el avance en las vías de acceso que comunican esta fase con la vía principal. Pasando a revisar los avances de la fase No. 2 se encuentran los cambios más notorios pues en el momento en el que se dio inicio al presente proyecto, esta área no había iniciado trabajos por lo que al observar el progreso actual es fácil notar las vías ya definidas para cada manzana, junto con trabajos de manera especial en el área aledaña a la vía principal en donde estaba en proceso constructivo un muro en gaviones y a la fecha actual, no solo el muro está totalmente culminado, sino que además el trabajo de relleno del volumen proyectado fue cumplido a cabalidad; en áreas cercanas al relleno mencionado previamente se adelantaron limpiezas de las áreas verdes presentes, dándole paso a terraplenes de acceso al proyecto por ese sector.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El uso de la fotogrametría en el monitoreo del proyecto logró cumplir con los objetivos trazados, planteándose como una alternativa eficiente para el seguimiento de obras civiles no solo por la obtención de datos y resultados fiables, sino por el registro histórico visual que deja en sus memorias para futuras revisiones de etapas en procesos.

Con el fin de certificar la obtención de resultados de alta precisión se materializaron en campo un total de cinco puntos de control terrestres (GCP) y se georreferenciaron conforme a la normativa vigente nacional establecida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC); dichos puntos prestaron eficientemente el servicio de apoyo planeado en el inicio del proyecto ya que no solo ajustaron la información de los procesos fotogramétricos generados con un dron tipo navegador permitiendo reducir precisiones métricas a centimétricas, sino que además fueron los responsables de vincular al sistema nacional de coordenadas MAGNA-SIRGAS origen Bogotá el presente proyecto. Cabe resaltar que a la fecha los puntos materializados se encuentran en perfectas condiciones y quedan disponibles para su uso por parte del proyecto que amablemente permitió la ejecución del presente trabajo.

Por otro lado los factores de campo jugaron un papel más fuerte del que se planificó en el principio, pues la incierta temporada de lluvias nos obligó a dejar inconcluso un vuelo de control que no afectó los resultados finales, pero si pone sobre la mesa los riesgos que se asumen en campo

ante estas situaciones, en donde no solo puede afectarse el equipo de trabajo sino la información recolectada en la memoria del mismo en el caso de caer en zonas inhóspitas en las que hasta el personal de trabajo puede llegar a sufrir accidentes al tratar de recuperar la pieza tecnológica. La densidad arbórea también fue importante en las precauciones de vuelo, pues uno de los accidentes sufridos fue precisamente con la copa de un árbol ubicado en la parte sur del predio debido a la pérdida de señal entre el dron y el mando de control, lo que llevó al equipo a perder altura hasta llegar al lugar previamente mencionado. Pasando a los elementos artificiales, merece la pena nombrar la línea eléctrica de alta tensión que durante todo el proceso fue el principal foco de cuidado con el fin de no poner en riesgo el equipo por cercanía a dicha línea, por lo que siempre se mantuvieron alturas de vuelo que garantizaran pasar por encima de ella con una diferencia no menor a los 35 metros.

En lo relacionado con el uso de esta metodología para el control de movimiento de tierra y seguimiento de obra, se logró pasar el umbral marcado inicialmente, pues no solo se llevaron registros históricos de volúmenes sino que se hizo integrando diversos programas de varios campos de acción empezando desde la georreferenciación de los puntos de control con MAGNET Tools, pasando por Pix4d Mapper como software de procesamiento fotogramétrico, hasta llegar a Autocad Civil 3D para la integración de superficies y posteriores cálculos de volúmenes. De esta manera se logró ejecutar un proceso de campo y oficina que permitió al presente proyecto utilizar la fotogrametría como metodología alterna al seguimiento de obras civiles.

Referencias Bibliográficas

Aviastar. (s.f.). *Breguet-Richet Gyroplane No.1 1907*. Obtenido de http://www.aviastar.org/helicopters_eng/breguet_gyro.php

CJI INCorporates HDMI Technology. (2017). *Phantom 4 PRO/PRO+ User Manual V 1.4*.

Costales Acuario, G. A. (2018). *Análisis comparativo entre los software de prueba AGISOFT PHOTOSCAN y PIX4D para el procesamiento de datos obtenidos con fotogrametría de vehículo aéreo no tripulado (UAV) de bajo costo aplicado a proyectos de medio ambiente*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.

Fuentes González, J. A., & Camargo Jaimes, M. A. (2018). *Exactitud de la restitución fotogramétrica usando vehículos aéreos no tripulados a partir de un levantamiento topográfico convencional*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil.

Guerrero, S., Faranone, M., & Carrión, R. (2018). Aplicación de fotogrametría y modelación 3D en geología y minería; el granito de cobre. *Revista Investigaciones DINAMIGE-MIEN 1(1)*.

Habib, A. F. (s.f.). Chapter 1. Photogrammetric Bundle Adjustment. *Advanced Photogrammetric Techniques*.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). Anexo 2. Especificaciones técnicas para levantamiento topográfico o planimétrico predial, en el marco de los requerimientos de la Ley 1682 de 2013, la resolución 193 de 2014 y la resolución conjunta 1732 (SNR) y 221 (IGAC) de 2018 - Casos puntuales. *Resolución No. 643 "Por la cual se adoptan las especificaciones técnicas de levantamiento planimétrico para las actividades de barrido predial masivo y las especificaciones técnicas de levantamiento topográfico o planimétrico para casos puntuales*.

Jauregui, L. (s.f.). *Introducción a la fotogrametría*.

- Lincoln, D. A. (2017). *Aplicacion de métodos fotogramétricos mediante vehículos aéreos no tripulados para plano catastral en San Juan de Lurigancho 2017*. Perú: Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
- Núñez Muñoz, J. M. (2019). *Propuesta metodología para la medición de volúmenes en obras civiles mediante el uso de fotogrametría*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.
- Pacheco A., C. E., & Pozzobon B., E. N. (2006). *Manual de ejercicios de laboratorio. Fotogrametría y fotointerpretación*. Universidad de Los ANdes: Venezuela.
- Perea Moreno, A. J., Aguilera Ureña, M. J., Meroño de la Larriva, J. E., & Manzano Agugliaro, F. (2017). Empleo de la fotogrametría digital para la evaluación del suelo con riesgo de erosión en olivar. *Dyna* 92(1), 55-62.
- Pix4Dmapper 4.1. (s.f.). *User Manual*.
- Quiros Rosado, E. (s.f.). *Introducción a la fotogrametría y Cartografía aplicadas a la ingeniería civil. 1º Ed.* España: Universidad de Extremadura.
- Santamaria Peña, J., & Saenz Mendez, T. (2011). *Fundamentos de fotogrametría*. Universidad de La Rioja.
- Santos Clavero, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. Escuela Politécnica Superior d' Edificació de Barcelona.

Apéndices