



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Influencia de la configuración de  
vuelo autónomo para determinar  
modelos digitales de superficie en  
la interfase playa-duna**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geomático**

**PRESENTA**

Julen Villaseñor Aguirre

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Francisco Javier Flores de Santiago



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **Agradecimientos**

Quiero agradecer primeramente a mis padres Julio Villaseñor Arreola e Hilda Aguirre Duran, quienes siempre me han estado acompañando y apoyando para poder alcanzar mis metas y propósitos. Agradezco todos los consejos, esfuerzos y sacrificios que realizaron para poder llegar hasta donde estoy, así como también agradezco todo el amor que me brindan.

Quiero agradecer a la familia con conforme con mi esposa Lic. Karla A. Andres Cervantes y mi hijo Julen Villaseñor Andres, la mujer con la que he estado compartiendo mi vida, que ha estado conmigo a cada paso que doy, agradezco el haber crecido juntos profesionalmente y también agradezco todo el apoyo que me ha brindado y todas las experiencias que hemos vivido, agradezco que hemos podido crecer juntos mentalmente, emocionalmente y muchos otros aspectos. Agradezco a mi hijo porque también me apoya y me ha sabido entender y esperar, también me ha ayudado a crecer y desarrollarme como persona además de ser mi mayor motivación para seguir adelante. Agradezco a mi esposa y a mi hijo porque es por ellos que también he podido crecer como persona.

Agradezco a todos los que fueron mis profesores durante toda mi formación académica, agradezco a todos los profesores que compartieron su conocimiento, sus experiencias y lograron transmitir su conocimiento y que me ayudaron a desenvolverme durante mi etapa de estudiante, quiero agradecer todas las técnicas, estrategias, apoyos y asesorías que me brindaron y me han permitido desarrollar y mejorar mis habilidades para poder entrar en el mundo laboral. Agradezco no solo a los profesores desde el preescolar hasta la universidad, más bien que también agradezco a todas las personas que me brindaron su conocimiento y me han ayudado a progresar y a ser un mejor ingeniero.

Agradezco también mis hermanas Jazmín y Julieta que también me apoyaron y he aprendido cosas de ellas también, agradezco que también han estado siempre conmigo. Doy gracias al resto de mi familia, mis primos, mis tíos, cuñadas, concuños, amigos, compañeros colegas y camaradas que he conocido a lo largo de este recorrido y que han

aportado con su granito de arena y han aportado algún conocimiento o experiencia que me ha permitido mejorar.

Y por último quiero agradecerme a mí, por creer en mí, por esforzarme todos los días, quiero agradecerme a mí por nunca darme por vencido, quiero agradecerme a mí por motivarme a seguir saliendo adelante, me agradezco a mí por tratar de mostrar siempre una actitud positiva, me agradezco el siempre permitirme aprender y hacer cosas nuevas, me agradezco a mí por siempre ser yo.

Agradezco también a los apoyos de los Proyectos PAPIIT IA100218 y IA100521, ya que ellos financiaron las campañas de campo.

# Contenido

RESUMEN.....	6
Índice de ilustraciones.....	7
Índice de tablas .....	12
Introducción.....	13
1. Fotogrametría.....	15
1.1. Fotogrametría aérea .....	17
1.1.1. Fotografía aérea.....	17
1.2. Fotogrametría digital.....	18
1.2.1. Características de imágenes digitales.....	19
1.2.2. Plan de vuelo y traslape .....	20
1.3. VANT .....	21
1.3.1. Sensores para los VANTs .....	22
1.3.2. Ventajas y desventajas .....	23
1.4. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	24
1.5. Colecta de imágenes.....	26
1.5.1. Anemómetro.....	26
1.5.2. Phantom 4 advanced.....	27
1.5.3. MapPilot (aplicación para iOS) .....	29
1.6. Procesamiento digital .....	30
1.6.1. Agisoft metashape (software de procesamiento).....	32
1.6.2. ArcGIS (software de análisis e interpretación de datos).....	33
1.6.3. Surfer (software para análisis de los perfiles topográficos) .....	34
2. Objetivos .....	35
2.1. Objetivo general .....	35
2.2. Objetivos particulares .....	35
3. Hipótesis.....	36
4. Justificación.....	37
5. Materiales y método.....	38
5.1. Área de estudio .....	38

5.2. Levantamiento de perfiles topográficos .....	41
5.2.1. Perfil topográfico.....	41
5.2.2. Vuelos fotogramétricos .....	42
5.2.3. Procesamiento .....	43
6. Resultados .....	59
7. Conclusiones.....	74
8. Referencias.....	76

## RESUMEN

Gracias a la tecnología con la que contamos en estos tiempos, la forma de recolectar información, incluso de la superficie de la Tierra ha ido mejorando, y por lo tanto los aparatos o herramientas que se utilizan ayudan a dar un mejor rendimiento al momento de recolectar información, así como el tiempo en su procesamiento y una mejor interfaz para manipulación de la misma, y de esta forma poder contar con más recursos a la hora de tomar decisiones en alguna zona u obras de infraestructura.

En este estudio se hace una comparación de información obtenida mediante métodos de levantamientos topográficos directos (levantamiento RTK con GPS diferencial) y métodos de levantamientos indirectos (vuelos fotogramétricos), buscando los parámetros que se deben seguir en un plan de vuelo, que a su vez permitan que la información topográfica obtenida a partir de levantamientos fotogramétricos (sin utilizar puntos de control terrestres) sea lo más aproximada a la superficie real.

Para esto se realizaron nueve vuelos fotogramétricos sobre una misma zona, en este caso el lugar es la Bahía Santa María la Reforma en Sinaloa, cada vuelo se realizó a una altura distinta, el primer vuelo fotogramétrico se realizó a una altura de 40m, y los vuelos posteriores se fueron realizando de tal manera que la altura de vuelo aumentaba 10m con respecto al vuelo anterior, así sucesivamente hasta que el último vuelo se llevó a cabo en una altura de 120m.

Gracias a que cada vuelo recolecto la información de la misma área, pero con una variación de altura, después de un análisis de datos se logró ver el vuelo que arroja mejores resultados. Para encontrar cual es la altura optima a la que se debe volar una aeronave, se tuvo que hacer una comparación entre perfiles topográficos generados por modelos digitales de terreno y perfiles topográficos obtenidos directamente en campo mediante un levantamiento topográfico en tiempo real, de esta forma se pudo observar el comportamiento de la superficie de todos los perfiles topográficos y el área que comprenden.

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Estereoscopio de Espejos.....	16
Ilustración 2 Fotogrametría aérea.....	17
Ilustración 4 Fotografía Oblicua alta.....	18
Ilustración 3 Fotografía aérea vertical.....	18
Ilustración 5 Sistema de coordenadas imagen para una imagen digital.....	20
Ilustración 6 Superposición transversal.....	21
Ilustración 7 Superposición longitudinal.....	21
Ilustración 8 Fotografía del anemómetro utilizado en este estudio.....	27
Ilustración 9. VANT Phantom 4 advanced.....	28
Ilustración 10 Captura de pantalla del plan de vuelo de este estudio a 40m de altura.....	30
Ilustración 11 Captura de pantalla del plan de vuelo de este estudio a 80m de altura.....	30
Ilustración 12 Modelo de información geográfica basado en capas.....	31
Ilustración 13 Muestra del modelo digital de superficie de un vuelo fotogramétrico a 40m de altura, obtenido mediante el proceso de Agisoft Metashape.....	33
Ilustración 14 Esquema que muestra que los SIG pueden estar disponibles a través de cualquier navegador web.....	34
Ilustración 15 Imagen capturada en campo.....	38
Ilustración 16 Espectaculares paisajes de arena, Ciencia UNAM.....	39
Ilustración 17 Imagen capturada en campo donde se observa el Dr. Francisco Javier Flores de Santiago.....	40
Ilustración 18 Imagen satelital obtenida por el Dr. Francisco Javier Flores de Santiago donde se muestra la bahía Santa María La Reforma.....	40
Ilustración 19 Imagen satelital donde se muestra más de cerca la bahía Santa María La Reforma.....	41
Ilustración 20 Imagen donde se muestra la zona de estudio y los perfiles topográficos realizados.....	42
Ilustración 21 Añadir imágenes.....	43
Ilustración 22 Ubicación aproximada de la lente al momento de realizar la captura de cada imagen.....	43
Ilustración 23 Alineación de fotos.....	43
Ilustración 24 Parámetros para la alineación de las imágenes.....	44
Ilustración 25 Vista de la pantalla de trabajo al realizar la alineación.....	44
Ilustración 26 Crear nube densa (de puntos).....	45

Ilustración 27 Parámetros para crear la nube densa.....	45
Ilustración 28 Visualización de la nube densa en el panel de trabajo.....	45
Ilustración 29 Construcción de la malla.....	46
Ilustración 30 Parámetros para la construcción de la malla.....	46
Ilustración 31 Crear textura para generar el ortomosaico.....	47
Ilustración 32 Parámetros para generar la textura.....	47
Ilustración 33 Crear Modelo Digital de Superficie o elevaciones.....	47
Ilustración 34 Parámetros para la creación del DEM.....	48
Ilustración 35 Exportar DEM a formato TIFF.....	48
Ilustración 36 Generación del reporte de procesamiento.....	49
Ilustración 37 Mostrar los puntos de las coordenadas de cada trayecto.....	49
Ilustración 38 Cuadro para determinar los campos de valores X y Y.....	50
Ilustración 39 Herramienta para crear una polilínea a partir de puntos.....	51
Ilustración 40 Visualización de un trayecto antes y después de aplicar la herramienta para crear la polilínea.....	51
Ilustración 41 Herramienta para unir shapes.....	52
Ilustración 42 Raster del Modelo Digital de Elevaciones de la superficie.....	52
Ilustración 43 Herramienta "raster calculator".....	53
Ilustración 44 Recuadro para operar con el archivo ráster.....	53
Ilustración 45 Herramienta "interpolate shape".....	54
Ilustración 46 Cuadro de operaciones de la herramienta "Interpolate Shape".....	54
Ilustración 47 Ráster con los shapes de los trayectos superpuestos.....	55
Ilustración 48 Activar pestaña "3D Analyst" en la barra de herramientas (toolbar).....	55
Ilustración 49 Comando para desplegar la vista de perfil de un trayecto.....	56
Ilustración 50 Grafica donde se percibe los perfiles topográficos de los transectos seleccionados.....	56
Ilustración 51 Como exportar los datos del grafico del perfil topográfico.....	56
Ilustración 52 Recuadro para seleccionar el formato y características sobre las cuales se van a exportar los gráficos.....	57
Ilustración 53 Ejemplo de cómo deben de ser cargados los archivos de coordenadas en el software.....	57
Ilustración 54 Ejemplo de cómo se debe insertar cada perfil topográfico.....	58
Ilustración 55 Perfil topográfico visualizado en el panel de trabajo del software Surfer.....	58
Ilustración 56 Recuadro que muestra las características del polígono.....	58

Ilustración 57 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.....	61
Ilustración 58 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.....	61
Ilustración 59 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.....	62
Ilustración 60 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie, en este caso se observa que los perfiles generados con la información de los vuelos a una altura mayor de 90m presentan variaciones a la hora de describir la superficie. ....	62
Ilustración 61 Perfil topográfico del transecto 1, medido con GPS en modo RTK. Área = 1950m <sup>2</sup> ..	63
Ilustración 62 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2060.6m <sup>2</sup> . ....	63
Ilustración 63 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2125.32m <sup>2</sup> . ....	63
Ilustración 64 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2124.17m <sup>2</sup> . ....	63
Ilustración 65 Perfil topográfico del transecto 2, medido con GPS en modo RTK. Área = 2404.50m <sup>2</sup> ..	64
Ilustración 66 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2547.50m <sup>2</sup> . ....	64
Ilustración 67 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2630.97m <sup>2</sup> . ....	64
Ilustración 68 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2872.47m <sup>2</sup> . ....	64
Ilustración 69 Perfil topográfico del transecto 3, medido con GPS en modo RTK. Área = 2488.50m <sup>2</sup> ..	64
Ilustración 70 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2378.87m <sup>2</sup> . ....	64
Ilustración 71 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2496.20m <sup>2</sup> . ....	64
Ilustración 72 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2661.10m <sup>2</sup> . ....	65
Ilustración 73 Perfil topográfico del transecto 4, medido con GPS en modo RTK. Área = 2324m <sup>2</sup> ..	65
Ilustración 74 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2425.82m <sup>2</sup> . ....	65
Ilustración 75 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2527.83m <sup>2</sup> . ....	65

Ilustración 76 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2659.44m <sup>2</sup> .	65
Ilustración 77 Perfil topográfico del transecto 5, medido con GPS en modo RTK. Área = 2378.5 m <sup>2</sup> .	65
Ilustración 78 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2305.31m <sup>2</sup> .	65
Ilustración 79 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2430.06m <sup>2</sup> .	65
Ilustración 80 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2638.91m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 81 Perfil topográfico del transecto 6, medido con GPS en modo RTK. Área = 2586m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 82 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2466.11m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 83 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2592.96m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 84 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2729.12m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 85 Perfil topográfico del transecto 7, medido con GPS en modo RTK. Área = 2925 m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 86 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2747.68m <sup>2</sup> .	66
Ilustración 87 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2851.90m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 88 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 3013.02m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 89 Perfil topográfico del transecto 8, medido con GPS en modo RTK. Área = 2488 m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 90 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2489.02m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 91 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2601.06m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 92 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2745.59m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 93 Perfil topográfico del transecto 9, medido con GPS en modo RTK. Área = 3034 m <sup>2</sup> .	67
Ilustración 94 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2489.02m <sup>2</sup> .	68
Ilustración 95 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2489.02m <sup>2</sup> .	68

Ilustración 96 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2747.46m <sup>2</sup> . .....	68
Ilustración 97 Perfil topográfico del transecto 10, medido con GPS en modo RTK. Área = 2358.50m <sup>2</sup> . 68	
Ilustración 98 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2810.04m <sup>2</sup> . .....	68
Ilustración 99 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2849.77m <sup>2</sup> . .....	68
Ilustración 100 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2855.69m <sup>2</sup> . .....	68
Ilustración 101 Perfil topográfico del transecto 11, medido con GPS en modo RTK. Área = 2707.5m <sup>2</sup> . 69	
Ilustración 102 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2840.23m <sup>2</sup> . .....	69
Ilustración 103 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2910.81m <sup>2</sup> . .....	69
Ilustración 104 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2915.58m <sup>2</sup> . .....	69

## Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados según su estructura.....	22
Tabla 2 Ventajas y desventajas del uso de drones para fotogrametría.....	24
Tabla 3 Información del procesamiento digital de los vuelos de acuerdo a cada altura de vuelo. ....	59
Tabla 4 Errores en las proyecciones de acuerdo a cada altura de vuelo. ....	60
Tabla 5 Diferencias de áreas del transecto 1 de los dem con respecto a la superficie real.....	69
Tabla 6 Diferencias de áreas del transecto 2 de los dem con respecto a la superficie real.....	70
Tabla 7 Diferencias de áreas del transecto 3 de los dem con respecto a la superficie real.....	70
Tabla 8 Diferencias de áreas del transecto 4 de los dem con respecto a la superficie real.....	70
Tabla 9 Diferencias de áreas del transecto 5 de los dem con respecto a la superficie real.....	71
Tabla 10 Diferencias de áreas del transecto 6 de los dem con respecto a la superficie real. ....	71
Tabla 11 Diferencias de áreas del transecto 7 de los dem con respecto a la superficie real.....	71
Tabla 12 Diferencias de áreas del transecto 8 de los dem con respecto a la superficie real. ....	72
Tabla 13 Diferencias de áreas del transecto 9 de los dem con respecto a la superficie real. ....	72
Tabla 14 Diferencias de áreas del transecto 10 de los dem con respecto a la superficie real. ....	72
Tabla 15 Diferencias de áreas del transecto 11 de los dem con respecto a la superficie real. ....	73
Tabla 16 Resumen de la eficacia que puede brindar la información de un vuelo fotogramétrico con respecto a su altura de vuelo.....	75

## Introducción

Debido a los avances tecnológicos que surgen diariamente en muchas ramas de la ciencia, la posibilidad de adquirir y procesar información espacial para una gran cantidad de proyectos a realizar se ha vuelto más eficiente y automatizada. En particular, tratándose de la fotogrametría en la geomática y la topografía, las innovaciones tecnológicas permiten obtener datos de la superficie terrestre de manera remota con métodos emergentes.

Utilizar estos métodos y/o herramientas emergentes beneficia a los campos del conocimiento y ha permitido su evolución, de tal forma que, con el paso de los años ha dado lugar a nuevas ramas de estudio. En este sentido, se abordará la fotogrametría de manera particular, la cual es una técnica para realizar levantamientos topográficos y obtener información del terreno.

La utilización de aparatos como los drones (vehículos aéreos no tripulados) permiten ahorrar tiempo al momento de recolectar datos de áreas extensas de una forma más eficiente y así poder levantar perfiles de la zona, de tal forma que se puede obtener la configuración del terreno en cuestión de horas, mientras que, al utilizar sistemas en campo como la estación total, la recolección de datos puede demorar días, incluso semanas.

Las imágenes provenientes de los drones se complementan con sistemas de posicionamiento global (GPS) que permiten ajustar las coordenadas que brinda un dron. Es recomendable utilizar puntos de control terrestres, los cuales deben distinguirse de cierta forma para que puedan ser apreciados por la cámara de las aeronaves. Un GPS brinda exactitud de metros a milímetros al momento de obtener las coordenadas de un punto. Sin embargo, hasta la fecha puede ser muy costoso contar con aparatos como GPS diferencial, o incluso puede haber lugares donde no se puedan colocar puntos de control terrestres, esto en zonas arenosas, zonas de extensa vegetación, donde los objetos utilizados para reconocer los puntos de control pueden cubrirse o perderse por las condiciones del terreno, como el dosel de la vegetación.

En el presente estudio se pretende analizar la información captada por un dron y compararla con la información obtenida mediante perfiles topográficos. En este caso, los

perfiles topográficos brindaran la información real de la superficie, debido a que este método entra en contacto directo con el suelo del área de estudio. Se pretende que el dron pueda arrojar resultados similares a los perfiles sin la necesidad de puntos de control terrestre, pero hay que considerar que al ser un método de levantamiento indirecto no entra en contacto con la superficie y puede tener ciertas variaciones.

## 1. Fotogrametría

De acuerdo con Brinker y Wolf (1982), la fotogrametría se define como la ciencia y técnica que permite obtener información cuantitativa y cualitativa a partir de fotografías. Se puede dividir en medicional e interpretativa, donde la primera se refiere a la determinación de distancias y elevaciones del terreno o área de estudio, utilizando principalmente ortomosaicos obtenidos a partir de fotografías aéreas, aunque puede haber casos donde se utilicen fotos terrestres. La fotogrametría interpretativa, hace referencia al reconocimiento de objetos dentro de las fotografías, de sus características específicas y su significado, principalmente se toman en cuenta factores como tamaño, configuración, sombra, tono y textura.

La fotogrametría ha evolucionado con el paso de los años, sus inicios datan de 1839 con la invención de la fotografía, donde las primeras fotografías aéreas eran capturadas desde globos aerostáticos. Aunque, la etapa de la fotogrametría analógica fue caracterizada por la invención del aeroplano, así como de la visión estereoscópica. La fotogrametría se estableció como un método eficiente para la ejecución de levantamientos topográficos y para la cartografía; desde antes de la segunda guerra mundial se establecieron los principios fundamentales de esta técnica, los cuales hasta hoy en día siguen vigentes.

Dentro de este campo, Brinker (1982) incluye el concepto de paralaje estereoscópica, el cual lo define como un desplazamiento aparente de la posición de un objeto con respecto a un marco de referencia, en el cual se puede observar un corrimiento en el punto de observación, donde un punto de la superficie es función del relieve y utilizando ciertos métodos es posible calcular la elevación de algún objeto o edificio, así como sus coordenadas topográficas en latitud y longitud. Por ejemplo, se puede apreciar la altura de un edificio, cuando a través de un estereoscopio se observa un par de fotografías, la altura es apreciada porque en ambas fotografías se observaría la misma edificación, pero vista desde dos ángulos distintos. El estereoscopio de despejos es una de las principales herramientas para trabajar la paralaje entre dos fotografías.



*Ilustración 1 Estereoscopio de Espejos. Fuente: Facultad de Ingeniería de la UNAM. ([http://dicyg.fi-c.unam.mx/html/infraestructura/laboratorios/fotogrametria/galeria\\_fotogrametria.html](http://dicyg.fi-c.unam.mx/html/infraestructura/laboratorios/fotogrametria/galeria_fotogrametria.html))*

La fotogrametría analítica inició con la invención de los ordenadores y desarrollo de la tecnología para capturar información (cámaras) y para almacenar información. La fotogrametría digital surge unos años antes del 2000, donde se comienza a tratar con imágenes en lugar de fotografías.

Hoffitt y Mikhail (1980), también incluyen a la fotogrametría aérea dentro de la percepción remota debido a que la mayoría de los sistemas remotos se ven involucrados en la interpretación de fotografías aéreas. Ellos consideran que dentro del proceso fotogramétrico existe una combinación de información medicional e interpretativa.

La fotogrametría es de gran utilidad en el campo de la ingeniería, en el caso de la geomática se ve implicada dentro de la rama de topografía, sin embargo, esta técnica de recolección de información es utilizada en distintos campos de estudio como lo son la geología, arqueología, el servicio forestal, en la agricultura, para la conservación ecológica, para planificación, en operaciones militares, carreteras o investigación de accidentes. (Wolf, 1982).

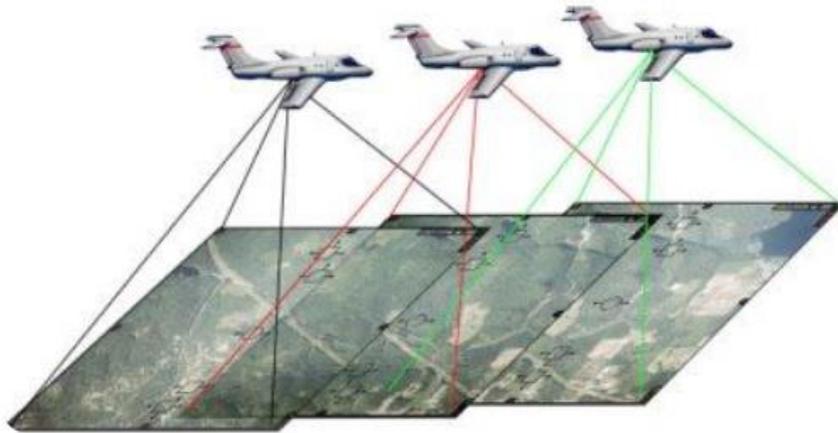


Ilustración 2. Fotogrametría aérea. Fuente: ALLPE Topografía, (<https://www.allpe.com/>)

### 1.1. Fotogrametría aérea

La aerotopografía, como lo mencionan Brinker y Wolf (1982) se aplica principalmente en la determinación de distancias y elevaciones de terreno o en la elaboración de mapas ortopográficos. En la fotogrametría moderna Hoffitt y Mikhail (1980) hablan de la existencia de sistemas que capturan datos a través de sistemas fotogramétricos más convencionales, por ejemplo, imágenes de radar, detección de energía electromagnética radiante e imágenes de rayos X.

La fotogrametría aérea se caracteriza porque las fotografías del terreno en un área determinada son tomadas ordenadamente en una secuencia con exactitud por una cámara montada en una aeronave volando sobre la superficie.

#### 1.1.1. Fotografía aérea

Se llama fotografía aérea debido a que es realizada a bordo de vehículos aeronáuticos. Wolf (1982) también menciona que las aerofotos se clasifican en verticales (tratando de acomodar la lente lo más verticalmente posible de la superficie) y oblicuas (cuando la lente esta intencionalmente inclinada con cierto ángulo con respecto al eje vertical de la superficie).

Cuando en una fotografía aérea oblicua aparece, el horizonte se les clasifica como oblicuos altos, mientras que cuando no se aprecia el horizonte se les denominan oblicuos

bajos. Una aerofoto en dirección vertical se obtiene cuando el eje de la cámara está exactamente a plomo al momento de realizar la captura, estas fotos son los medios principales para la cartografía ortográfica.



## 1.2. Fotogrametría digital

Ilustración 3 Fotografía aérea vertical. Fuente: Servicios Politécnicos Aéreos S.A. (<https://spasa.com/fotografia-aerea-vertical/>)

Ilustración 4 Fotografía Oblicua alta: Fuente La Vanguardia (<https://www.lavanguardia.com/cultura/20220627/8367914/>)

De acuerdo con Schenk (2002), la fotogrametría digital está teniendo un crecimiento muy importante. Se datan sus inicios desde los años 50, pero es hasta la década de los 80 donde se empezaron a desarrollar mejor las actividades, debido a los avances de la electrónica y la informática, tales como las cámaras digitales, el procesamiento de información utilizando nuevos softwares o el aumento constante de capacidad de almacenamiento. En esta época ya se encuentran disponibles en el mercado varios productos de la fotogrametría digital, tales como softwares para la obtención automática de modelos digitales, aeronaves, estaciones fotogramétricas u ortofotos digitales.

La fotogrametría digital trata más con imágenes digitales que con las fotografías convencionales, para esto es importante contar con el software y hardware necesario para poder afrontar las dificultades que puede traer el tiempo de procesamiento y el espacio de

almacenamiento, debido a la manipulación de grandes volúmenes de datos que comportan las imágenes digitales.

El mismo Schenk (2002) establece que la *fotogrametría digital* se refiere más a la presentación de imágenes en un monitor, lo cual expresa de una mejor manera la distinción entre lo digital y lo analógico. Por lo cual, en la fotogrametría digital se trabaja con imágenes digitales en lugar de fotografías, debido a que está íntimamente relacionada con la visión por ordenador.

A menudo se utiliza un proceso automático generado por un software donde la intervención humana se requiere ocasionalmente o en lapsos de tiempo. Algunos ejemplos de los procesos que puede generar un programa son los modelos digitales de terreno (MDT) o los modelos digitales de elevaciones o de superficie (DEM por sus siglas en inglés).

Se entiende por estación fotogramétrica al almacenamiento de imágenes en cualquier tipo de ordenador, donde la interfaz de visualización es la pantalla de este. Las imágenes se pueden obtener directamente de cámaras digitales e indirectamente mediante la digitalización de fotografías (siendo escaneadas).

#### 1.2.1. Características de imágenes digitales

Es importante entender las características que poseen las imágenes, ya que esto es la diferencia fundamental con la fotogrametría convencional. Schenk (2002) afirma que las imágenes pueden describirse como una función continua de  $F(x, y)$ , donde las coordenadas  $x, y$ , son variables espaciales y la densidad será la amplitud.

Para representar esta función de forma más clara se toma de ejemplo el pixel, ya que a cada uno le corresponde un valor específico de  $x, y$ , en el muestreo, mientras que en la amplitud se puede representar la dirección del vector magnitud, comúnmente conocida como brillo.

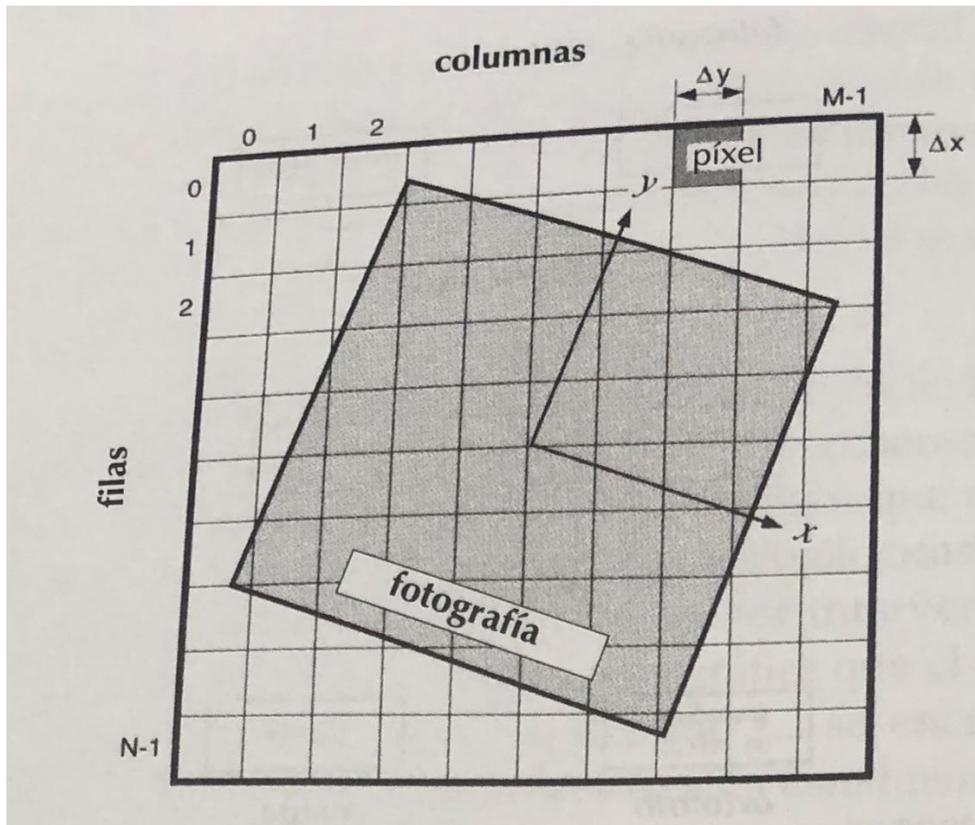


Ilustración 5 Sistema de coordenadas imagen para una imagen digital. El cuadrado girado y sombreado representa una fotografía digitalizada con los ejes fotocoordenados. *Fotogrametría digital*, Toni Schenk

### 1.2.2. Plan de vuelo y traslape

Schenk (2002) considera que cuando se busca obtener información para cartografía a partir de la fotografía aérea es necesario elaborar un plan de vuelo, en el cual se observa una representación de la zona a estudiar. El plan de vuelo consiste en determinar el recorrido que realizara el dron, a través de líneas de vuelo, además de otros elementos como, la cantidad de fotografías.

Existen dos tipos de traslape o superposición, Schenk (2002) propone un traslape del 25% de forma transversal, de forma en que las fotografías entre distintas líneas de vuelo comparten una zona en común, lo cual es muy importante al momento en el que el software busca puntos homólogos entre las fotografías. Además del traslape transversal, existe el traslape longitudinal, el cual se refiere a la zona que comparten las fotografías sobre una misma línea de vuelo y se propone ser del 60% entre cada par de fotografías.

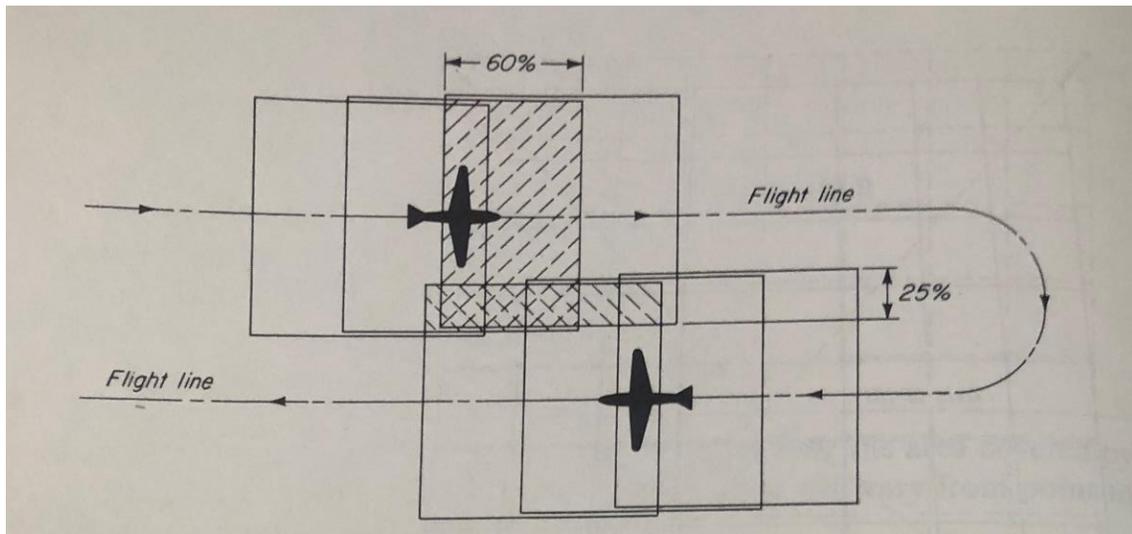


Ilustración 6 Superposición transversal. Fotogrametría digital, Toni Schenk, 2002.

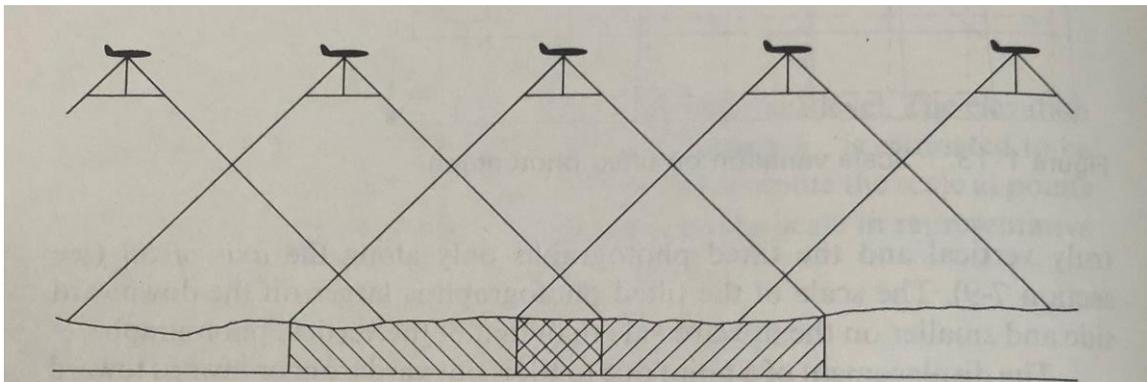


Ilustración 7 Superposición longitudinal. Fotogrametría digital, Toni Schenk, 2002.

### 1.3. VANT

Ojeda (2017) define a un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) o comúnmente conocido como dron, como; vehículos capaces de mantener de forma autónoma un nivel de vuelo controlado, el cual es propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción. Estas plataformas se han vuelto populares en las aplicaciones de percepción remota, sobre todo cuando los métodos in situ para la recolección de datos no son tan eficientes.

Estos vehículos están acondicionados para llevar dispositivos auxiliares para actividades de monitoreo o control. Estas herramientas se complementan con su estación de control terrestre, para el monitoreo del aparato en tiempo real. Cuentan también con un

sistema de navegación GPS, así como subsistema de comunicación, para poder ver desde un control remoto la información que transmite el dron o VANT.

Un VANT puede clasificarse según su estructura, de acuerdo con lo publicado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua:

De ala fija	Tiene la típica forma de un aeroplano, requiere de catapultas para el despegue. Alcanzan mayores velocidades que otros tipos de VANT
De ala rotatoria	Altamente maniobrables, pueden aterrizar y despegar de forma vertical. Existen los que se componen desde una hélice, hasta los vehículos multirrotores.
Dirigibles o globos	Característicos por ser muy ligeros, además de que pueden tener vuelos de larga duración, pero viajan a baja velocidad.
De aleteo	Están compuestos por pequeñas alas flexibles.

*Tabla 1 Clasificación de los Vehículos Aéreos no Tripulados según su estructura.*

### 1.3.1. Sensores para los VANTs

Las cámaras o sensores que son utilizados en la fotogrametría con el paso de los años han ido mejorando en cuanto a su diseño y los elementos que las componen. Falkner y Morgan (2002) mencionan que para la fotogrametría aérea por lo general son utilizadas las cámaras analógicas y más recientemente las cámaras digitales. Estos sensores comúnmente son ubicados al centro de las aeronaves, de tal forma que la lente queda situada en un agujero en la parte inferior del vehículo para facilitar la captura de información.

Torres (2002) afirma que los elementos esenciales de una cámara son: las lentes, el obturador, cuerpo de cámara, mecanismo para operarla y una película sensibilizada. En general están compuestas por una pequeña caja oscura, en uno de los lados cuenta con un obturador que actúa como una ventana por donde puede circular la luz. La luz admitida va directamente hasta donde se halla la película sensibilizada, que posteriormente es impresa en negativos. Se nombra plano focal al plano donde es colocada la película fotográfica.

De acuerdo con Falkner y Dennis (2002), el sistema que conforma a las cámaras digitales es relativamente similar a los sistemas analógicos. Los sistemas digitales pueden obtener imágenes a blanco y negro, a color natural e incluso infrarrojo. La mayor ventaja de los sensores digitales sobre los analógicos es que sus productos pueden ser incorporados inmediatamente a una estación de trabajo (computadora regularmente) para poder visualizar y analizar las imágenes, a diferencia de que para obtener los productos de las cámaras analógicas se necesitan pasos intermedios que involucran a un técnico para el procesamiento de la película fotográfica.

Las cámaras digitales cuentan con un dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés Charge coupled device), el cual sería el sustituto de la película sensibilizada de la cámara analógica y un sistema de almacenamiento de información dentro de la misma imagen digital. La capacidad de almacenamiento del CCD puede variar, esta variación afecta directamente a la claridad de la imagen. La claridad y la resolución de la imagen mejoran en vuelos de menor altitud, pero esto implica hacer una mayor captura de imágenes para cubrir las zonas de estudio y por ende implica mayor capacidad de almacenamiento.

### 1.3.2. Ventajas y desventajas

En la siguiente tabla se pueden apreciar las ventajas y desventajas del uso de dron en la topografía:

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Permite obtener mayor cobertura y recolección de información en menor tiempo.	La duración de la batería varía desde 30 hasta 45 minutos, dependiendo de la intensidad del viento
Aporta más información gráfica en comparación con un levantamiento tradicional.	En zonas de mucha vegetación tal vez presenten problemas al momento de obtener MDTs.
Reducción de costos al hacer levantamientos en zonas con áreas extensas.	En casos donde la finalidad es estudiar la altimetría es de suma importancia complementar con puntos de control terrestres
Brindan mayor seguridad al topógrafo	En áreas pequeñas o en interiores podrían no ser lo más eficientes

Manipulación de las imágenes prácticamente inmediatamente	Se necesita mayor capacidad de almacenamiento, así como computadoras con la potencia suficiente para el procesamiento de la información.
Permiten obtener información de lugares que no son de fácil acceso.	Regulación y normatividad para el uso del espacio aéreo para este tipo de vehículos.

*Tabla 2 Ventajas y desventajas del uso de drones para fotogrametría.*

En México la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) describe en la NOM-107-SCT3-2019 las características con las que debe contar una aeronave para poder volar en terreno nacional, así como también las restricciones que hay que considerar para poder realizar un vuelo fotogramétrico y operar de forma segura para los pilotos a distancia y para terceras personas.

En los requerimientos generales se describen las medidas que debe tener la aeronave y el peso máximo, por lo general los diseñadores y fabricantes toman en cuenta estos lineamientos a la hora de armar estos vehículos. También se mencionan las distancias a las cuales se debe trabajar en caso de estar cerca de aeropuertos o helipuertos. De la misma forma, la NOM indica que las aeronaves únicamente podrán operar durante el día.

En este estudio se utilizó el Phantom-4 Advanced, y de acuerdo con su peso y sus dimensiones se encuentra en la categoría de las micro VANT, por lo cual debe seguir lineamientos específicos como, no operar la aeronave a una altura de vuelo mayor a 122m de la superficie, de la misma forma el vehículo debe de contar con un folio de registro ante la SICT y un seguro de responsabilidad civil vigente, también se indica que queda prohibido volarlo sobre alguna persona, a no ser que participe directamente en el proyecto del VANT.

#### 1.4. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Este sistema se creó por la necesidad que tiene el ser humano de saber en qué sitio se encuentra, Torres y Villate (2002) comentan que primero se recurrió a las estrellas para poder identificar la ubicación. Aproximadamente por el año 1940 se hizo posible determinar la posición con mayor exactitud mediante señales de radio, pero por los avances tecnológicos de esa época este sistema tenía limitaciones con el alcance de las ondas de radio.

Hacia el año 1960, se desarrolló el sistema Transit gracias al lanzamiento de los primeros satélites artificiales, los cuales se pretendían utilizar como sistemas de estrellas que iluminaran la tierra con señales de radio, sin embargo, este método no era muy exacto y quedó fuera de servicio en la década de los 90.

Se data que en el año 1973 comenzó a operar un sistema de posicionamiento global desarrollado por el Departamento de Defensa de E.U.A. llamado NAVSTAR (de las palabras en inglés Navigation System by Time and Range, que se traduce como Sistema de Navegación por Tiempo y Rango). Es importante mencionar que Rusia desarrolló un sistema similar llamado Glonass.

El sistema americano se basa en una constelación de 24 satélites orbitando a una distancia aproximada de 20,000 km alrededor de la Tierra, se encuentran distribuidos equitativamente en seis planos orbitales. Esta distribución garantiza que desde cualquier lugar del planeta siempre debe haber entre 4 y 8 satélites visibles, además de que cuentan con una tecnología que les permite brindar una medición precisa durante las 24 horas del día.

Este sistema opera con un principio donde se puede determinar la distancia entre un satélite y el receptor, este receptor de acuerdo con un elipsoide de referencia (que se utiliza dependiendo la zona geográfica de donde se requiera obtener la ubicación) calcula el radio de la supuesta esfera donde está ubicado el mismo. Ahora bien, sabiendo que se cuenta con más de un satélite, este mismo receptor es observado por los demás satélites y generando supuestas esferas, las cuales se intersecan en un punto, el cual estaría ubicado espacialmente con mayor precisión.

Las distancias entre los satélites y los receptores son determinadas mediante señales de radio GPS (suponiendo que los aparatos están constituidos por relojes atómicos), pero para poder calcular dichas distancias se emplean ciertas correcciones, debido a que en el transcurso entre el satélite y el receptor la señal atraviesa la ionosfera terrestre, la cual es una capa de partículas cargadas eléctricamente, donde implica una disminución en la velocidad de la señal, el vapor de agua terrestre es otro factor que puede afectar las

señales. En caso de que los aparatos con los que se trabaje no cuenten con relojes atómicos es necesario realizar más correcciones; por eso es importante que las observaciones realizadas sean postprocesadas por un software.

Este sistema de posicionamiento puede trabajar de 3 formas distintas. La primera forma de trabajo se le nombra GPS estático, la cual refiere a realizar lecturas independientes que logran una precisión de decenas de metros, pero en trabajos topográficos no es aceptable. Otro método es llamado GPS diferencial cinemático, donde se usa una estación fija (base) y otros receptores móviles, el método consiste en que la base realice muchas observaciones para determinar bien su posición mientras que con los móviles se hacen lecturas un poco más rápidas a las que posteriormente se les hacen las mismas correcciones que a la estación fija a través de un software.

El tercer método de levantamiento es llamado GPS cinemático en tiempo real, el cual consiste en hacer el ajuste de las lecturas tomadas por los receptores móviles en el momento de hacer las observaciones. Esto se logra enlazando a los móviles con el receptor base mediante frecuencias de radio, las cuales emite la estación fija enviando a los móviles las correcciones necesarias.

## 1.5. Colecta de imágenes

### 1.5.1. Anemómetro

De acuerdo con la empresa OMEGA Engineering Ltd (2022), el anemómetro es un instrumento utilizado para medir la rapidez con la que se desplazan los gases en un flujo contenido o no confinado. En este estudio fue utilizado este aparato para poder medir la velocidad con la que transitaba el viento.

Es importante mencionar el comportamiento o la velocidad aproximada a la cual viaja el viento de acuerdo a la altura sobre la superficie terrestre, el comportamiento del viento se puede ejemplificar en los perfiles de viento, donde se demuestra que en los primeros metros sobre la superficie la velocidad del viento tiene un incremento mayor, mientras que aproximadamente arriba de los 120m el incremento en la velocidad del viento es menor.

De acuerdo con Guevara y Puerta los perfiles de viento en Venezuela y España tienen un comportamiento exponencial, sin embargo, al indagar sobre este tema no se encontraron los suficientes recursos para describir con precisión el comportamiento del viento en México, pero se podría suponer que el comportamiento puede ser similar, ya que el incremento de altura y las capas atmosféricas afectan el comportamiento de la velocidad del viento.



Ilustración 8 Fotografía del anemómetro utilizado en este estudio.

### 1.5.2. Phantom-4 Advanced

La plataforma utilizada para este estudio fue un dron Phantom-4 Advanced de 4 hélices (ilustración 9). Este dron al igual que algunas de sus versiones anteriores despegaba de manera vertical con sus 4 rotores, además de que cuenta con un puerto de batería intercambiable. Este dron fue desarrollado por la empresa DJI y es considerado como un dron de gama media en relación con su precio, debido a que realiza trabajos especializados que llegan a tener referencia con la ingeniería y la topografía, además de que tiene las capacidades de apoyar con estudios ambientales o trabajos de filmación, entre otros (DJI, 2022).



Ilustración 9. VANT Phantom 4 advanced. Fuente: <https://www.dji.com/mx/phantom-4-adv>

A continuación, se muestran las características de la aeronave establecidas por el fabricante:

- Peso de la aeronave (incluyendo baterías y hélices) 1.368 Kg.
- Tamaño medido de forma diagonal sin hélices 350mm.
- Velocidad máxima en ascenso 5 m/s.
- Velocidad máxima en vuelo 3m/s.
- El tiempo de vuelo es de aproximadamente 30 minutos por batería.
- Cuenta con un sistema de posicionamiento por satélite.

El sensor con el cual opera esta aeronave y sus características son descritas a continuación:

- Sensor 1" CMOS.
- Píxeles efectivos: 20M.
- Lente: FOV 84° 8.8mm/24mm (formato equivalente a 35mm) f/2.8 a f/11, enfoque 1m a  $\infty$ .
- Rango ISO: 100 – 3200 (foto y video).

- Velocidad del obturador 8s – 1 / 8000s.
- Tamaño máximo de imagen 5472 x 3648.
- Tarjetas SD compatible: Micro SD.
- Formato de salida. Fotografía: JPEG, DNG (RAW) y JPEG +DNG; video: MP4 y MOV.
- Capacidad máxima de 128 GB, clase 10 ó UHS-1.
- Tasa de Bits máxima de almacenamiento de video: 100 Mbps.
- Sistema de archivos compatibles FAT32 (< 32 GB); exFAT (> 32 GB).

### 1.5.3. MapPilot (aplicación para iOS)

MapPilot es una aplicación diseñada por la empresa Drones Made Easy, y de acuerdo con su sitio web oficial es compatible con dispositivos inteligentes con sistema operativo iOS, dicha aplicación es utilizada para crear planes de vuelo donde se requiere obtener información topográfica de algunas zonas. Proporciona una mejor gestión de los datos, de tal forma, que mientras la aeronave se encuentra en una misión inmediatamente hace la transferencia de datos directamente a alguna plataforma digital de la empresa donde automáticamente se va generando un mapa del área de estudio, de la misma forma uno puede ver las capturas realizadas y hacer un procesamiento en otro software.

La principal utilidad que se le dio a esta aplicación fue el poder generar los diferentes planes de vuelo para poder hacer la recolección de la información del área estudiada. En las ilustraciones 10 y 11 se puede apreciar la interfaz de este software, estos son los planes de vuelo que se generaron de acuerdo con las diferentes variantes que se tomaron en cuenta, principalmente la altura de vuelo.

En ambas imágenes se pueden observar elementos como la altura de vuelo, líneas de vuelo, cantidad de fotografías por capturar, la resolución que tendrán dichas fotografías y la cantidad de espacio que se necesitaría para su almacenamiento, además se observa el tiempo aproximado que durará la misión, la velocidad promedio a la cual volará el dron y el área aproximada que se cubriría en el vuelo.

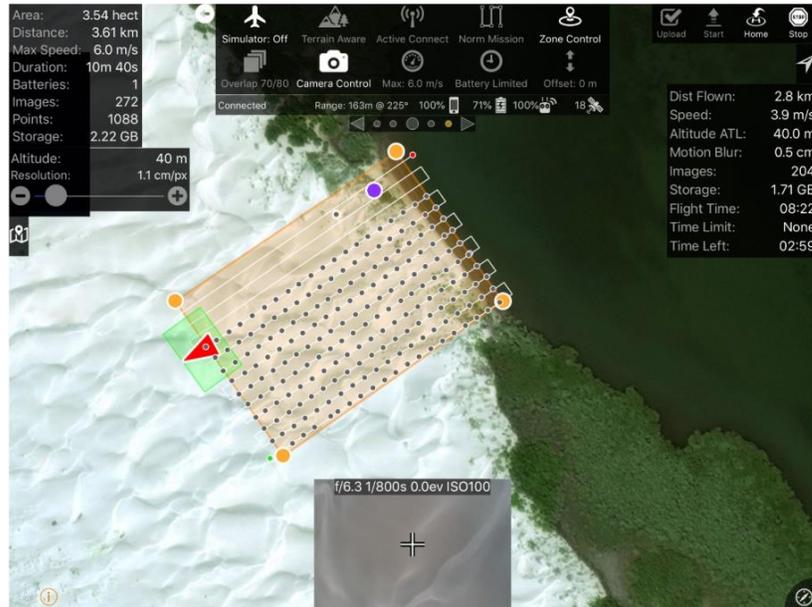


Ilustración 10 Captura de pantalla del plan de vuelo de este estudio a 40m de altura

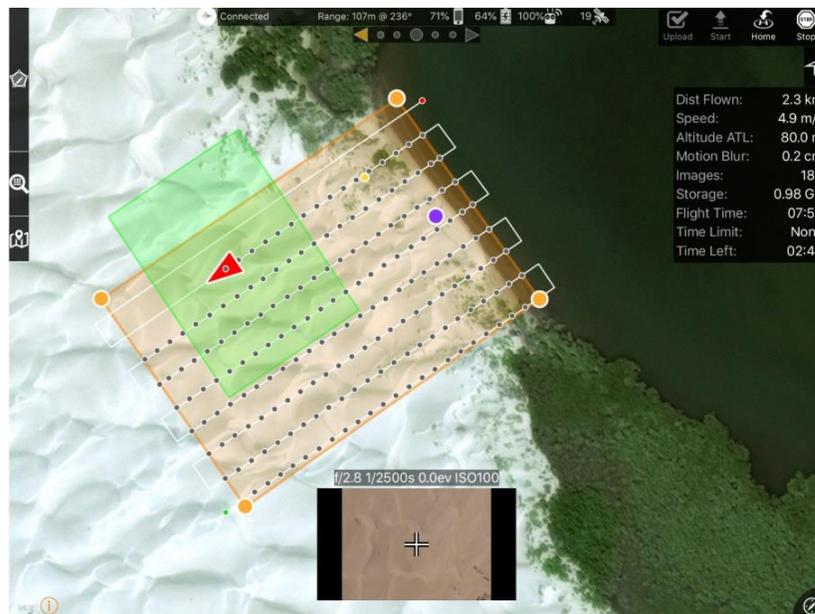


Ilustración 11 Captura de pantalla del plan de vuelo de este estudio a 80m de altura

## 1.6. Procesamiento digital

En el procesamiento digital de la información además de utilizar los métodos fotogramétricos, se implementó el análisis y visualización de esta, a través de lo que son los sistemas de información geográfica, los cuales se han vuelto cada vez más importantes y necesarios en los trabajos de topografía moderna.

Torres y Villate (2002) definen de forma general a un Sistema de Información Geográfica (SIG) como un conjunto de métodos y herramientas que actúan coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información geográfica con sus correspondientes atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos.

Una de las principales ventajas de los SIG es agilizar y optimizar la toma de decisiones, gracias a las formas automatizadas de integrar información espacial con otro tipo de información (características o atributos) para su manipulación y análisis. Asimismo, es una herramienta importante para el conocimiento y manejo de los recursos naturales y del medio ambiente, inclusive hasta en ecosistemas, facilitando a los usuarios el uso de información georreferenciada.

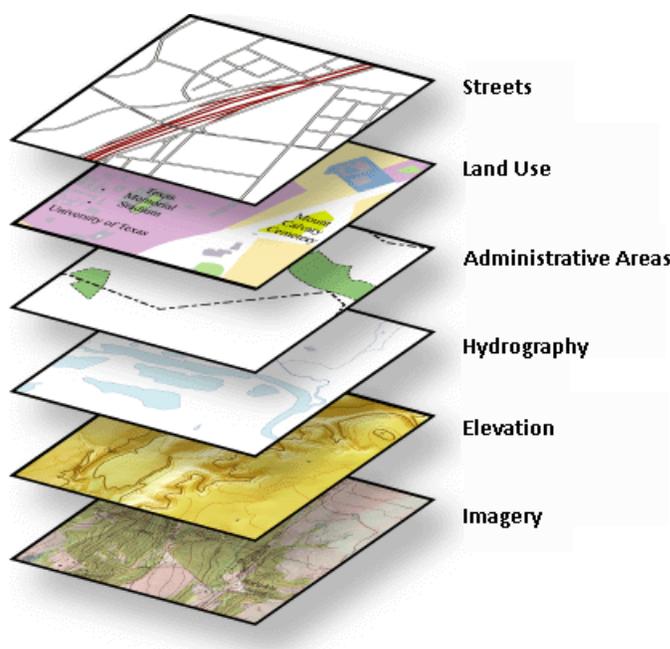


Ilustración 12 Modelo de información geográfica basado en capas. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000p000000.htm>

Un SIG se puede conocer por una serie de preguntas típicas que está capacitado para responder, una de ellas es la “localización”, con la cual se pretende encontrar lo que existe en un sitio particular. La “condición” es complemento de la localización y requiere de un análisis espacial donde ciertas condiciones son satisfechas. Otra interrogación es la “tendencia”, con la cual se busca encontrar las diferencias existentes en un área a través del tiempo. También es importante identificar un “patrón” o la existencia de algún

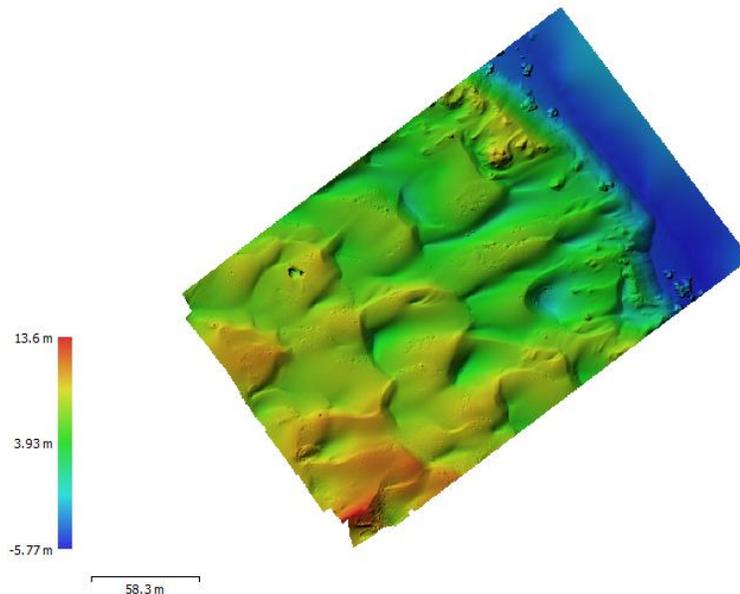
fenómeno que se repita ante ciertas condiciones. La última cuestión podría ser un “modelamiento”, la cual pretende conocer que es que lo pasaría si se realiza un cambio.

La forma más simple por la cual puede estar compuesto un SIG basta de un usuario, los programas para el SIG (software) y el equipo electrónico (hardware). El software permite visualizar y modificar las características de los datos, tales como, sus propiedades, su simbología, tablas de contenido de la información espacial, visualización a través de gráficos, la plataforma contiene herramientas de geoproceto, además de contar con una interfaz donde mediante comandos o códigos de programación se pueden hacer modificaciones a los datos.

#### 1.6.1. Agisoft Metashape (software de procesamiento)

Este software fue el que se utilizó para poder hacer el procesamiento de las imágenes obtenidas en el vuelo fotogramétrico. Esta aplicación fue desarrollada por la compañía Agisoft LLC, la cual fue fundada con un enfoque en la tecnología de visión artificial o computarizada. Esta empresa ha implementado tecnología de punta en los softwares para generar exitosamente una reconstrucción, visualización, inspección o mapeo en tres dimensiones.

Este programa básicamente ayuda a obtener un modelo digital de la superficie, tratando de ser lo más similar al terreno natural. A través de las imágenes se genera una nube de puntos, la cual posteriormente permite crear una superficie y extraer el modelo digital de superficie o elevaciones para poder ser analizado o manipulado en cualquier otra aplicación con la cual sea compatible su formato de datos.



*Ilustración 13 Muestra del modelo digital de superficie de un vuelo fotogramétrico a 40m de altura, obtenido mediante el proceso de Agisoft Metashape.*

#### 1.6.2. ArcMap (software de análisis e interpretación de datos)

Este software es definido por la página web oficial como una infraestructura o herramienta para crear mapas debido a que es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica y ponerla a disposición de los usuarios.

Miles de organizaciones de muchos sectores diferentes emplean ArcGIS donde resulta importante en aplicaciones para planificación, operaciones de campo como inspección móvil, investigación de mercado, administración de recursos, educación y divulgación.

Los mapas se elaboran con la intención de organizar, comprender y proporcionar grandes cantidades de información de un modo comprensible universalmente. La aplicación es utilizada para generar mapas porque muestra información y al mismo tiempo se permite manipular o consultar para el análisis, planificación y administración, donde todo esto conlleva como producto final un SIG.

Esta herramienta permite sintetizar datos de diversas fuentes en una misma zona geográfica, estos datos, a su vez, incluyen información de bases de datos geográficos,

datos tabulares del sistema de administración de datos y otros sistemas empresariales utilizados comúnmente (CAD, kml, fotos, ojalá de cálculo, etc.).

ArcMap permite también crear fácilmente datos geográficos mediante una digitalización inteligente, con la cual es posible realizar trazos en el mapa y poder guardarlos en las bases de datos geográficos.



Ilustración 14 Esquema que muestra que los SIG pueden estar disponibles a través de cualquier navegador web. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

### 1.6.3. Surfer (software para análisis de los perfiles topográficos)

Es un software que permite la visualización en 3D, creación de isolíneas y modelado de superficies, enfocando sus utilidades a esta rama de la ingeniería donde resulta muy eficaz para el análisis de superficies, cartografía de curvas de nivel y los cálculos de volumetría. En este análisis se utilizó esta aplicación para hacer la representación de un área bajo la curva mediante una visualización en dos dimensiones de cada uno de los perfiles que se generan con los trayectos recorridos.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Determinar la configuración de vuelo óptima para poder generar modelos digitales de superficie en la interfaz playa-duna de una zona característica de Bahía Santa María–La Reforma, Sinaloa.

### 2.2. Objetivos particulares

Seleccionar la altura óptima a la cual debe de volar una aeronave para poder obtener una configuración confiable del terreno sin la necesidad de utilizar puntos de control terrestres.

Obtener modelos digitales de superficie que representen el terreno natural sin utilizar puntos de control durante el proceso de la información.

Optimizar tiempo de operación durante la ejecución de un levantamiento topográfico mediante un vuelo fotogramétrico.

### 3. Hipótesis

Existirá una relación directa entre las áreas extraídas de los perfiles topográficos en campo y las áreas extraídas de los DSM provenientes de los vuelos con el dron. Sin embargo, la variabilidad en el error por la diferencia en áreas se incrementará dependiendo de la altura a la cual se vuela el dron.

## 4. Justificación

Se hizo el levantamiento topográfico empleando la fotogrametría, sin embargo, no se utilizaron puntos de control porque en lugares arenosos o en zonas de extensa vegetación no se pueden colocar puntos de control. En zonas como las dunas o las playas no es posible colocar marcas sobre la superficie debido a que éstas son cubiertas de arena en poco tiempo como consecuencia de la velocidad del viento.

Es importante recalcar que el uso de puntos de control terrestres en levantamientos fotogramétricos será necesario siempre que se requiera hacer una georreferenciación de la zona de estudio y cuando los objetivos del levantamiento requieran una exactitud diferencial como en el caso de construcciones.

En la vida laboral hay otras circunstancias que también pueden ser un obstáculo para utilizar puntos de control ubicados con GPS diferencial. Un factor es el alto costo al momento de adquirirlos equipos o incluso rentarlos, a pesar del constante avance tecnológico global.

De la misma forma que con los GPS, hay drones con precios igual de elevados, los cuales inclusive pueden brindar mejor calidad en la recolección de datos, en cuanto a definición de pixel o las extensiones que puedan abarcar en conjunto con la altura de vuelo a la cual puedan operar.

## 5. Materiales y método

### 5.1. Área de estudio

Bahía Santa María–La Reforma se localiza al noroeste de la costa de Sinaloa. De acuerdo con Gurrola y Castañeda (2015) esta bahía es una laguna costera con una gran extensión y cuenta con diversos ambientes naturales, tales como; planicies lodosas y pantanosas, islas y canales e incluso dunas de arena. En la siguiente ilustración se aprecia la costa de la Bahía Santa María.



*Ilustración 15 Imagen capturada en campo por el Dr. Francisco Javier Flores de Santiago*

En la ilustración 16 se puede apreciar de forma más clara las características de la zona de estudio, en dicha imagen podemos observar la duna de la cual fueron extraídos los perfiles topográficos mediante vuelos fotogramétricos para el análisis. Se puede notar que el área de estudio está completamente cubierta por la arena.

De acuerdo con el sitio web de Ciencia UNAM, Santillán describe que las dunas son formadas por la acumulación de arena y transporte de depósitos por el viento en ambientes como costas o desiertos y pueden llegar a medir hasta 30m en algunos casos. Son clasificadas dependiendo su dirección y la velocidad del viento, en esta clasificación se encuentran la transversal, parabólica, longitudinal, estrella barjanes y barjanoides. Hay dunas que se encuentran con vegetación y pequeños organismos, las cuales se llaman paleodunas.

Las dunas también están divididas en tres regiones, estas son nombradas, barlovento, cresta y sotavento. Se forman por la manera en la que el viento acarrea partículas de arena que provienen de la parte mas honda llevándolas hasta la cima o cresta, cuando se llega a este punto el viento pierde velocidad y las partículas caen en la parte posterior de la duna, conocida como sotavento. La región del barlovento es la parte interior de la duna, por la cual transita con mayor velocidad el viento.

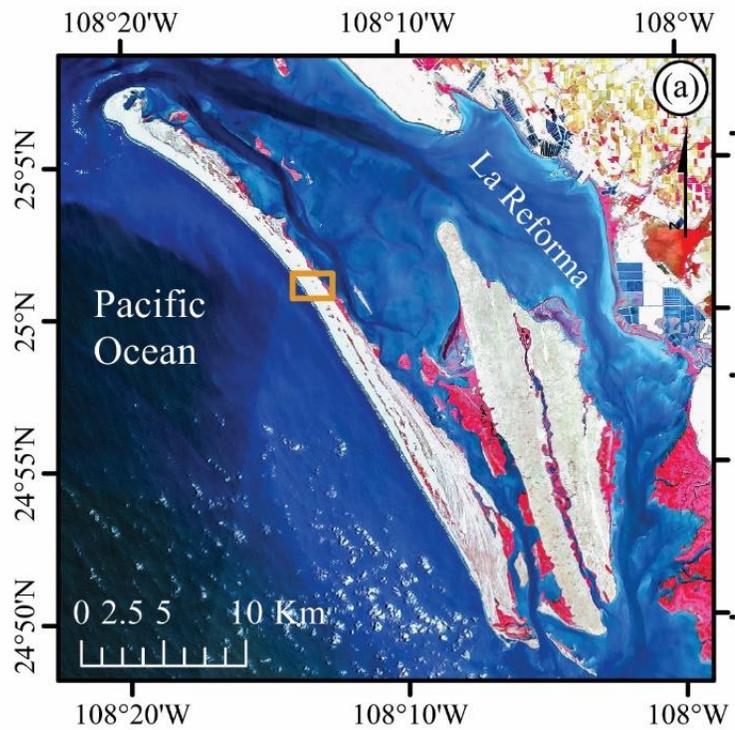
De acuerdo con el Dr. Kasper del Instituto del Ciencias del Mar y Limnología las dunas de playa el viento tiene influencia del océano y la playa contribuye a alimentar la misma, mientras que las dunas formadas en el desierto dependen de las tormentas y de elementos meteorológicos de la zona.



Ilustración 16 Espectaculares paisajes de arena, Ciencia UNAM, [https://ciencia.unam.mx/uploads/infografias/if\\_dunas\\_22032018.jpg](https://ciencia.unam.mx/uploads/infografias/if_dunas_22032018.jpg)

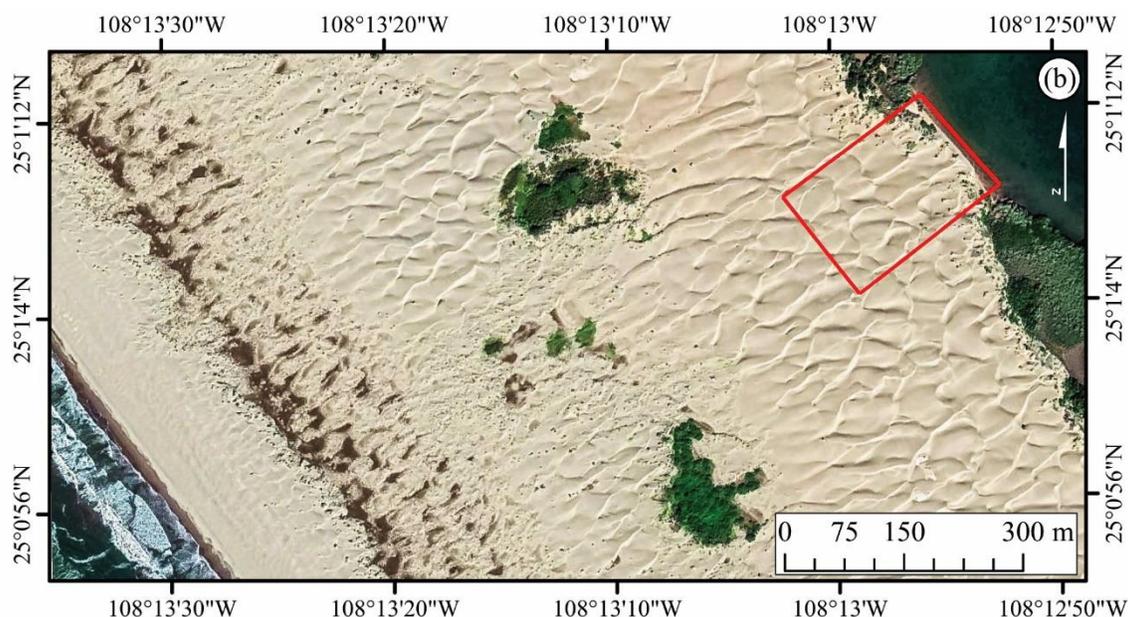


*Ilustración 17 Imagen capturada en campo donde se observa el Dr. Francisco Javier Flores de Santiago*



*Ilustración 18 Imagen satelital obtenida por el Dr. Francisco Javier Flores de Santiago donde se muestra la bahía Santa María La Reforma.*

La isla de Altamura corresponde a la barra arenosa que protege a la bahía de la influencia del Océano Pacífico. En la ilustración 18 se señala el área de la cual se obtuvo la información misma que se encuentra ubicada dentro del rectángulo rojo. La imagen contiene una región donde se pueden apreciar todos los objetos y características que se encuentran en la bahía, donde es posible notar cuerpos de agua, vegetación y la superficie terrestre cubierta por la arena.

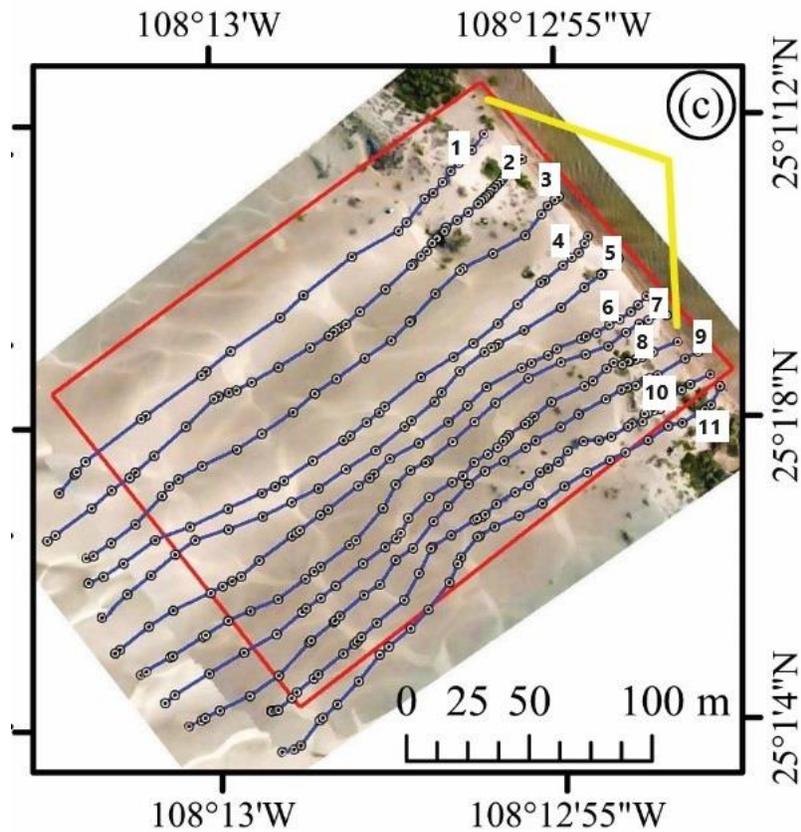


*Ilustración 19 Imagen satelital donde se muestra más de cerca la bahía Santa María La Reforma*

## 5.2. Levantamiento de perfiles topográficos

### 5.2.1. Perfil topográfico

El trabajo de campo consistió primeramente en obtener unos perfiles en playa, con el fin de observar los cambios de altura (en cada transecto) con niveles, se hizo un levantamiento topográfico de 11 transectos en el área de estudio mediante un método directo, los cuales se analizaron en conjunto con la información obtenida a partir del procesamiento de las imágenes capturadas por el dron (método indirecto de recolección).



*Ilustración 20 Imagen donde se muestra la zona de estudio y los perfiles topográficos realizados*

### 5.2.2. Vuelos fotogramétricos

Se procedió a hacer los 8 vuelos de dron, programados en la aplicación MapPilot. En estos vuelos fotogramétricos las imágenes capturadas contaron con una sobreposición constante del 70% entre cada fotografía de forma longitudinal y del 80% en forma transversal, donde el primer vuelo se programó a una altura de 40m, y los vuelos siguientes se fueron realizando de manera que la altura fue incrementando una distancia constante de 10m entre cada vuelo, de tal forma que en la última misión la altura a la cual se encontraba el dron para obtener la información era de 120m. Es importante mencionar que toda la información fue recabada el mismo día, tanto como los vuelos fotogramétricos, así como el levantamiento de los transectos con los distintos GPS.

### 5.2.3. Procesamiento

Una vez abierto el programa AgisoftMetashape se procede a agregar las imágenes en el software para poder procesarlas (ilustración 21). En la ilustración 22 se muestran los lugares donde fueron tomadas las fotografías por el dron siguiendo el patrón de vuelo.

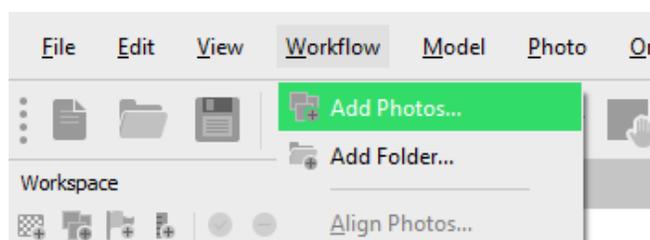


Ilustración 21 Añadir imágenes

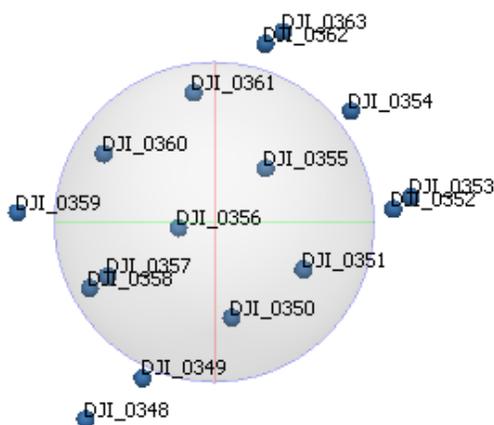


Ilustración 22 Ubicación aproximada de la lente al momento de realizar la captura de cada imagen.

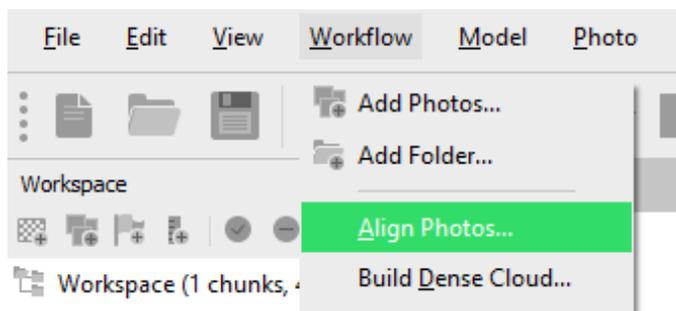
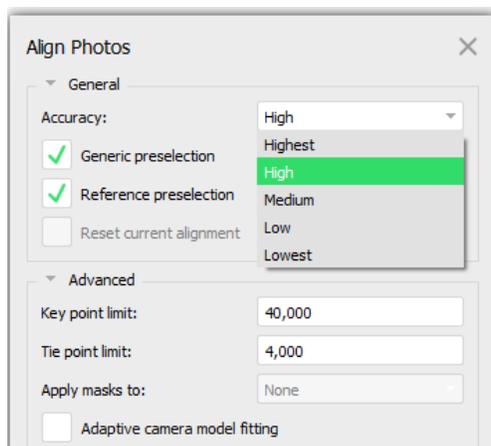


Ilustración 23 Alineación de fotos.

El paso que sigue es dar click en la opción “orientar fotos” (ilustración 23), con los siguientes parámetros (ilustración 24). Esto para hacer una construcción del entorno a través de puntos homólogos entre las fotografías. Como resultado, en el espacio de trabajo

se muestra una pequeña reconstrucción con algunos puntos homologos entre las imágenes (ilustración 25).

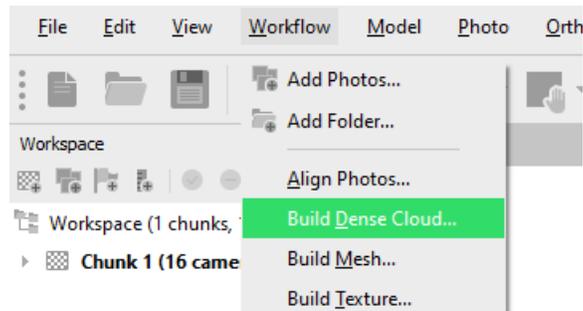


*Ilustración 24 Parámetros para la alineación de las imágenes.*

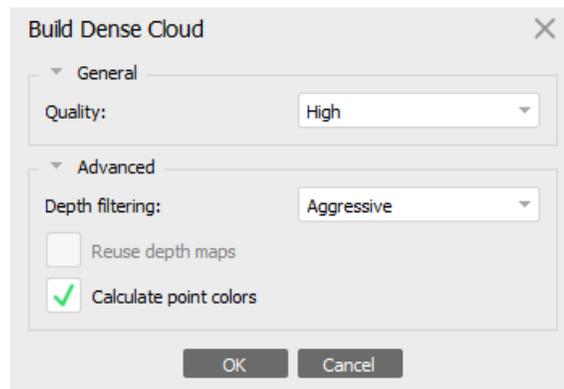


*Ilustración 25 Vista de la pantalla de trabajo al realizar la alineación.*

Para continuar, se procede a crear una nube de puntos densa (ilustración 26) buscando la mayor cantidad de puntos homólogos entre las imágenes, para hacer la reconstrucción del entorno. La nube densa fue creada con los parámetros mostrados en la ilustración 27.



*Ilustración 26 Crear nube densa (de puntos)*



*Ilustración 27 Parámetros para crear la nube densa.*



*Ilustración 28 Visualización de la nube densa en el panel de trabajo.*

En seguida se crea una malla (ilustración 29), la cual sirve para suavizar los elementos y puntos dispersos en la nube densa, de tal forma que se crea una superficie más uniforme. Para este paso se utilizaron los parámetros indicados en la ilustración 30.

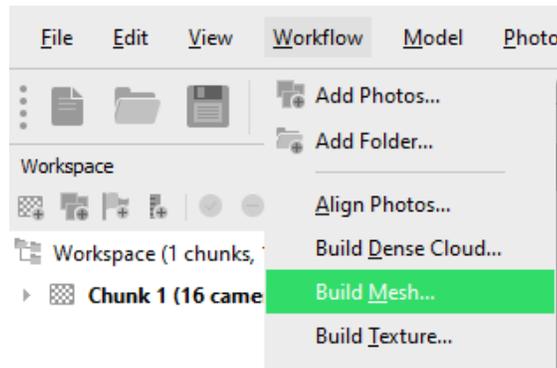


Ilustración 29 Construcción de la malla.

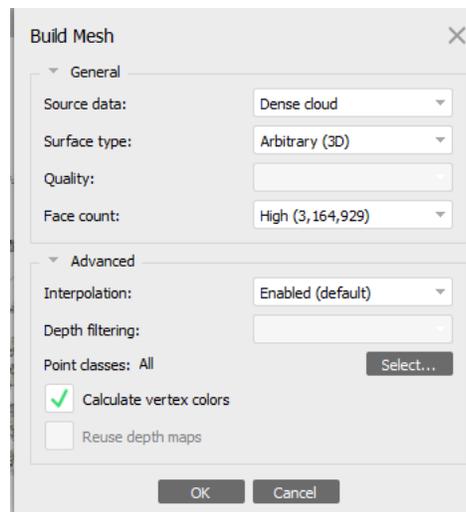


Ilustración 30 Parámetros para la construcción de la malla.

En caso de contar con puntos de control obtenidos mediante un GPS diferencial, es en este paso donde se insertan y se buscan en todas las fotos para mejorar la exactitud de las dimensiones en el modelo. Dado que en estos vuelos no se contó con puntos de control se procede a crear la textura (ilustración 31), la cual servirá después para generar el ortomosaico. No se utilizaron puntos de control debido a que objetos (comúnmente utilizados como targets) como lonas, mantas, cartulinas, tablas o triplay podían ser cubiertos por la arena en esta zona, debido a la velocidad a la que viaja el viento. En la ilustración 40 se puede observar los parámetros que se utilizaron para generar la textura.

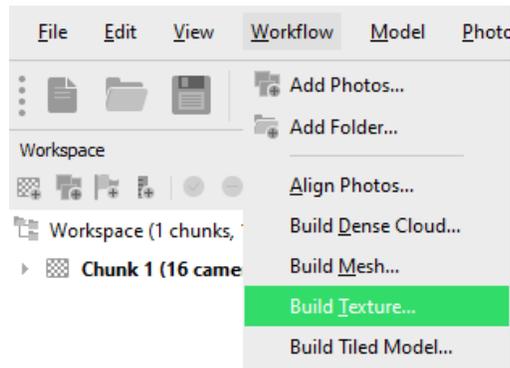


Ilustración 31 Crear textura para generar el ortomosaico.

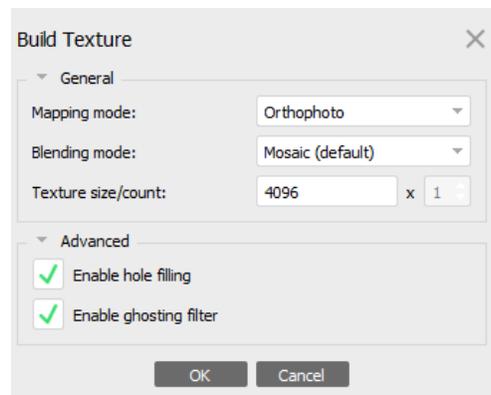


Ilustración 32 Parámetros para generar la textura.

Una vez obtenida la textura se crea el modelo digital de elevaciones (ilustración 33) modificando los parámetros de acuerdo con la ilustración 34. El modelo digital será una superficie que trata de ser lo más semejante posible al terreno natural, la cual se obtiene como producto final del proceso en este software.

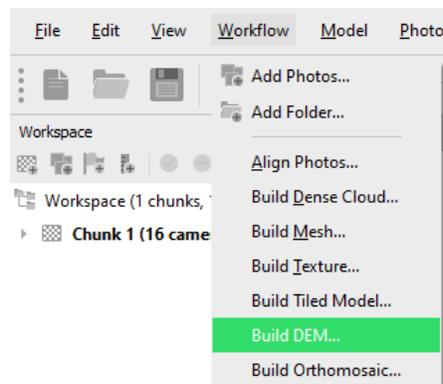


Ilustración 33 Crear Modelo Digital de Superficie o elevaciones.

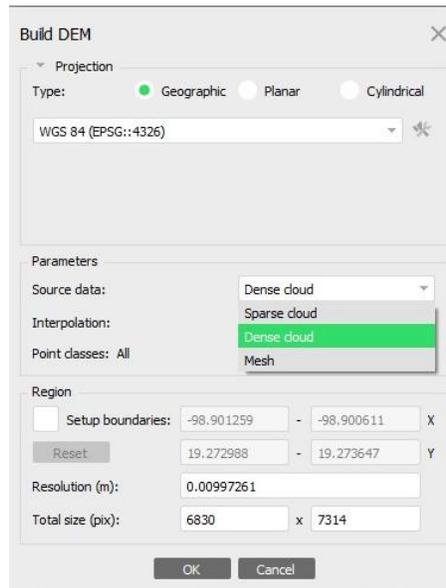


Ilustración 34 Parámetros para la creación del DEM

Posteriormente, se exporta el archivo del modelo digital de elevaciones de formato raster a extensión .tiff (ilustración 35), para poder ser analizado posteriormente en el software ArcGIS.

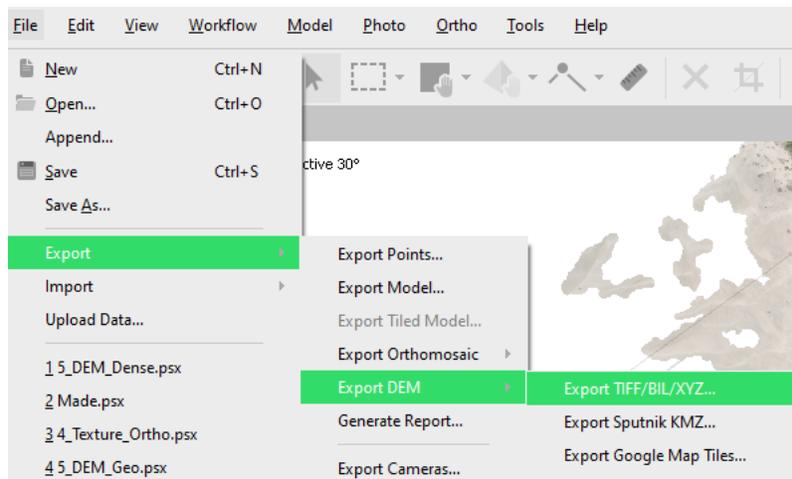


Ilustración 35 Exportar DEM a formato TIFF

Una vez obtenido el DEM, se genera finalmente el reporte de procesamiento (ilustración 36) donde vienen los tiempos que tardo en realizarse cada paso.

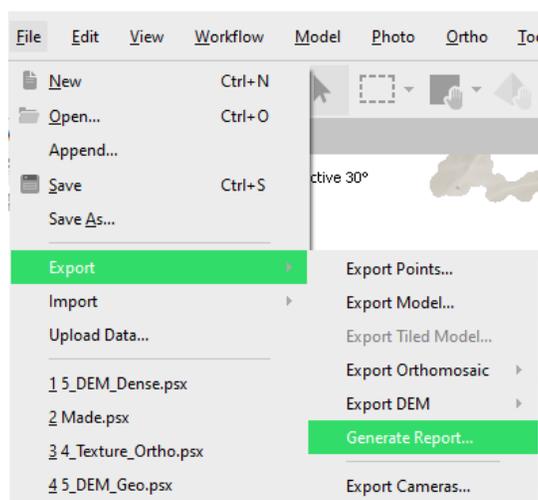


Ilustración 36 Generación del reporte de procesamiento.

Después de haber generado el DEM se continúa haciendo un análisis en ArcGIS, para eso fue necesario insertar los trayectos tomados con el GPS; los trayectos se encuentran en coordenadas UTM dentro de un archivo de Excel, el cual es necesario guardarlo en extensión .csv delimitado por comas para poder ser reconocido por el software. Al insertar estos archivos ArcGIS solicitará asignar una proyección cartográfica, para que puedan ser visualizados en el panel de trabajo.

Una vez que los datos coordinados han sido cargados en el GIS, se despliegan para que se muestren en pantalla y para esto se le da click derecho sobre cada archivo de valores, se selecciona la opción “Display XY Data” (ilustración 36).

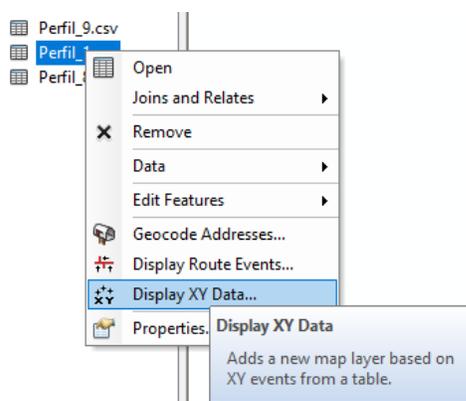
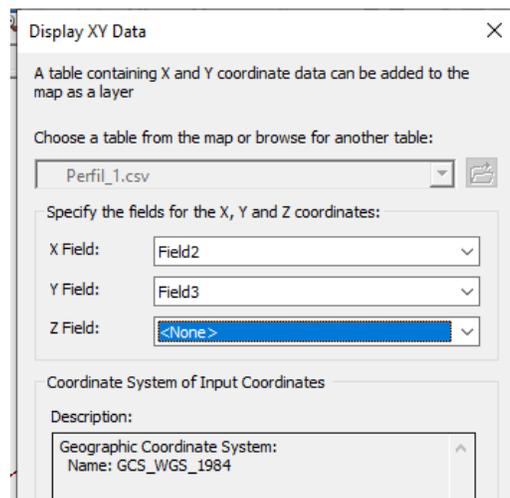


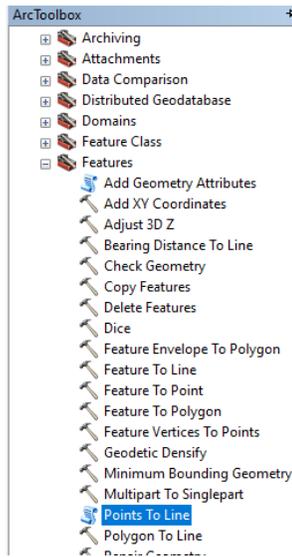
Ilustración 37 Mostrar los puntos de las coordenadas de cada trayecto.

Al seleccionar esta opción se desplegará un cuadro donde se deben de seleccionar las columnas que se le asignarán para que el software determine los valores correctos de X y Y (ilustración 38), recordando que el eje X es para las coordenadas en punto cardinal ESTE y las Y en el NORTE, para que de esta forma se puedan ver de manera correcta en la pantalla. También será en este recuadro donde se le debe seleccionar correctamente el sistema de coordenadas. En este caso el sistema es el WGS84 para la zona UTM 12 Norte.

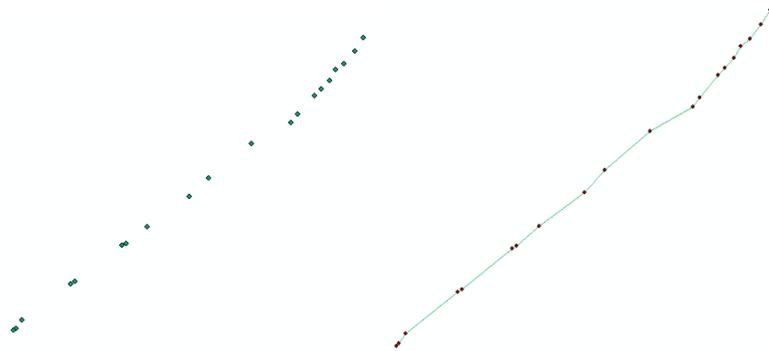


*Ilustración 38 Cuadro para determinar los campos de valores X y Y.*

Después de esta acción se presentarán los puntos de las coordenadas, por lo cual, lo siguiente fue crear una polilínea con estos datos, esta acción se realizó para todos los transectos. Para esto se utiliza la herramienta “Points to line” del Arctoolbox (ilustración 40).

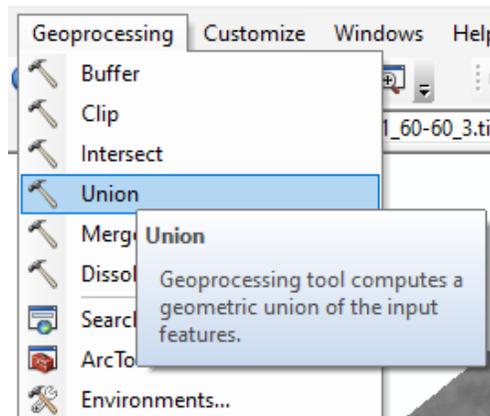


*Ilustración 39 Herramienta para crear una polilínea a partir de puntos.*



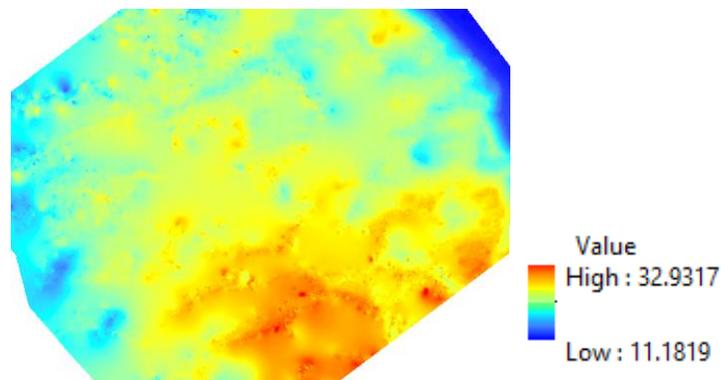
*Ilustración 40 Visualización de un trayecto antes y después de aplicar la herramienta para crear la polilínea.*

Cuando todos los transectos hayan sido transformados en polilínea se hace una unión de los shapes, acomodando todos los transectos en dos grupos distintos, uno por cada GPS que se utilizó, obteniendo así dos shapes distintos, uno con los transectos tomados por el GPS. Para esto se utilizó la herramienta “unión”, como se observa en la ilustración 41.



*Ilustración 41 Herramienta para unir shapes.*

Ya que se encuentran todos los transectos insertados en el espacio de trabajo, se agrega el DEM (ilustración 42) obtenido a través del software Metashape. El cual, es un archivo ráster georreferenciado y es mediante una escala de colores donde se pueden percibir las alturas. En este caso las unidades en las que se basa el software para representar las elevaciones son metros sobre el nivel del mar.



*Ilustración 42 Raster del Modelo Digital de Elevaciones de la superficie.*

ArcGIS detecta las alturas que se generaron en el DEM, pero es muy importante ajustarlo para que la altura mínima sea cero (debido a que el estudio se realizó a una altura de cero metros sobre el nivel del mar) y poder capturar las elevaciones a través de los trayectos. Se sabe que hay que hacer este ajuste, porque debido a que el estudio se realizó en una duna costera, a nivel del mar, y se sabe que la altura mínima debe ser 0, debido a que el vuelo involucro costas de agua de mar.

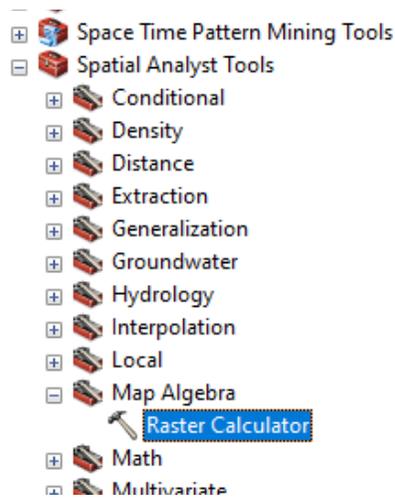


Ilustración 43 Herramienta "raster calculator".

Para hacer esta operación se utilizó la herramienta "Raster calculator," donde se ingresó en el cuadro de operaciones (ilustración 44) el algoritmo para ajustar la elevación mínima a cero, para esto la única operación que se realizó fue restarle al archivo ráster el valor mínimo de la altura, la fórmula es la siguiente:

- "ráster" – (valor mínimo)

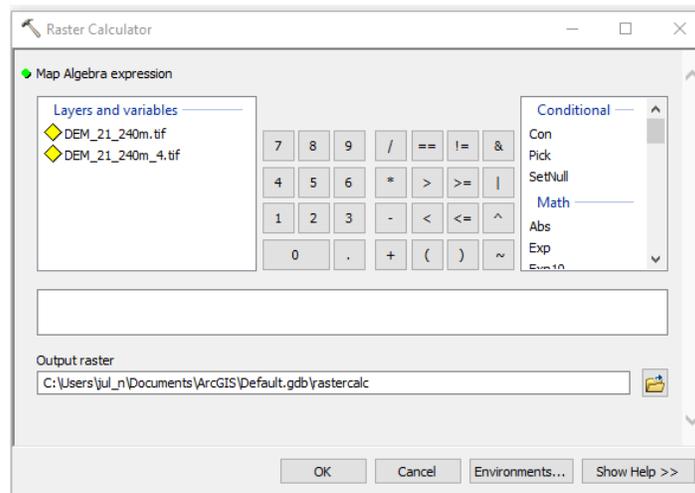


Ilustración 44 Recuadro para operar con el archivo ráster.

Luego, se procede a hacer una interpolación entre el ráster y cada uno de los shapfiles de ambos GPS con sus trayectos, esto con el fin de obtener el perfil topográfico mediante el DEM del trayecto de cada GPS, y así poder comparar las alturas del DEM obtenido y las alturas reales de la zona, medidas con el GPS. Para esto se utiliza la herramienta

“Interpolate shape” (ilustración 45), y al aparecer el cuadro de operaciones (ilustración 46) se inserta el ráster y los trayectos (capa con polilíneas).

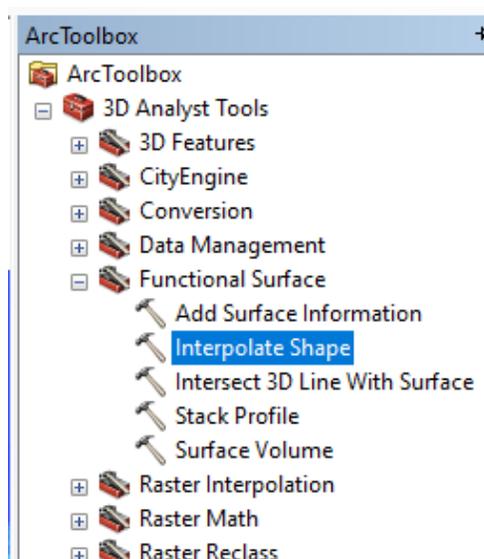


Ilustración 45 Herramienta "interpolate shape"

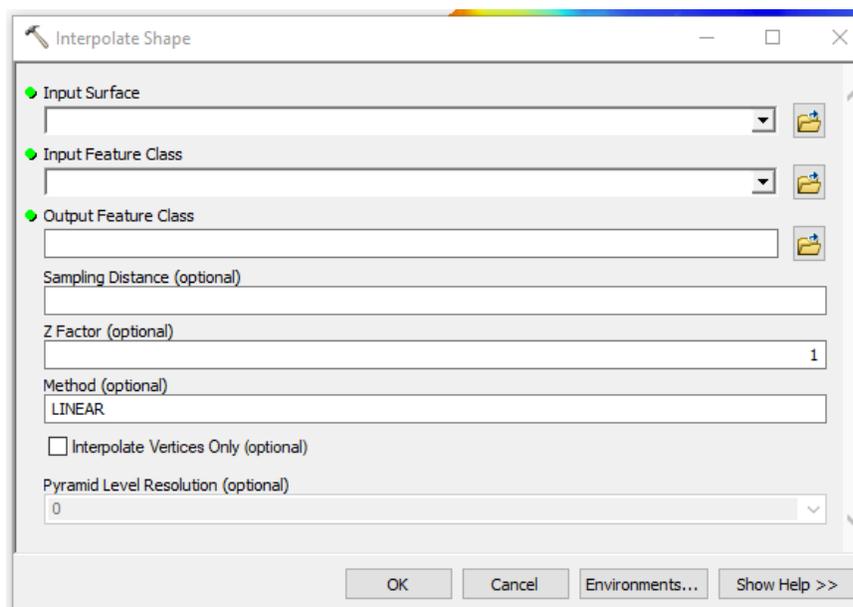
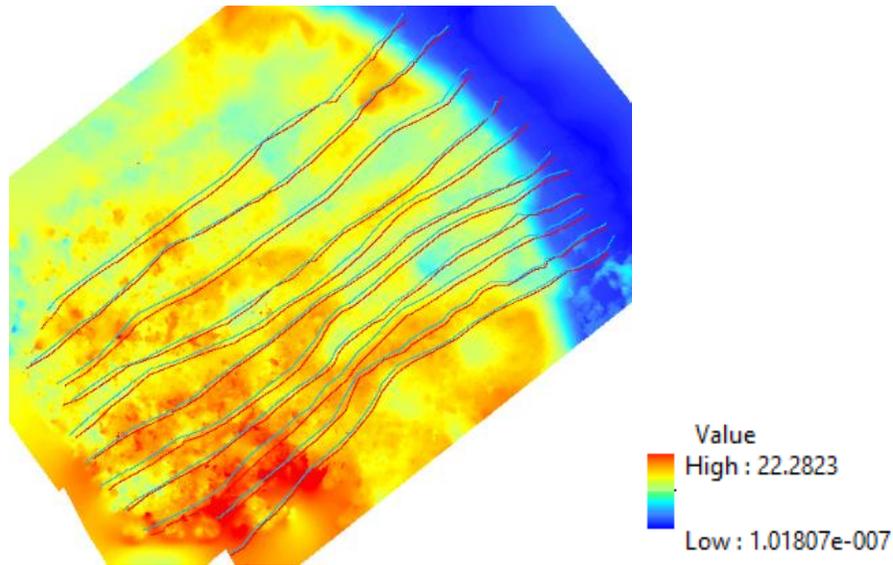


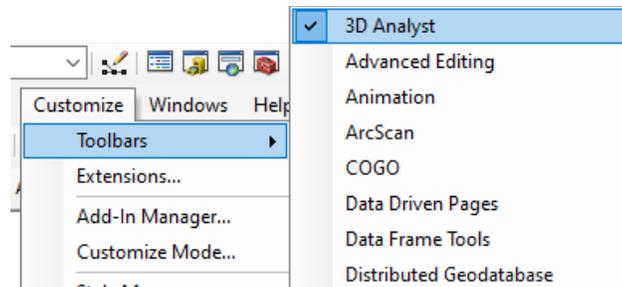
Ilustración 46 Cuadro de operaciones de la herramienta "Interpolate Shape".

En la parte de “input Surface” se debe seleccionar el ráster, en el renglón de “input Feature Class” se debe seleccionar el shape de cada GPS con sus respectivos 11 trayectos. Finalmente, en el apartado de “Output Feature Class” se selecciona la carpeta donde se guardará el nuevo archivo y el nombre que se le asignará.



*Ilustración 47 Ráster con los shapes de los trayectos superpuestos.*

Una vez que es generado el shape de interpolación, es necesario activar la pestaña de “3D Analyst” desde la barra de herramientas, esto se puede hacer seleccionando la ventana de “customize” y posteriormente en la opción de “Toolbars” se activa la barra de 3D Analyst (ilustración 48).



*Ilustración 48 Activar pestaña "3D Analyst" en la barra de herramientas (toolbar)*

Una vez activada la pestaña 3D Analyst, se selecciona el trayecto del cual se quiera visualizar el perfil topográfico, posteriormente se presiona el botón “Profile Graph” el cual desplegará una imagen donde se ve el perfil graficado (ilustración 48).

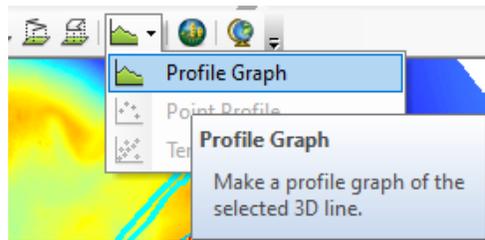


Ilustración 49 Comando para desplegar la vista de perfil de un trayecto.

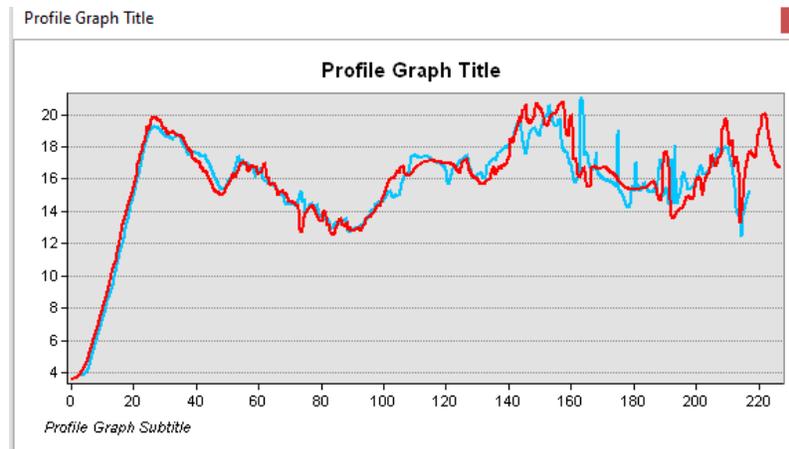


Ilustración 50 Grafica donde se percibe los perfiles topográficos de los transectos seleccionados.

Para exportar los datos que se muestran en la gráfica simplemente se da clic con el botón derecho del mouse, seleccionando la opción exportar (ilustración 51), inmediatamente se abrirá una ventana donde se podrá seleccionar el formato y el tipo de archivo con el que se desee guardar la gráfica (ilustración 52). En este caso se desea guardar un archivo de valores (X y Y) para poder graficar los datos en otro software, donde se puedan insertar coordenadas (Surfer).

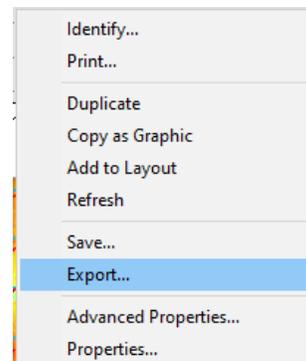


Ilustración 51 Como exportar los datos del grafico del perfil topográfico.

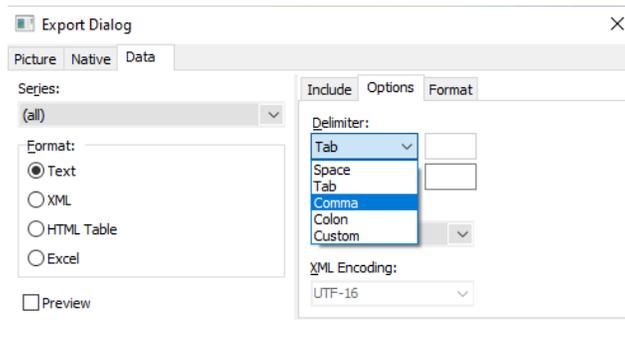


Ilustración 52 Recuadro para seleccionar el formato y características sobre las cuales se van a exportar los gráficos.

Para poder cuantificar el área por debajo del perfil topográfico se utilizó el programa Surfer. Aquí se deben de cargar los datos de cada perfil en un archivo de valores (Excel), en el primer renglón del archivo se debe colocar el número de archivos totales de la columna “X”, y en los últimos dos renglones se deben de colocar las coordenadas necesarias para cerrar el polígono, para que así el software pueda calcular el área de dicho polígono (ilustración 53).

D2		
	A	B
1	23	0
2	0	0
3	5	3
4	13	6
5	18	9
6	24	11
7	30	12
8	34	10
9	46	7
10	51	9
11	73	7
12	98	7
13	111	9
14	135	9
15	148	11
16	150	12
17	178	9
18	180	8
19	208	9
20	214	12
21	215	12
22	225	11
23	225	0
24	0	0

Ilustración 53 Ejemplo de cómo deben de ser cargados los archivos de coordenadas en el software surfer.

El archivo de valores se guarda en un formato de extensión .bln, posteriormente en Surfer se inserta como un Basemap, tal como se muestra en la ilustración 54.

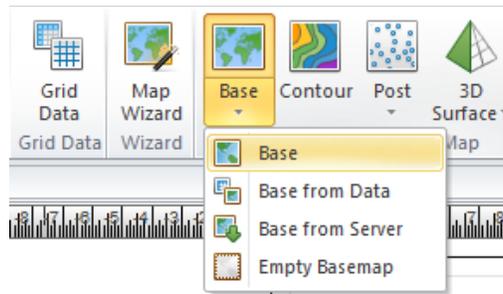


Ilustración 54 Ejemplo de cómo se debe insertar cada perfil topográfico.

Aparece el perfil de la siguiente forma (ilustración 55). En pantalla se muestran los archivos abiertos en el software se selecciona el polígono sombreado y en la parte inferior en la ventana de propiedades en la pestaña de info aparece en metros cuadrados el área que cubre el polígono relleno de color negro (ilustración 56).

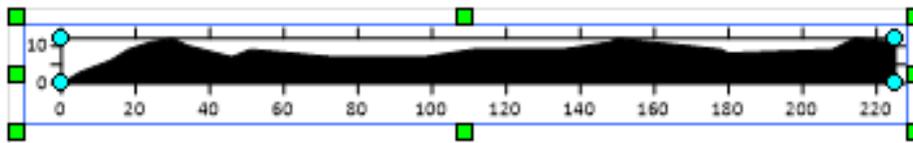


Ilustración 55 Perfil topográfico visualizado en el panel de trabajo del software Surfer.

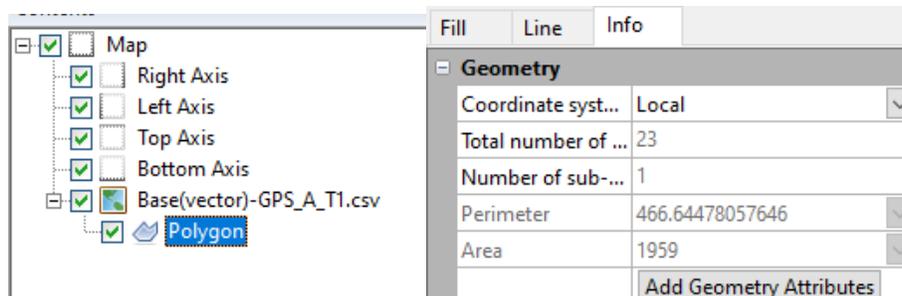


Ilustración 56 Recuadro que muestra las características del polígono, en este caso, el perfil topográfico.

## 6. Resultados

En las tablas que se muestran a continuación se observan los primeros resultados de este estudio, estas tablas comparativas fueron creadas con la información de los reportes generados después de completar el procesamiento digital de cada vuelo realizado por la aeronave.

En la tabla 3 se puede observar el número de imágenes capturadas en cada una de las misiones, de la misma forma se observa el tiempo que tardo la computadora en procesar la información para poder obtener el DEM, igualmente se puede observar la densidad con la que se creó cada nube de puntos, así como también su resolución espacial y resolución real.

# Imágenes	Altura (m)	Sobreposición	Resolución espacial (cm/píxel)	Resolución real (cm/píxel)	Densidad (Puntos/m <sup>2</sup> )	Tiempo total de procesamiento
259	44	70-80	1.09	2.18	2110	10hrs, 53min y 43s
175	55.4	70-80	1.37	2.75	1320	4hrs, 12min y 57s
125	65.9	70-80	1.65	3.3	921	2hrs, 36min y 32s
84	77.3	70-80	1.87	1.93	2690	6hrs, 59min y 19s
75	85.5	70-80	2.12	2.15	2170	5hrs, 55min y 28s
59	97.9	70-80	2.42	2.46	1660	4hrs, 20min y 0s
46	113	70-80	2.71	2.78	1300	2hrs, 38min y 39s
40	120	70-80	3	3.08	1060	2hrs, 29min y 22s
40	130	70-80	3.16	3.29	925	2hrs, 1min y 23s

*Tabla 3 Información del procesamiento digital de los vuelos de acuerdo a cada altura de vuelo.*

El procesamiento de la información en este caso culmina cuando se genera y se exporta el modelo digital de superficie, después de eso el software puede generar un reporte, en el cual se puede apreciar el error en cada proyección del sistema de referencia que la aplicación calculó a la hora de reconstruir el entorno, estos errores son provocados por causas naturales, por ejemplo, la inclinación de la cámara o aeronave al momento de hacer la captura de la imagen, aunque la aeronave y el software ofrecen algoritmos para corregir estos detalles, el ser humano es capaz controlar la magnitud de la velocidad y dirección del viento. En la tabla 4 se pueden observar los errores calculados para cada proyección.

# Imágenes	Altura (m)	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Error total (m)
259	44	2.68407	1.80854	0.502953	3.23652	3.27536
175	55.4	3.061	2.04687	0.723217	3.68231	3.75266
125	65.9	3.16281	2.1238	0.700072	3.80971	3.8735
84	77.3	4.21785	2.73986	1.03355	5.02962	5.13471
75	85.5	4.41286	2.94765	1.1433	5.30678	5.42854
59	97.9	5.09759	3.43375	1.37836	6.14622	6.29888
46	113	6.66014	4.52966	1.2558	8.05452	8.15183
40	120	5.51874	3.78366	1.1211	6.69123	6.78449
40	130	5.60365	3.91362	1.34089	6.835	6.96529

*Tabla 4 Errores en las proyecciones de acuerdo a cada altura de vuelo.*

En las ilustraciones siguientes se muestra la superficie del terreno natural mediante perfiles topográficos, donde los perfiles con el nombre “GPS-A” representan la superficie natural y el resto de los perfiles fueron producto del modelo digital de superficie generado por los vuelos de distintas alturas, con la intención de identificar cual es el modelo digital que más se aproxima a la superficie natural.

Los transectos fueron numerados del 1 al 11 de norte a sur, como se pueden observar en la ilustración 19 (página 40). En este estudio pude notar que los transectos 3, 6, 9 y 11 fueron en los que el modelo digital de superficie se aproximó de mejor manera al terreno natural, los cuales pondré como ejemplo, de la misma forma presentaré un ejemplo de uno de los mismos transectos, donde se compara el modelo digital de superficie obtenido generado por los vuelos a mayores alturas.

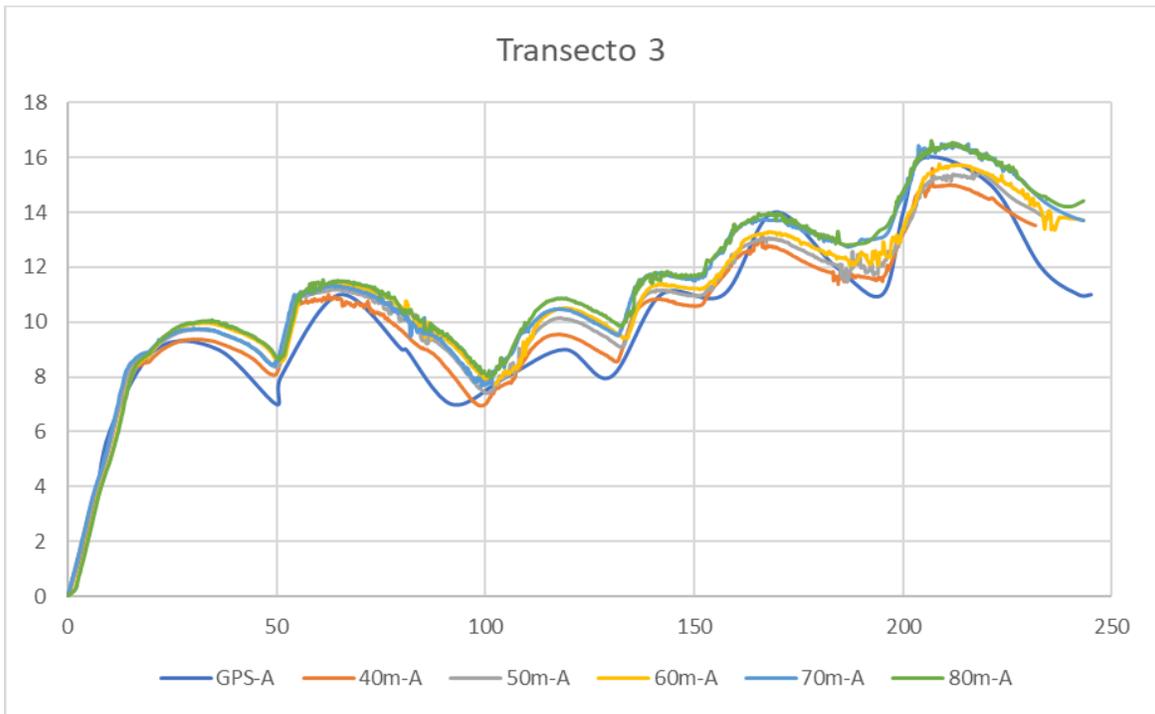


Ilustración 57 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.



Ilustración 58 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.

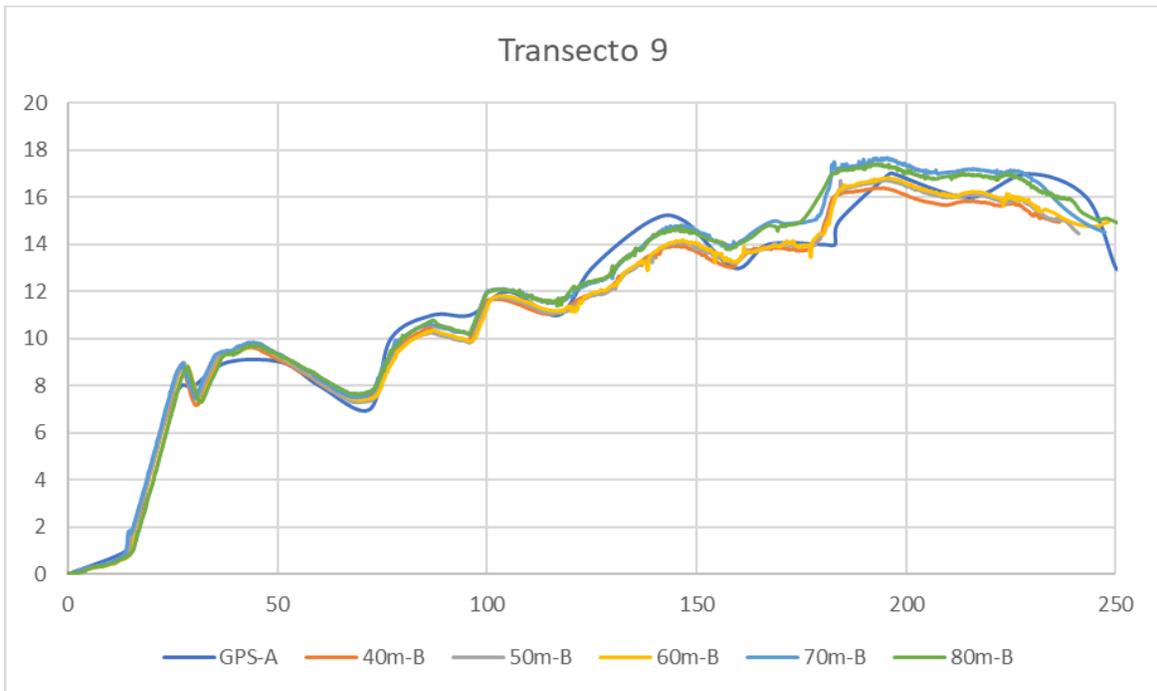


Ilustración 59 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie.

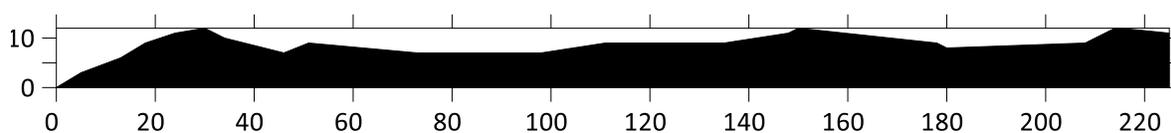


Ilustración 60 Comparación de los perfiles topográficos de la superficie natural con los modelos digitales de superficie, en este caso se observa que los perfiles generados con la información de los vuelos a una altura mayor de 90m presentan variaciones a la hora de describir la superficie.

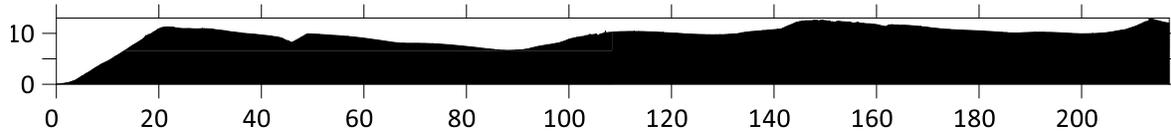
Como se logra apreciar en las ilustraciones 57, 58 y 59 los perfiles topográficos de los modelos digitales de superficie se notan más uniformes, a diferencia de los perfiles mostrados en la ilustración 60, donde claramente se puede apreciar que la trayectoria que siguen los DEM presenta mayores irregularidades, de alguna forma se presentan ruido o errores que generan cambios de altura drásticos que se representan como pequeños picos sobre los perfiles topográficos.

A continuación, mostraré los perfiles topográficos de los modelos digitales de los 11 transectos de las misiones a menor altura de vuelo y de los datos *in situ*, pero ya graficados y visualizados uno por uno mediante el software Surfer, donde además se muestra el área que cubre cada perfil calculado por la misma aplicación.

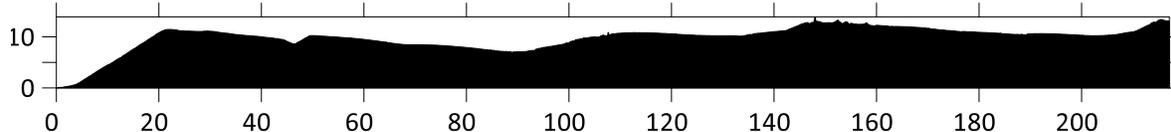
### Transecto 1



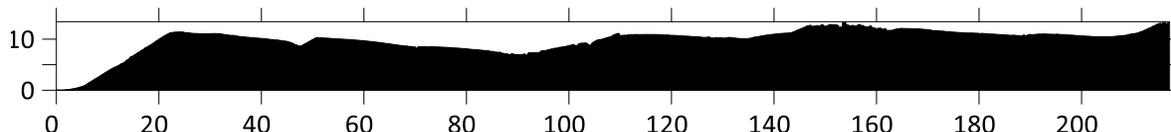
*Ilustración 61 Perfil topográfico del transecto 1, medido con GPS en modo RTK. Área = 1950m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 62 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2060.6m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 63 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2125.32m<sup>2</sup>.*

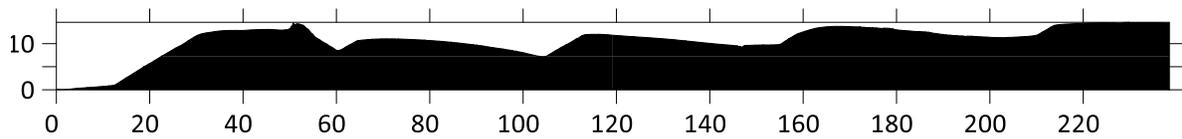


*Ilustración 64 Perfil topográfico del transecto 1, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2124.17m<sup>2</sup>.*

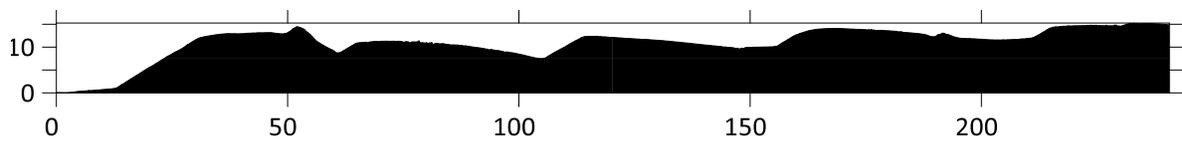
### Transecto 2



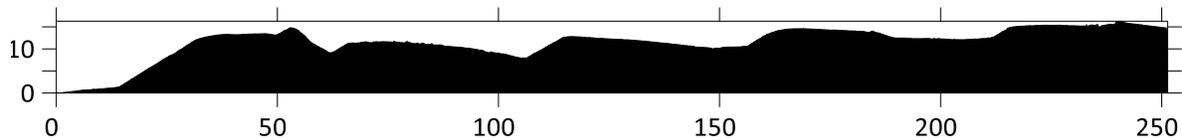
*Ilustración 65 Perfil topográfico del transecto 2, medido con GPS en modo RTK. Área = 2404.50m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 66 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2547.50m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 67 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2630.97m<sup>2</sup>.*

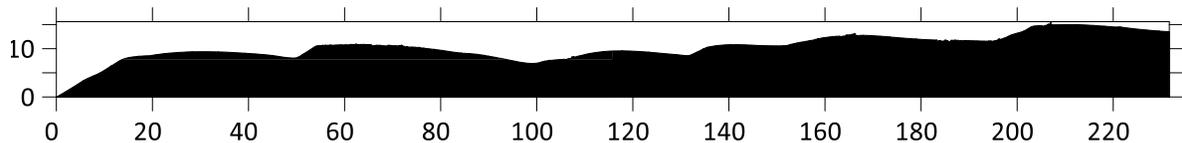


*Ilustración 68 Perfil topográfico del transecto 2, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2872.47m<sup>2</sup>.*

### Transecto 3



*Ilustración 69 Perfil topográfico del transecto 3, medido con GPS en modo RTK. Área = 2488.50m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 70 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2378.87m<sup>2</sup>.*



*Ilustración 71 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2496.20m<sup>2</sup>.*

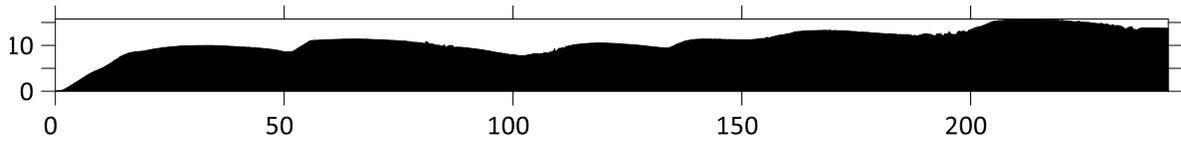


Ilustración 72 Perfil topográfico del transecto 3, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2661.10m<sup>2</sup>.

### Transecto 4



Ilustración 73 Perfil topográfico del transecto 4, medido con GPS en modo RTK. Área = 2324m<sup>2</sup>.

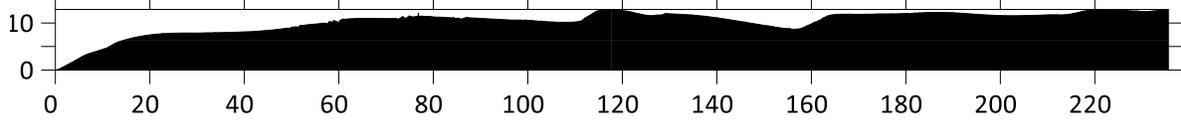


Ilustración 74 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2425.82m<sup>2</sup>.

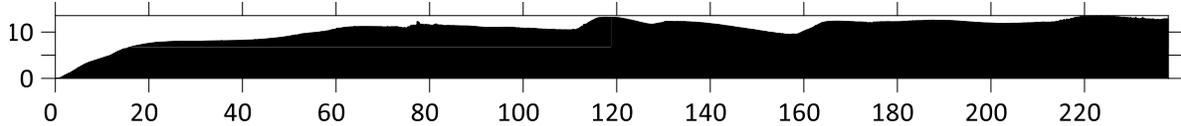


Ilustración 75 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2527.83m<sup>2</sup>.

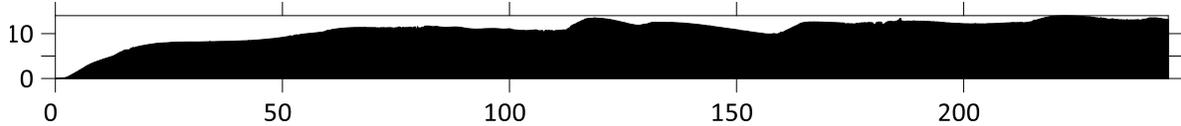


Ilustración 76 Perfil topográfico del transecto 4, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2659.44m<sup>2</sup>.

### Transecto 5



Ilustración 77 Perfil topográfico del transecto 5, medido con GPS en modo RTK. Área = 2378.5m<sup>2</sup>.

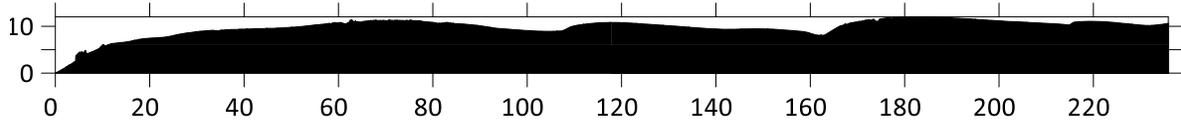


Ilustración 78 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2305.31m<sup>2</sup>.

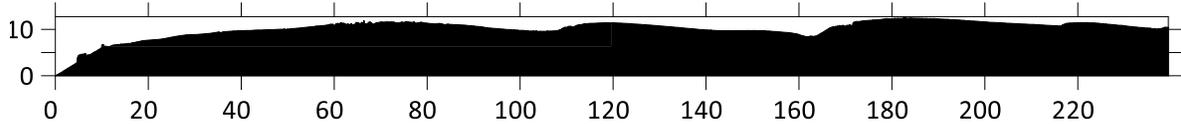


Ilustración 79 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2430.06m<sup>2</sup>.



Ilustración 80 Perfil topográfico del transecto 5, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2638.91m<sup>2</sup>.

### Transecto 6



Ilustración 81 Perfil topográfico del transecto 6, medido con GPS en modo RTK. Área = 2586m<sup>2</sup>.

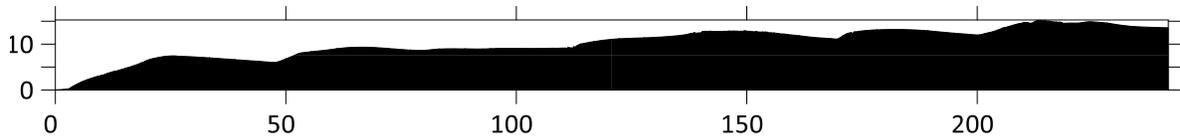


Ilustración 82 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2466.11m<sup>2</sup>.

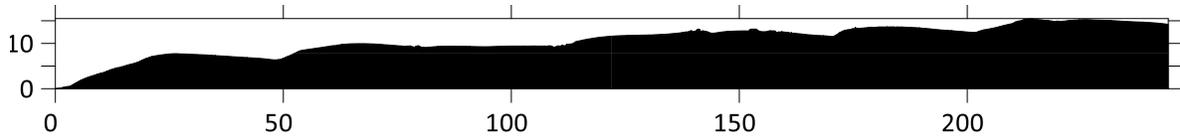


Ilustración 83 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2592.96m<sup>2</sup>.



Ilustración 84 Perfil topográfico del transecto 6, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2729.12m<sup>2</sup>.

### Transecto 7



Ilustración 85 Perfil topográfico del transecto 7, medido con GPS en modo RTK. Área = 2925m<sup>2</sup>.

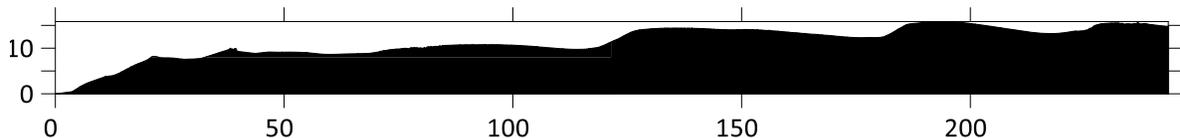


Ilustración 86 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2747.68m<sup>2</sup>.

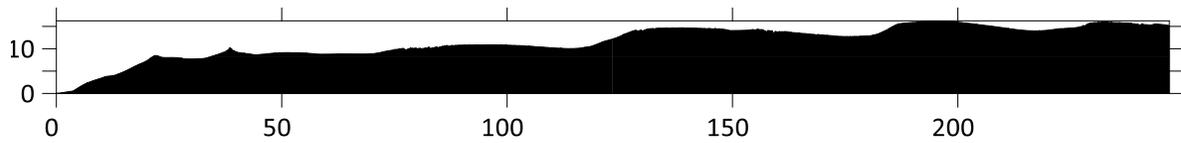


Ilustración 87 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2851.90m<sup>2</sup>.



Ilustración 88 Perfil topográfico del transecto 7, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 3013.02m<sup>2</sup>.

### Transecto 8

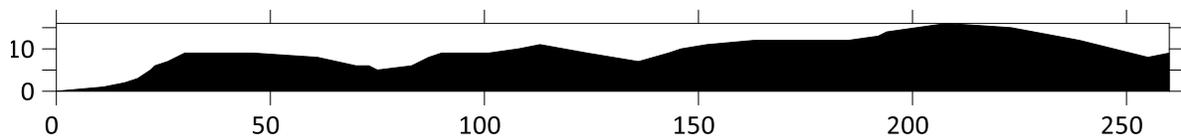


Ilustración 89 Perfil topográfico del transecto 8, medido con GPS en modo RTK. Área = 2488m<sup>2</sup>.

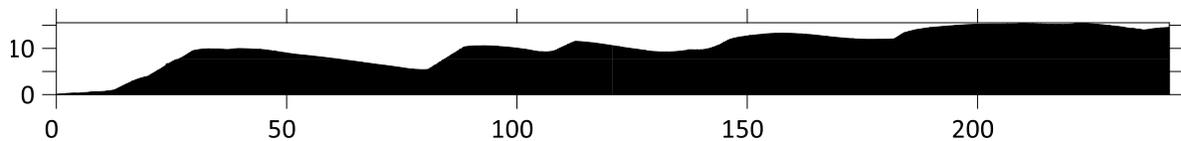


Ilustración 90 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2489.02m<sup>2</sup>.

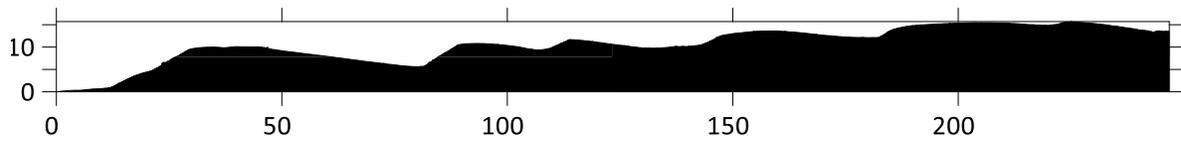


Ilustración 91 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2601.06m<sup>2</sup>.



Ilustración 92 Perfil topográfico del transecto 8, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2745.59m<sup>2</sup>.

### Transecto 9

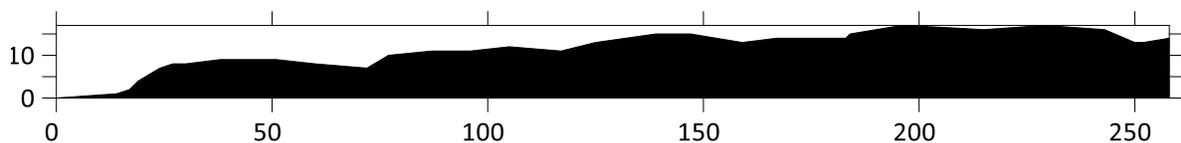


Ilustración 93 Perfil topográfico del transecto 9, medido con GPS en modo RTK. Área = 3034m<sup>2</sup>.



Ilustración 94 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2489.02m<sup>2</sup>.



Ilustración 95 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2489.02m<sup>2</sup>.



Ilustración 96 Perfil topográfico del transecto 9, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2747.46m<sup>2</sup>.

### Transecto 10

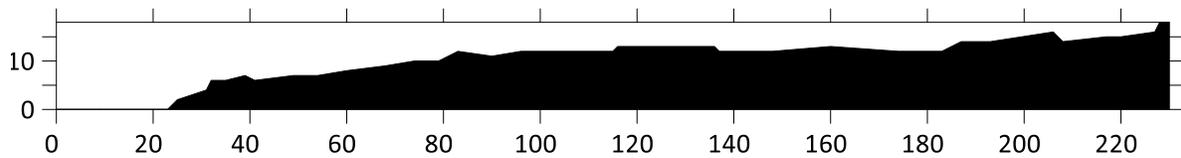


Ilustración 97 Perfil topográfico del transecto 10, medido con GPS en modo RTK. Área = 2358.50m<sup>2</sup>.

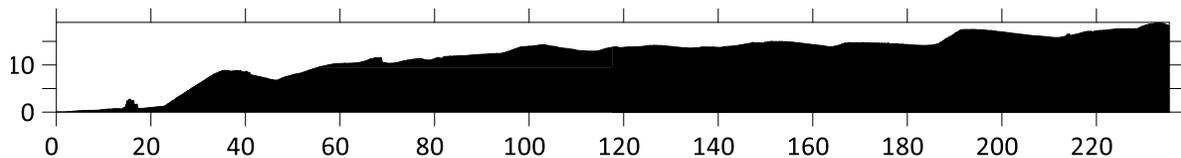


Ilustración 98 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2810.04m<sup>2</sup>.

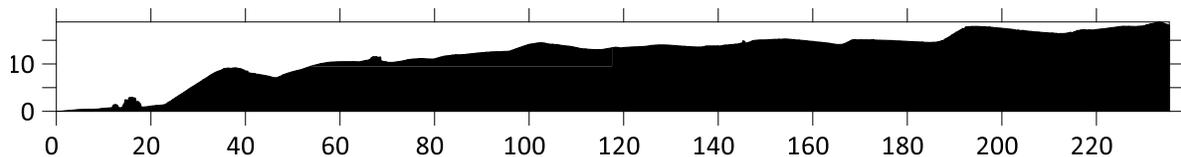


Ilustración 99 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2849.77m<sup>2</sup>.

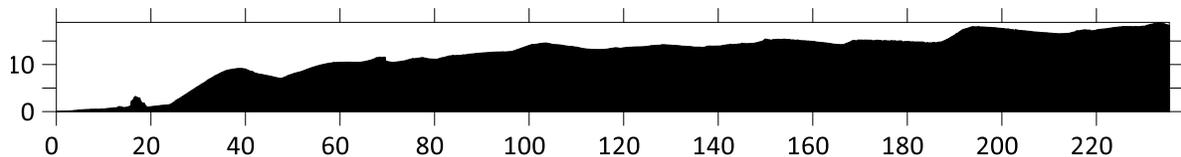


Ilustración 100 Perfil topográfico del transecto 10, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2855.69m<sup>2</sup>.

### Transecto 11

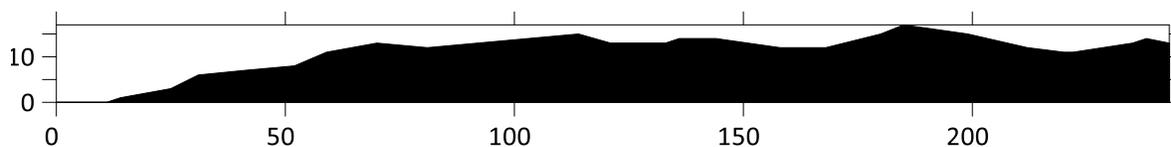


Ilustración 101 Perfil topográfico del transecto 11, medido con GPS en modo RTK. Área = 2707.5m<sup>2</sup>.

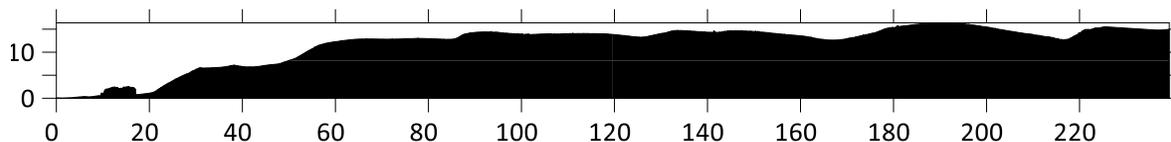


Ilustración 102 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 40m de distancia. Área = 2840.23m<sup>2</sup>.

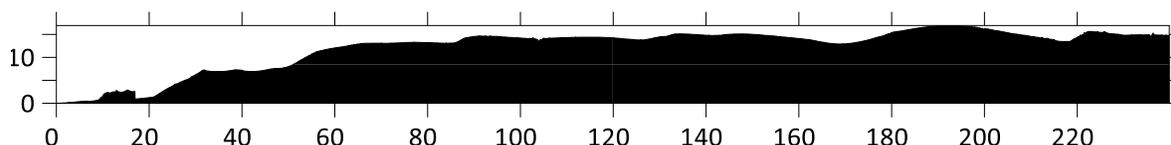


Ilustración 103 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 50m de distancia. Área = 2910.81m<sup>2</sup>.

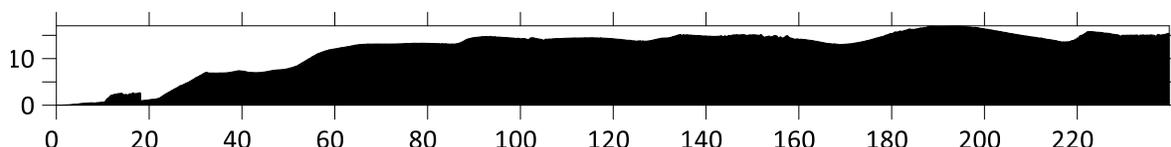


Ilustración 104 Perfil topográfico del transecto 11, obtenido mediante el DEM del vuelo a 60m de distancia. Área = 2915.58m<sup>2</sup>.

Como pudo ser observado, la mayoría de los perfiles topográficos generados mediante el DEM coinciden de manera visual con el perfil obtenido directamente del GPS al ser comparadas las siluetas de la superficie, pero para poder hacer una mejor comparación se utilizó el parámetro del área para ver las diferencias que se pudieran presentar. A continuación, se mostrarán unas tablas comparativas donde se ve la diferencia de áreas de los perfiles obtenidos mediante el DEM y el perfil del GPS.

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
1	0 (GPS)	1950	-
1	40	2060.6603	110.66
1	50	2125.3292	175.3292
1	60	2124.1759	174.1759
1	70	2249.1859	299.1859
1	80	2204.9784	254.9784
1	90	2245.8534	295.8534
1	100	2256.8750	306.875
1	110	2176.0202	226.0202
1	120	2230.1309	280.1309

Tabla 3 Diferencias de áreas del transecto 1 de los DEM con respecto a la superficie real.

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
2	0 (GPS)	2404.5	-
2	40	2547.508	143.008
2	50	2630.9701	226.4701
2	60	2872.4748	467.9748
2	70	3027.2887	622.7887
2	80	2985.3365	580.8365
2	90	2975.7343	571.2343
2	100	2978.3914	573.8914
2	110	2852.5901	448.0901
2	120	2918.7869	514.2869

Tabla 4 Diferencias de áreas del transecto 2 de los DEM con respecto a la superficie real.

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
3	0 (GPS)	2488.5	-
3	40	2378.8704	109.6296
3	50	2496.2016	7.7016
3	60	2661.1035	172.6035
3	70	2732.4977	243.9977
3	80	2756.4027	267.9027
3	90	2742.6686	254.1686
3	100	2803.0409	314.5409
3	110	2632.8375	144.3375
3	120	2701.3408	212.8408

Tabla 5 Diferencias de áreas del transecto 3 de los DEM con respecto a la superficie real.

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
4	0 (GPS)	2324	-
4	40	2425.8256	101.8256
4	50	2527.8308	203.8308
4	60	2659.444	335.444
4	70	2746.0555	422.0555
4	80	2749.6022	425.6022
4	90	2699.5988	375.5988
4	100	2771.7167	447.7167
4	110	2624.9492	300.9492
4	120	2865.8590	541.859

Tabla 6 Diferencias de áreas del transecto 4 de los DEM con respecto a la superficie real.

<b>Transecto</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia con GPS (m<sup>2</sup>)</b>
5	0 (GPS)	2378.5	-
5	40	2305.3115	73.1885
5	50	2430.0606	51.5606
5	60	2638.9116	260.4116
5	70	2691.8063	313.3063
5	80	2849.8734	471.3734
5	90	2775.2434	396.7434
5	100	2857.181	478.681
5	110	2701.8175	323.3175
5	120	2856.0411	477.5411

*Tabla 7 Diferencias de áreas del transecto 5 de los DEM con respecto a la superficie real.*

<b>Transecto</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia con GPS (m<sup>2</sup>)</b>
6	0 (GPS)	2586	-
6	40	2466.1179	119.8821
6	50	2592.9662	6.9662
6	60	2729.1269	143.1269
6	70	2923.9668	337.9668
6	80	2988.4011	402.4011
6	90	3031.16	445.16
6	100	3031.7987	445.7987
6	110	2900.2659	314.2659
6	120	2943.0136	357.0136

*Tabla 8 Diferencias de áreas del transecto 6 de los DEM con respecto a la superficie real.*

<b>Transecto</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia con GPS (m<sup>2</sup>)</b>
7	0 (GPS)	2925	-
7	40	2747.6895	177.32
7	50	2851.9082	73.09
7	60	3013.0283	88.02
7	70	3190.2218	265.22
7	80	3253.0982	328.09
7	90	3259.1767	334.17
7	100	3298.6268	372.62
7	110	3150.1085	225.10
7	120	3131.6509	206.65

*Tabla 9 Diferencias de áreas del transecto 7 de los DEM con respecto a la superficie real.*

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
8	0 (GPS)	2488	-
8	40	2489.0278	1.027
8	50	2601.0686	113.068
8	60	2745.5937	257.593
8	70	2923.4524	435.452
8	80	2951.1664	463.166
8	90	2936.6085	448.608
8	100	3061.3777	573.377
8	110	2938.0947	450.094
8	120	2963.9737	475.973

*Tabla 10 Diferencias de áreas del transecto 8 de los DEM con respecto a la superficie real.*

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
9	0 (GPS)	3034	-
9	40	2489.0278	544.972
9	50	2637.6864	396.313
9	60	2747.4633	286.5367
9	70	2873.44964	160.55
9	80	2968.3584	65.641
9	90	3002.7836	31.216
9	100	3020.4527	13.547
9	110	2863.5085	170.491
9	120	3062.088	28.088

*Tabla 11 Diferencias de áreas del transecto 9 de los DEM con respecto a la superficie real.*

Transecto	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Diferencia con GPS (m <sup>2</sup> )
10	0 (GPS)	2358.5	-
10	40	2810.0414	451.541
10	50	2849.7765	491.276
10	60	2855.6944	497.194
10	70	2969.8422	611.342
10	80	2967.0761	608.576
10	90	2987.4071	628.907
10	100	2983.3026	624.802
10	110	2821.9114	463.411
10	120	2948.7659	590.265

*Tabla 12 Diferencias de áreas del transecto 10 de los DEM con respecto a la superficie real.*

<b>Transecto</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Diferencia con GPS (m<sup>2</sup>)</b>
11	0 (GPS)	2707.5	-
11	40	2840.2322	132.732
11	50	2910.8193	203.319
11	60	2915.5852	208.085
11	70	3038.8747	331.374
11	80	3003.6036	296.103
11	90	3013.6126	306.112
11	100	3035.7051	238.205
11	110	2837.4873	129.987
11	120	2777.6592	70.159

*Tabla 13 Diferencias de áreas del transecto 11 de los DEM con respecto a la superficie real.*

## 7. Conclusiones

De acuerdo con los resultados, puedo concluir que para este estudio la altura de vuelo óptima para obtener el modelo digital de superficie que más se aproxima a los datos recolectados *in situ* (o a la superficie real), es la altura de 40m. Hay que tener en cuenta que en la zona de estudio no había construcciones o edificaciones, además de que la vegetación existente no era muy alta.

De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas anteriores puedo decir que mientras más cerca se encuentra la aeronave de la zona de estudio, el modelo digital de elevaciones o superficie tendrá mejor calidad y será más aproximado al terreno natural en cuanto a las magnitudes de sus dimensiones para un levantamiento topográfico mediante el uso de drones y técnicas de fotogrametría sin contar con puntos de control terrestres.

Es importante hacer notar que cuanto más baja sea la altura de vuelo, más grande será la cantidad de imágenes que se necesitarán para poder cubrir la zona de estudio, además de que esto implica mayor capacidad de almacenamiento y los tiempos de procesamiento para obtener el producto final que es el DEM serían más largos, claro que cuanto más largo es el tiempo de procesamiento y más memoria de almacenamiento se ocupe, se requiere de equipos (computadoras) más robustos, es decir, el hardware necesitará mejores procesadores, tarjetas gráficas, discos duros (memoria de almacenamiento).

Otro aspecto importante es que mientras la altura de vuelo en una misión sea baja, el error en cada una de las proyecciones, tanto en X, como en Y y en Z es más cercano a cero, por lo cual resulta más preciso trabajar con imágenes capturadas lo más cerca posible de la superficie. En su contra parte, si el vuelo fuera realizado a una gran distancia del terreno, el error en las proyecciones aumentaría y por lo tanto la información no sería de lo más confiable para fines de topografía.

De lo anterior se puede establecer un rango de distancias (tabla 16) para la altura de vuelo, donde se puede especificar cuáles serían las distancias consideradas como cortas o que podrían ser apropiadas para estudios de topografía sin utilizar puntos de control.

<b>Altura de vuelo</b>	<b>Eficacia</b>
Desde 0m hasta 40m	Altura de vuelo óptima para volar sin utilizar puntos de control.
Desde 40m hasta 70m	Pueden ser consideradas, pero pueden presentar poca exactitud.
Mas de 70m	A partir de estas distancias debería considerarse utilizar puntos de control en caso de requerir exactitud en las proyecciones.

*Tabla 14 Resumen de la eficacia que puede brindar la información de un vuelo fotogramétrico con respecto a su altura de vuelo.*

## 8. Referencias

- Wolf, R. Paul y Brinker, C. Russel, *Topografía Moderna*, HARLA, México, 1982.
- Moffitt, H. Francis y Mikhail, M. Edward, *Photogrametry*, Harper and Row, Publishers Inc., New York, Estados Unidos de America, 1980.
- Schenk, Toni, *Fotogrametría digital*, Marcombo, Barcelona, España, 2002.
- Ojeda, Waldo, *Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola*, Tecnología y ciencias del agua, México, 2017.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222017000400157](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000400157)
- Falkner, Edgar y Morgan, Dennis, *Aerial mapping*, Lewis publishers, Washington D.C., Estados Unidos de America, 2002.
- Torres, Albaro y Villate, Eduardo, *Topografía*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia, 2002.
- DO, Diario Oficial 2019.
- DJI, *Phantom 4 Advanced*, China, 2022. <https://www.dji.com/mx/phantom-4-adv>
- Gurrola, Humberto y Castañeda, Nicolas, *Bahía de Santa María La Reforma Una maravilla natural que requiere cuidado*, Ciencia y Desarrollo, México, 2015.  
<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/275/articulos/bahia-santa-maria-la-reforma.html>
- ALLPE Ingeniería y medio ambiente S.L., España, 2022 <https://www.allpe.com/>
- Facultad de Ingeniería de la UNAM, División de ingenierías civil y geomática, México 2022. <http://dicyg.fi-c.unam.mx/>
- OMEGA Engineering, España 2022. <https://es.omega.com/>
- Drones Made Easy, *MapPilot Pro / Mission plans*, California, Estados Unidos de América, 2022. <https://support.dronesmadeeasy.com/hc/en-us/categories/360005034072-Map-Pilot-Pro>
- Agisoft, 2022. <https://www.agisoft.com/>
- ESRI, ArcGIS, 2022. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>

- Golde software LLC, Estados Unidos de América, 2022. <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>
- Soluciones integrales en geomática e ingeniería espacial, Chile, 2020. <https://www.geosoluciones.cl/surfer/>
- Santillán, María Luisa, *Conoce las dunas y como cuidarlas*, Ciencia UNAM, México, 2018. <https://ciencia.unam.mx/contenido/infografia/29/conoce-las-dunas-y-como-cuidarlas>
- Puerta, Alfonso, *Análisis de curvas de velocidad de viento y altura: propuesta de identificación de patrones*, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2018. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/7361/tfm-pue-ana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guevara, Manuel, *Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la energía eólica*, Terra, Venezuela, 2013. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1012-70892013000200006](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000200006)