



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis y descripción de un
proyecto Aero-fotogramétrico
georreferenciado con puntos de
control GPS.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

Iglesias Jiménez Alejandro Yair

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Roberto de la Cruz Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo lo realice gracias al apoyo incondicional de mi familia, ustedes son mi principal motor para seguir adelante.

A mi madre Adelaida Jiménez Barrera, por el apoyo, los ánimos y enseñanzas que siempre me has brindado, por demostrarme que el esfuerzo y los valores son la clave para lograr cualquier meta.

A mi padre Wenceslao Raúl Iglesias Nava, sus experiencias son mis herramientas para resolver y afrontar cual sea la situación, gracias por tu apoyo y tus consejos.

A mi hermano Wenceslao Raúl Iglesias Jiménez, por ser mi maestro cuando más dudas tenía, por recomendarme esta gran carrera, por todo el apoyo que me ha brindado y por ser uno de mis grandes ejemplos a seguir.

A mi hermano Jorge Alberto Iglesias Jiménez, me has demostrado que con perseverancia y trabajo ninguna meta es imposible, por el apoyo, la compañía y los ánimos que siempre me ofreciste, por todo lo anterior también eres mi gran ejemplo a seguir.

Al Ingeniero Roberto De La Cruz por su apoyo que me brindo durante mis estudios en la universidad y en la realización de este trabajo. En mi opinión un gran profesor siempre dedicado a apoyar al estudiante.

Al Ingeniero Arturo Arenas por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y brindarme la información necesaria para realizar este trabajo.

A cada uno de los sinodales por ofrecerme su ayuda, sus observaciones y su tiempo en este trabajo.

Índice de contenido

1. Introducción.	7
1.1. Planteamiento del problema.	8
1.2. Objetivo general.	8
1.3. Objetivos particulares.	9
1.4. Descripción general.	9
2. Fotogrametría.	11
2.1. Historia de la fotogrametría.	11
2.2. Clasificación de la fotogrametría por el método que emplea.	13
2.3. Fotogrametría aérea.	14
2.4. Aeronave pilotada a distancia RPA.	15
2.5 Cámara fotogramétrica.	19
2.6. Imagen Digital.	21
2.6.1. Resolución.	22
2.6.2. Dimensión y profundidad.	23
2.7. Plan de vuelo.	24
2.7.1. Condiciones atmosféricas.	24
2.7.2. Línea de vuelo.	25
2.7.3. Traslape.	25
2.7.4. GSD.	27
2.7.5. Altura y duración de vuelo.	28
2.7.6. Distancia focal.	28
2.8. Procesamiento de fotografías digitales.	29
3. Sistemas de Posicionamiento Global.	31
3.1. Historia de los Sistemas de Posicionamiento Global.	31
3.2 Segmentos del Sistema de Posicionamiento Global.	32
3.2.1 Segmento espacial.	32
3.2.2 Segmento de Control.	32
3.2.3 Segmento Usuario.	33
3.3 GNSS.	34
3.4 Equipos GPS/GNSS.	34
3.4.1 Equipos GPS/GNSS de alta precisión.	35
3.5 Métodos de medición diferencial.	36

3.5.1 Método Estático	37
3.5.2 Método Estático Rápido	37
3.5.3 Método Cinemático.....	38
3.5.4 Método Cinemático en Tiempo Real.	38
3.6. Sistema de coordenadas.....	38
3.6.1 Sistemas de coordenadas geográficas (GCS).	39
3.6.2. Sistemas de coordenadas proyectadas.....	42
4. Normativa y reglamentos oficiales en México	47
4.1. Autorización y uso de RPAS en México.	47
4.1.1. Reglamento para uso de RPAS.....	48
4.1.2. Autorización para uso de RPAS fotogramétrico en México.	51
4.2. Normas y guías para el levantamiento con equipos GPS/GNSS.	51
4.3. Red Geodésica Nacional Activa RGNA.....	54
4.3.1. Formato Rinex	55
5. Descripción de un proyecto Aero-fotogramétrico.	56
5.1. Planteamiento del proyecto.	56
5.2. Fase GPS/GNSS.....	59
5.2.1. Elección del método de medición.	59
5.2.2. Trabajo en campo – medición de puntos de control GPS.	59
5.2.3. Procesamiento de datos GPS.	66
5.3. Fase Fotogrametría.	72
5.3.1. Planeación líneas de vuelo.....	72
5.3.2 Trabajo de campo – Vuelo de RPA.....	74
5.3.3. Procesamiento de las fotografías.....	80
6. Generación de información y su representación en planos.	88
7. Conclusión	91
8. Referencias.....	94
9. Referencias de Figuras.....	97

Índice de Figuras.

Figura 1. <i>Aimé Laussedat (1819 - 1907).</i>	12
Figura 2. <i>Esquema general de un proyecto aero-fotogramétrico.</i>	14
Figura 3. <i>Ejemplos de distintos tipos y usos de RPA.</i>	16
Figura 4. <i>Ejemplo y características de un RPA fotogramétrico de ala fija y multirotor.</i> ...	17
Figura 5. <i>Ejemplos de RPAS de multirotor.</i>	18
Figura 6. <i>Ejemplo de RPA de ala fija.</i>	18
Figura 7. <i>Cámara digital lineal y matricial.</i>	20
Figura 8. <i>Camara "sensefly Aeria X"</i>	21
Figura 9. <i>Descripción de una imagen digital de una sola matriz.</i>	21
Figura 10. <i>Representación de una imagen a color con las matrices RGB.</i>	22
Figura 11. <i>Imagen digital con distinta resolución.</i>	23
Figura 12. <i>Traslape longitudinal y transversal.</i>	25
Figura 13. <i>Traslape entre fotografías en una línea de vuelo.</i>	26
Figura 14. <i>Representación del GSD.</i>	27
Figura 15. <i>Comparación de diferentes distancias focales.</i>	29
Figura 16. <i>Distribución de las instalaciones del segmento espacial GPS.</i>	33
Figura 17. <i>Partes principales de un equipo de alta precisión GPS/GNSS.</i>	36
Figura 18. <i>Sistema de coordenadas geográficas en un modelo esférico.</i>	39
Figura 19. <i>Representación del sistema de coordenadas geográficas en un modelo elipsoidal.</i>	40
Figura 20. <i>Modelo Elipsoidal, Geoide, superficie topográfica y Datum.</i>	41
Figura 21. <i>Representación de las proyecciones planas.</i>	43
Figura 22. <i>Representación de la proyección cónica, tangente y secante.</i>	44
Figura 23. <i>Representación de la proyección cilíndrica en sus tres tipos de posición.</i>	44
Figura 24. <i>Ejemplo y características de un huso UTM.</i>	45
Figura 25. <i>Representación de las coordenadas UTM.</i>	46
Figura 26. <i>Trámites para la autorización de vuelo con RPAS en México.</i>	50
Figura 27. <i>Ubicación de las estaciones de la RGNA.</i>	54
Figura 28. <i>Ubicación del proyecto y primera visualización del terreno.</i>	57
Figura 29. <i>Polígonos a levantar.</i>	58
Figura 30. <i>Ubicación de la estación base.</i>	60

Figura 31. <i>Ubicación de la estación en la zona de proyecto.</i>	61
Figura 32. <i>Imagen satelital Landsat/Copernicus.</i>	64
Figura 33. <i>Registro fotográfico de 4 puntos de control terrestre.</i>	66
Figura 34. <i>Fotografías y ubicación de la estación IMIP de la Red.</i>	68
Figura 35. <i>Visualización de los lapsos de tiempo.</i>	69
Figura 36. <i>Informe del procesamiento del punto móvil 202.</i>	71
Figura 37. <i>Perspectivas de las líneas de vuelo 8.</i>	73
Figura 38. <i>Partes físicas del RPA que se utilizó durante el proyecto.</i>	75
Figura 39. <i>Imagen de la catapulta para despegues del RP.</i>	77
Figura 40. <i>Puntos de control del polígono a levantar.</i>	81
Figura 41. <i>Fotografías añadidas al software.</i>	82
Figura 42. <i>Primera nube de puntos, Vuelo No. 8.</i>	83
Figura 43. <i>Ubicación de las dianas en el polígono de interés del Vuelo No. 8.</i>	84
Figura 44. <i>Proceso de georreferenciación del punto de control 326.</i>	85
Figura 45. <i>Ortografía del vuelo número 8.</i>	86
Figura 46. <i>Ortofotografías generadas durante el proyecto.</i>	87
Figura 47. <i>Procesamiento para obtener información de polígonos de afectación.</i>	88
Figura 48. <i>Cuadro de construcción PA-3, Vuelo No. 8.</i>	89
Figura 49. <i>Ejemplo de uno de los planos generados en el proyecto.</i>	90
Figura 50. <i>Fotografía propia.</i>	93

Índice de Tablas.

Tabla 1. <i>Clasificación de los RPAS</i>	48
Tabla 2. <i>Clasificación de los levantamientos geodésicos.</i>	52
Tabla 3. <i>Clasificación de levantamientos GPS.</i>	53
Tabla 4. <i>Parámetros para equipos GPS/GNSS</i>	63
Tabla 5. <i>Estándares Geométricos de precisión.</i>	67
Tabla 6. <i>Inventario de vuelo.</i>	80

1. Introducción.

La ingeniería Geomática ofrece la oportunidad de estudiar una gran variedad de ciencias como la topografía, cartografía, geodesia, sistemas de información geográfica, percepción remota, etc., con sus diversas aplicaciones en proyectos, investigaciones, y/o estudios. Estas ciencias no son independientes entre sí, sino todo lo contrario, conocer la forma de como relacionarlas es el método para generar resultados precisos y confiables.

Con el paso de los años se han modificado los métodos de medición ajustándose a las nuevas tecnologías, por ejemplo, tenemos la forma de generar y procesar imágenes analógicas a las digitales en la fotogrametría. Utilizar la tecnología no significa prescindir de lo conocido ya que estas son los cimientos en los que se basan los equipos actuales, lo que se busca es reducir tiempos, así como eficientizar procesos y optimizar los resultados.

Otro gran factor para considerar en todos los tipos de proyectos de ingeniería son las normas y leyes vigentes, en ellas se encontrarán reglamentos, guías, limitaciones o hasta prohibiciones previamente estudiadas por dependencias oficiales que a la vez son asesorados por expertos en la materia, llevar a cabo todas las indicaciones le agrega confiabilidad a los procesos y resultados obtenidos.

El Ingeniero Geomático es capaz de llevar a cabo diferentes tipos de proyectos que van desde el monitoreo, control o revisión de obras de infraestructura, investigaciones científicas, actualización de mapas y/o planos, generación de modelos digitales de elevación o de terreno, creación de base de datos, así como programas referidos a temas geográficos, estadísticos, económicos, sociales, etc.

En los siguientes capítulos se expondrán una investigación sobre las ciencias, metodologías y procesos, normas que se utilizaron durante un proyecto del año 2018, se analizara las fases de planeación, también su ejecución tanto en campo como en gabinete y se expondrán los resultados.

Durante la carrera participe en diversos proyectos académicos siendo estos mis primeros acercamientos con las aplicaciones orientadas a la geomática aportando a mi formación como

Ingeniero Geomático, mientras que participar en este proyecto en concreto me brindo experiencias y aprendizajes diferentes.

Como estudiante no había dimensionado el esfuerzo, trabajo y la organización necesaria para cumplir con los objetivos de un proyecto real, esta tesis presentara una investigación sobre las ciencias que se emplearon, se presentarán los procesos tanto en campo como en gabinete, se expondrán fotografías capturadas durante su realización y los resultados obtenidos con el fin de ser una herramienta para ayudar a llevar a cabo no solo este tipo de proyecto, si no cualquiera referido a la geomática ya que se intentara exponer los elementos necesarios de manera particular y general.

1.1. Planteamiento del problema.

Para llevar a cabo cualquier proyecto de Ingeniería es necesario contar con los conocimientos de las etapas que lo conforman y al mismo tiempo se debe cumplir con la normativa y reglamentos oficiales. Aunque se pueden encontrar casos con ejemplos de proyectos similares, siempre existirán características únicas que se deben de atender de forma específica.

Es importante tener en cuenta que ambos factores están en constante actualización, en ocasiones la desatención en las normas, leyes, reglamentos, métodos, procesos, etc., generan imprecisiones en los datos provocando la desaprobación de los resultados y por ende se incrementan los tiempos de realización ocasionando un incremento en los costos.

1.2. Objetivo general.

A través de la descripción y análisis de un proyecto fotogramétrico georreferenciado con puntos del control GPS realizado en el año 2018, se buscará exponer todos los elementos involucrados, como las ciencias empleadas, la normativa y reglamentos oficiales, los preparativos y la ejecución del mismo, con el fin ejemplificar la metodología empleada para realizar proyectos de ingeniería a fines.

1.3. Objetivos particulares.

- I. Exponer la normativa oficial publicada en el Diario Oficial de la Federación y documentos emitidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI referidos a este tipo de proyectos.
- II. Presentar a través de la descripción de un proyecto real la organización, la planeación, el trabajo de campo y gabinete, así como los problemas que se presentaron.
- III. Describir a detalle los equipos, las metodologías y procesos que se utilizaron en todas las fases del proyecto.
- IV. Establecer la relación que existen entre ciencias como la fotogrametría, sistemas de posicionamiento global, cartografía, geodesia, etc., para generar resultados específicos.

1.4. Descripción general.

En el capítulo 2 se expondrá el tema de la fotogrametría comenzado con un breve resumen de su historia, se explican temas de la fotogrametría aérea, vehículo aéreo no tripulado, elementos principales de la cámara fotográfica, también se explicará los conceptos de un plan de vuelo y se concluirá el capítulo explicando el procesamiento de las fotografías para generar resultados.

El capítulo 3 aborda el tema de los Sistemas de Posicionamiento Global empezando con su historia, después se describirán sus tres segmentos, las partes que componen a los equipos de GPS/GNSS estándares y de alta precisión, los últimos dos temas que se exponen son los métodos de aplicación y los sistemas de coordenadas.

El capítulo 4 se basará en explicar la normativa y reglamentos oficiales en México para este tipo de proyectos, comenzando con los pasos necesarios para realizar vuelos fotogramétricos, después se describirán las normas referidas a los levantamientos con equipos GPS/GNSS y los elementos de la Red Geodésica Nacional Activa para el procesamiento de los datos en México.

En el capítulo 5 se describirá el proyecto que se realizó en el año 2018, se dividirá en dos grandes fases, el levantamiento de puntos de control con equipos GPS/GNSS con su respectivo procesamiento, la segunda gran fase es el vuelo fotogramétrico con el procesamiento de las fotografías, también se expondrán datos, fotografías y resultados reales.

El capítulo 6 describe como se obtuvo la información a través de los productos generados durante los capítulos anteriores. En el capítulo 7 se encuentran comentarios, conclusiones y opiniones propias, por ultimo los capítulos 8 y 9 contienen las referencias bibliográficas y de Figuras respectivamente.

2. Fotogrametría.

Se define como “la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías” (Quirós Rosado, 2014, p. 46). Principalmente se puede dividir en dos ramas, la aérea y la terrestre, esta última tiene su aplicación en el monitoreo e inspección de estructuras, ordenamiento territorial, entre otras actividades.

En este trabajo nos enfocaremos en la fotogrametría aérea la cual se emplea usualmente en proyectos de investigación, construcción, monitoreo o análisis de grandes extensiones de terreno, con estas fotografías se pueden generar planos, mapas y modelos que ayudan a representar de mejor manera la información espacial de las zonas de interés.

2.1. Historia de la fotogrametría.

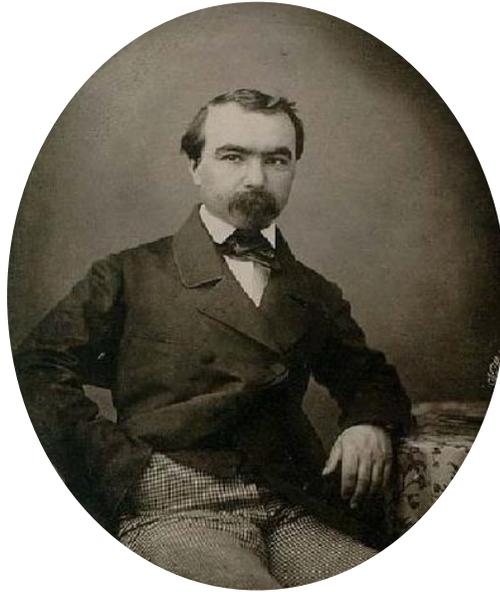
El primer antecedente a esta ciencia fue el invento de la fotografía en 1822 gracias a Joseph Nicéphore Niepce, tiempo después con la colaboración de Louis Jacques Mandé Daguerre se dedicaron a su desarrollo, pero dado el fallecimiento de Niepce, Daguerre divulgó el invento de un procedimiento de revelado llamado daguerrotipia en 1839.

La historia de la fotogrametría comienza con la necesidad de bajar los costos de los levantamientos topográficos, un oficial del cuerpo de ingenieros del ejército francés llamado Aimé Laussedat lo desarrolló presentando los primeros conceptos básicos entre 1849 y 1851 con el fin de obtener planos para representar la posición de objetos y generar mapas.

Aimé Laussedat (Figura 1) es considerado como el padre de la fotogrametría por sus aportaciones, pero a lo largo de la historia existieron personajes importantes como el alemán A. Meydenbauer quien hizo uso de estos conocimientos y los aplicó en edificios de Europa, también colaboró en la invención del fototeodolito.

Figura 1.

Aimé Laussedat (1819 - 1907).



Nota. Imagen obtenida de [1].

Aproximadamente en 1855 en Francia comienzan a realizar fotografías aéreas con la ayuda de globos aerostáticos con fines militares, en 1853 Estados Unidos realizó lo mismo para obtener mapas topográficos de ciertas zonas. Es importante mencionar que a la par del desarrollo de la fotogrametría se realizaron aportes físicos y matemático en la geometría proyectiva y también se comenzó a estudiar la aplicación de la estereoscopia¹ en las fotografías.

Otro destacado aporte científico destacado es la aplicación de marcas flotantes propuesto por Friederich Stolze en 1892 para identificar estereoscópicamente puntos homólogos en un par de fotografías. La invención de instrumentos de restitución estereoscópica se le puede otorgar a E. G. Deville en 1896 y Theodore Scheimpflug en 1898.

¹ Hace referencia a la capacidad cerebral de integrar dos imágenes en una sola, generando la sensación visual de profundidad.

La primera fotografía desde un avión se realizó en Italia por Wilbur Wright en 1909 aunque también se le atribuye a un oficial británico en 1913, esta nueva forma de capturar fotografías ayudó a realizar mejores mapas topográficos. Hasta este punto podría considerarse como fotogrametría analógica.

La fotogrametría analítica tiene sus comienzos en 1970 cuando los restituidores analógicos se empezaban a combinar con componentes electrónicos con el fin de agilizar y perfeccionar procesos. En 1990 se empieza a utilizar fotografías digitales en vez de análogas originando la fotogrametría digital.

2.2. Clasificación de la fotogrametría por el método que emplea.

La metodología que se emplea para producir información a partir de las fotografías se puede clasificar en 3 tipos:

- I. Fotogrametría análoga. Se emplean fotografías análogas y se procesan en sistemas ópticos y mecánicos, es el método con más antigüedad de los tres, de igual manera es el que representa un menor costo llevarlo a cabo.
- II. Fotogrametría analítica. De igual manera se siguen empleando fotografías análogas, pero con la diferencia que los sistemas donde se procesan son electrónicos.
- III. Fotogrametría digital. Esta rama se caracteriza por utilizar fotografías en formato digital como datos de entrada para después ser procesadas en softwares especializados. Esta tesis se enfocará en esta clasificación.

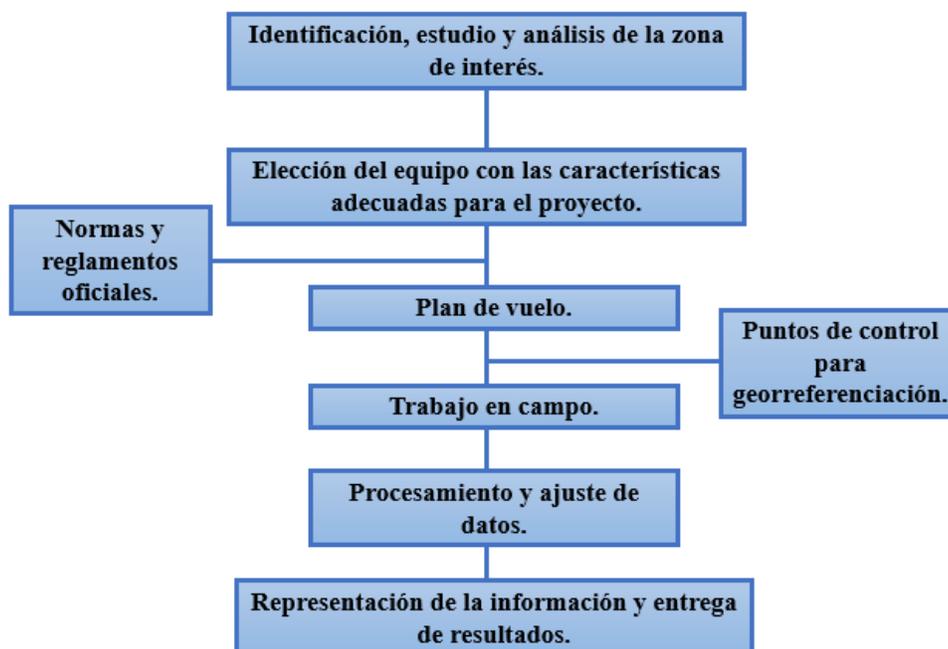
2.3. Fotogrametría aérea.

Se entiende por fotogrametría aérea a la obtención de fotografías desde un vehículo aéreo el cual puede ser o no tripulado, a este se le incorporara ya sea una cámara análoga o digital, las fotografías son capturadas acorde a un plan de vuelo, posteriormente son procesadas en softwares especializados con el fin de generar ortofotos, modelos digitales de elevación, modelos tridimensionales, entre otros productos.

Para llevar a cabo proyectos de esta índole es recomendable seguir ciertos pasos para obtener información confiable y precisa, de manera general la Figura 2 expone un esquema con los procesos a seguir en un proyecto fotogramétrico, desde la identificación de la zona de interés hasta la entrega de la información y resultados.

Figura 2.

Esquema general de un proyecto aero-fotogramétrico.



Nota. Esquema de creación propia, expone desde mi punto de vista los procesos para llevar a cabo un proyecto aero-fotogramétrico de manera general.

Si mencionamos algunas de las ventajas que tiene esta en comparación con otros métodos topográficos, en principio se pueden realizar proyectos en sitios de difícil acceso, se abarcan mayores extensiones de terreno en un lapso menor de tiempo minimizando costos y se obtiene un gran registro de los detalles mientras estos sean visibles en las fotografías.

A lo largo del capítulo se expondrán las definiciones y las características de cada una de las fases de la Figura 2 y la relación que existen entre ellas, mientras que en el capítulo 5 se ejemplificarán con el análisis y descripción de un proyecto real fotogramétrico en el que participe de manera directa.

2.4. Aeronave pilotada a distancia RPA.

En este trabajo nos enfocaremos en la fotogrametría aérea con aeronaves pilotadas a distancia, en la NOM-107-SCT3-2019 se define a este tipo de equipos como “RPA (Remotely Piloted Aircraft – Aeronave Pilotada a Distancia): Aeronave no tripulada que es pilotada desde una estación de pilotaje a distancia.” (Diario Oficial de la Federación, Punto 3.45, 2019).

El conjunto total que va desde el sistema de control remoto, la aeronave pilotada a distancia y cualquier otro elemento que se utilice en conjunto se le denomina RPAS (Remotely Piloted Aircraft System – Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia), para un mejor entendimiento se utilizarán las siglas RPA y RPAS para referirse ya sea al equipo o al sistema respectivamente.

A los RPA también se le conoce como aeronave no tripulada UA (Unmanned Aircraft - Aeronave no tripulada) pero no se limitan a estos ya que existen diferentes formas de poder identificarlos, otros nombres comunes son VANT¹ y DRONE.

Existen principalmente 4 tipos de RPAS: ala fija, multi-rotor, helicóptero y dirigible; en la Figura 3 se puede observar ejemplos de cada uno. Existen diferentes formas de emplearlos

¹ VANT - Vehículo Aéreo No Tripulado

como en la agricultura ayudando el riego de cultivo, entrega de paquetería, publicidad, investigación, monitoreo de construcciones, fotogrametría, uso recreativo, etc.

Figura 3.

Ejemplos de distintos tipos y usos de RPA.



Nota. Recopilatorio de imágenes de RPA, obtenidas de [2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8].

Para elegir un RPAS fotogramétrico se debe tomar en cuenta las características de las zonas y las necesidades del proyecto. Para cubrir grandes extensiones de terreno un RPA de ala fija es el más adecuado, mientras que en lugares con construcciones altas es recomendable utilizar de multi-rotor por su manera de despegar y aterrizar. En la Figura 4 presentan las principales características de estos dos tipos de RPAS.

Figura 4.

Ejemplo y características de un RPA fotogramétrico de ala fija y multirotor.



Nota: Figura de creación propia con imágenes obtenidas de [9 y 10].

Hoy en día existen RPA de multi-rotor como el “Phantom 4 RTK” (Figura 5) el cual tiene un tiempo de vuelo aproximado de 30 minutos y puede cubrir un área de 1 km² a una altura de 182 metros, este equipo cuenta con un módulo RTK el cual genera información de posición en tiempo real.

Otro RPA de alta precisión de tipo multirotor es el “FV8+” (Figura 5), también cuenta con un tiempo de vuelo de 30 minutos y a diferencia del anterior por su diseño puede llevar consigo múltiples sensores como multiespectrales, infrarrojos y RGB¹, lo que genera aun mayor información sobre los sitios de interés.

¹ Sensores que captan las ondas del espectro visible, lo mismo que ve el ojo humano.

Figura 5.

Ejemplos de RPAS de multirotor.

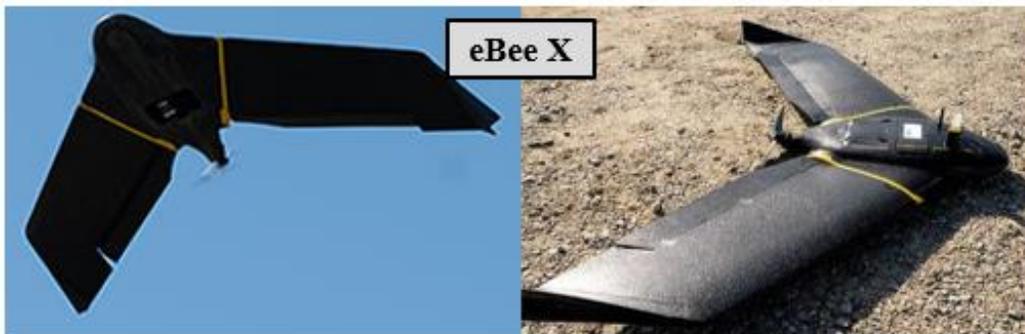


Nota: Imagen de creación propia obtenidas de [20 y 21].

En lo que respecta a los RPA de ala fija en este trabajo se describirá al “Trimble UX5” y más adelante se describirán sus principales características, componentes y funciones. Por mencionar otro ejemplo de RPA de ala fija se tiene al “eBee X” (Figura 6) con un peso de 1.6 kg, 90 minutos de vuelo llegando a cubrir una extensión de terreno aproximado de 500 hectáreas a una altitud de 120 metros, además este equipo se le puede incorporar sensores RGB, multiespectrales, infrarrojos y 3D.

Figura 6.

Ejemplo de RPA de ala fija.



Nota. Imagen de creación propia a partir de imágenes obtenidas de [22 y 23]

Tanto los RPA de multi-rotor como los de ala fija cuentan con ventajas y desventajas que deben de ser consideradas acorde al tipo de proyecto, el tiempo que se dispone, la extensión del terreno y el tipo de producto que se quiera obtener. Se deben de aprovechar las características específicas de los distintos equipos y no cometer el error de pensar que un solo tipo de RPA funciona para cualquier proyecto.

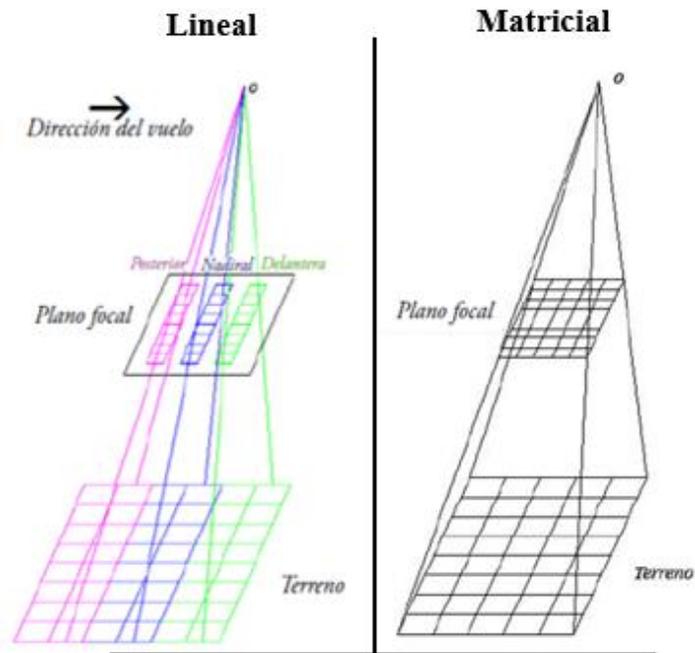
2.5 Cámara fotogramétrica.

En la fotogrametría existen dos tipos de cámaras: la análoga y la digital. Las cámaras análogas son aquellas en donde la imagen queda registrada en un rollo o película sensible a la luz que para ser utilizadas deben de ser tratadas en un laboratorio para después ser plasmadas en un papel, a este proceso se le conoce como revelado.

La cámara digital utiliza un sensor electrónico para capturar una imagen, después es almacenada digitalmente en una memoria que tienen integrada, si se compara con la cámara análoga la generación de las imágenes digitales es más sencilla y se evita el proceso de revelado que puede ocasionar errores que posteriormente se deben corregir.

En lo que respecta a las cámaras digitales existen dos tipos, la lineal la cual captura la imagen a partir de la toma de 3 bandas paralelas a la dirección del movimiento de la cámara y las matriciales con la característica principal de que se utiliza una matriz de píxeles que cubren el área de captura, ambos tipos se ejemplifican en la Figura 7.

Figura 7.
Cámara digital lineal y matricial.



Nota. Imagen compuesta obtenida de [24]

En el proyecto que se describirá más adelante se utilizó una cámara matricial “Sony a5100” y de igual manera sus características serán presentadas en el capítulo 5. Otro ejemplo de cámara matricial fotogramétrica es la cámara “sensefly Aeria X” de 24 megapíxeles, con un sensor APS-C¹ que se traduce a una cámara de menor tamaño y por consiguiente más ligeras que otras cámaras (Figura 8).

¹ (Advanced Photo System type-C, "Sistema Avanzado de fotografía tipo C") Tipo de formato del sensor.

Figura 8.

Cámara "sensefly Aeria X"



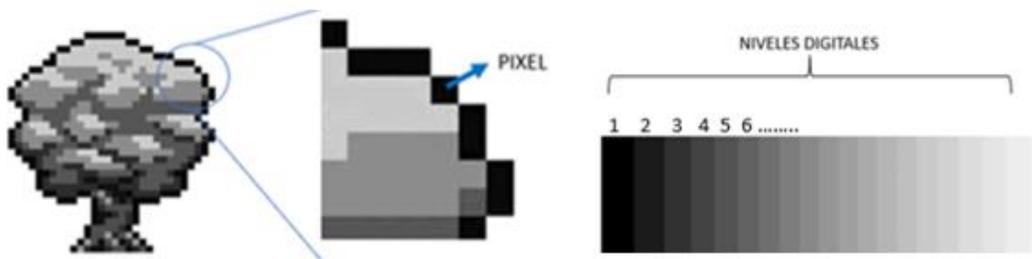
Nota. Imagen obtenida de [25]

2.6. Imagen Digital.

Una imagen digital se puede describir como una matriz compuesta por pequeños cuadrados llamados pixeles donde a cada uno se le asigna un nivel digital (Nd) y estos corresponden a una tonalidad de color, por ejemplo, las imágenes en escala de grises representan una sola matriz donde los niveles digitales son las distintas tonalidades que se pueden observar (Figura 9).

Figura 9.

Descripción de una imagen digital de una sola matriz.

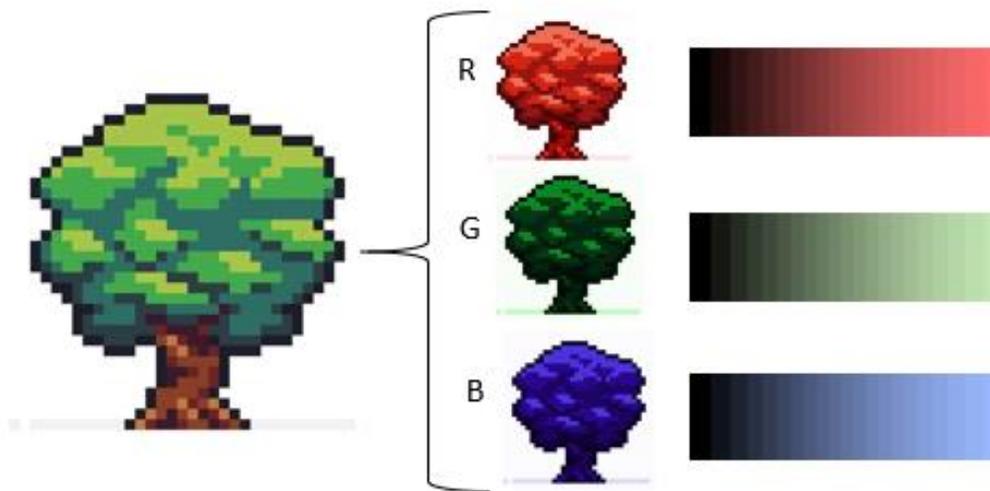


Nota. Figura de creación propia con imagen obtenida de [11].

Mientras que una imagen digital a color está compuesta por tres matrices, una para el color rojo, otra para el verde y la última para el color azul, la combinación de estas tres matrices en diferente intensidad produce el color de cada pixel. Esta combinación de colores por lo regular se les denomina imagen en color verdadero (Figura 10).

Figura 10.

Representación de una imagen a color con las matrices RGB.



Nota. Figura de creación propia con imagen obtenida de [11].

2.6.1. Resolución.

La resolución se define como la calidad de la imagen dependiendo del tamaño y la cantidad de pixeles por imagen, por ejemplo, en la Figura 6 se tiene una comparación en donde la imagen de la izquierda se compone de una gran cantidad de pixeles pequeños generando buenos detalles y formas, por otra parte, se tiene la misma imagen en la derecha, pero con la diferencia que el tamaño del pixel es mayor, así como una disminución del número total de ellos provocando bastante distorsión.

Figura 11.

Imagen digital con distinta resolución.



Nota. Figura de creación propia con imagen obtenida de [12].

Otros tipos de resolución en las imágenes digitales son el GSD o resolución espacial que es el área real que representa un pixel en el terreno, la resolución radiométrica es la cantidad de niveles digitales que contiene la imagen, la resolución espectral es la cantidad de bandas del espectro electromagnético¹ que capta un sensor y la resolución temporal se refiere al tiempo que tarda un sensor de capturar una imagen de las misma zona, esta resolución por lo regular es utilizada en las imágenes satelitales. En lo que respecta a las resolución radiométrica y espacial mas adelante se describirán a detalle.

2.6.2. Dimensión y profundidad.

La dimensión indica el ancho y largo de la imagen expresado en una unidad métrica (cm, pulgadas, etc.) o en pixeles, es común hoy en día que las cámaras indican que son de una cierta cantidad de megapíxeles, esto hace referencia

Mientras que en Quirós (2014) indica que “la profundidad de color corresponde con el número de bits utilizados para describir el color de cada pixel” (p. 60), el número de bits está relacionado con la gama de colores que pueden tener, mayor cantidad de bits significa que

¹ Conjunto de

aumenta el número de colores. La profundidad de una imagen digital también es conocida como la resolución radiométrica.

2.7. Plan de vuelo.

Antes de realizar un vuelo aero-fotogramétrico es importante crear un plan que se ajuste a las necesidades del proyecto, entre los principales parámetros que se tienen en cuenta son, las condiciones atmosféricas, las líneas de vuelo considerando los traslapes, la altura, la duración, distancia focal y la resolución que se espera tener. Cada uno de los parámetros serán descritos a detalles en los siguientes puntos.

2.7.1. Condiciones atmosféricas.

La primera condición es la luz por esto se recomienda que el vuelo se realice aproximadamente en el medio día para evitar las sombras que se pueden generar. La lluvia puede considerarse otro factor ya que las fotografías pueden resultar con distorsiones o ruidos en los procesamientos, por esto ante presencia de lluvia, aunque sea ligera la mejor opción es no realizar el vuelo.

El viento durante el vuelo puede ocasionar problemas en la ruta que se debe seguir, para resolver este problema se tiene que hacer coincidir la dirección de viento con la mayor parte posible del vuelo para no utilizar más energía de lo planeado, de lo contrario puede causar que el RPA no termine su ruta.

El despegue de un RPAS de ala fija debe coincidir con la dirección del viento ya que ayudara a alcanzar rápidamente la altura y punto de inicio de las líneas de vuelo, mientras que el aterrizaje se planea en contra de la dirección de viento con el fin de que esta resistencia causó que el RPA no se desvíe del sitio final del vuelo.

2.7.2. Línea de vuelo.

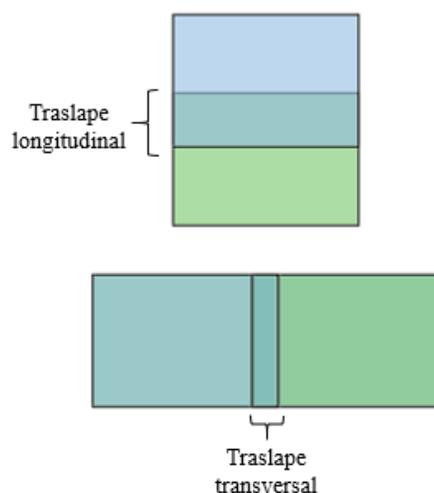
Las líneas de vuelo es la ruta que va a seguir el RPAS para cubrir un área de interés, en la actualidad se dibujan en un software especializado que representa el aérea de interés a través de imágenes satelitales o mapas. La cantidad de líneas y su separación es de acuerdo con el traslape que se plantee, la altura, distancia focal de la cámara, duración de la batería, entre otros parámetros.

2.7.3. Traslape.

Para generar productos fotogramétricos como las ortofotos, modelos de elevación, etc., se necesita que entre las fotografías existan una sobreposición tanto transversal como longitudinal como se muestra en la Figura 12, se le conoce como traslape y su fin es que existan puntos o características en común entre las fotografías para poder realizar la correlación en un software especializado.

Figura 12.

Traslape longitudinal y transversal.



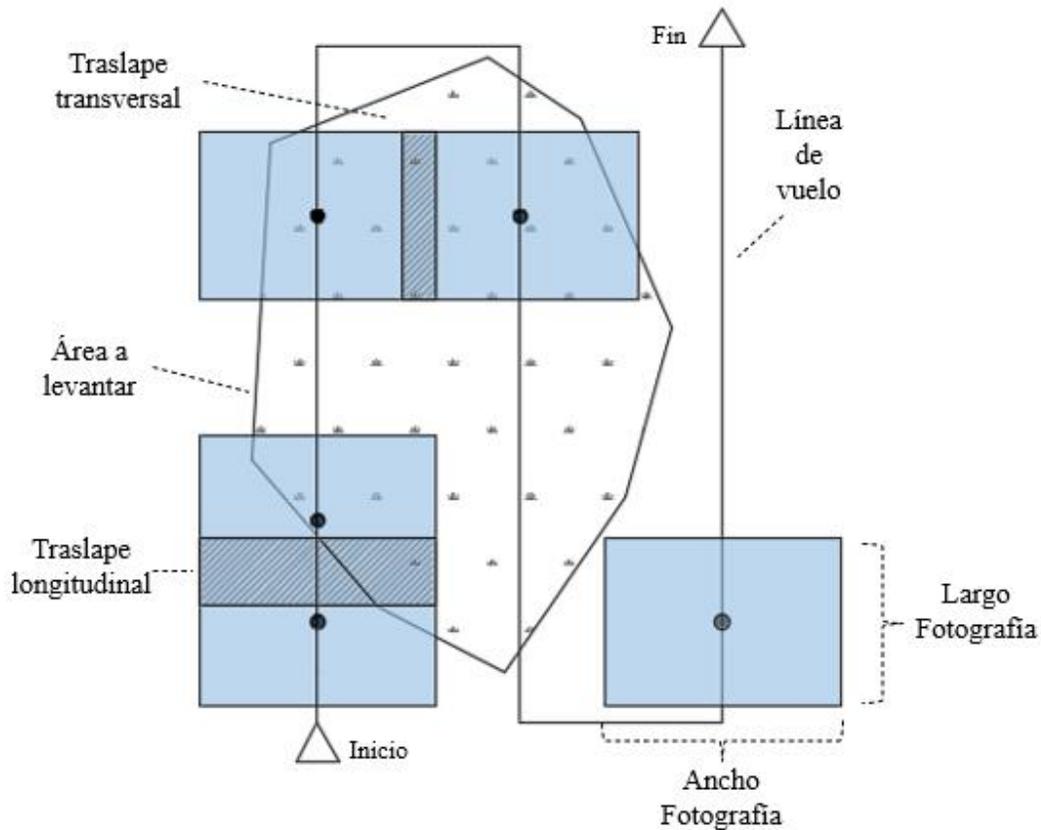
Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

El porcentaje de traslape transversal y longitudinal puede que este condicionado a lo que dicten las normas oficiales de cada país, estado o región por esto es importante consultar fuentes oficiales para la generación de estos productos. Sin embargo, es común utilizar un porcentaje de 50 a 60 en el traslape longitudinal y 25 a 30 en el traslape transversal.

En la Figura 13 se expone una representación de cómo se observarían los traslapes de las fotografías en una línea de vuelo.

Figura 13.

Traslape entre fotografías en una línea de vuelo.



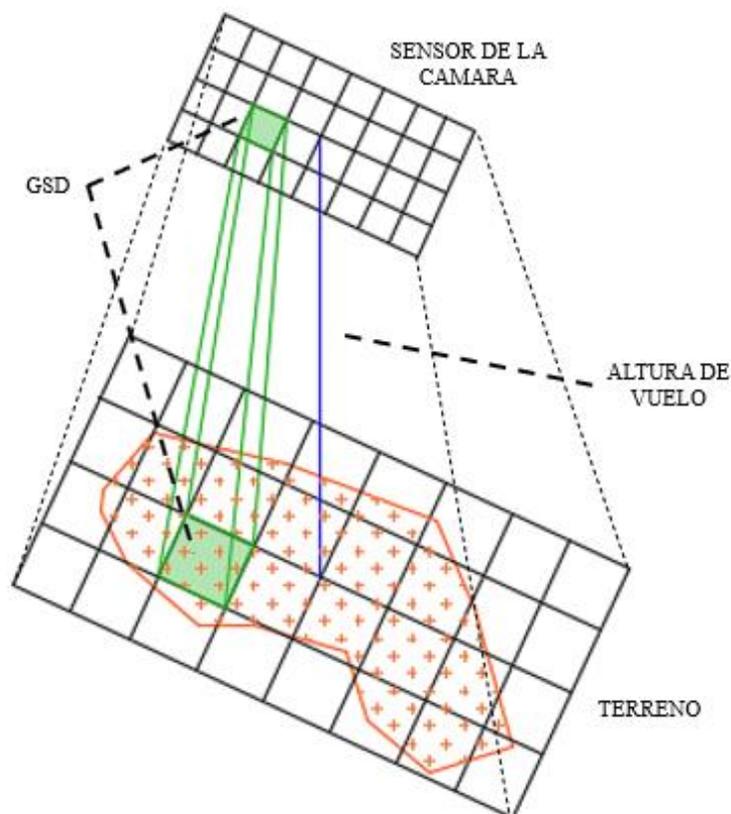
Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

2.7.4. GSD.

El GSD (Ground Sample Distance por sus siglas en inglés) es la distancia que representa un pixel en el terreno, por ejemplo, un GSD de 10 cm de largo representará 10 cm en el terreno y el área que ocupe el pixel será de 100 cm^2 . Existe una relación entre la altura de vuelo con el GSD, a mayor altura de vuelo el valor GSD incrementara y viceversa.

Figura 14.

Representación del GSD.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

Es importante considerar este valor en la planeación del vuelo y el proyecto fotogramétrico en general, GSD pequeños generarán imágenes con buena resolución a las

que se le podrán aplicar mediciones con mayor precisión. En la Figura 14 se da un ejemplo del valor GSD.

2.7.5. Altura y duración de vuelo.

En la planeación de vuelo se debe tener en cuenta la altura que tendrá que alcanzar el RPA para empezar la toma de fotografías, de acuerdo con esta será el tamaño y calidad de las fotografías. A mayor altura se podrá abarcar grandes extensiones de terreno perdiendo resolución y de manera inversa a menor altura se obtendrán mejores imágenes con mayor resolución, pero se necesitarán un mayor número de vuelos para cubrir la misma extensión de terreno.

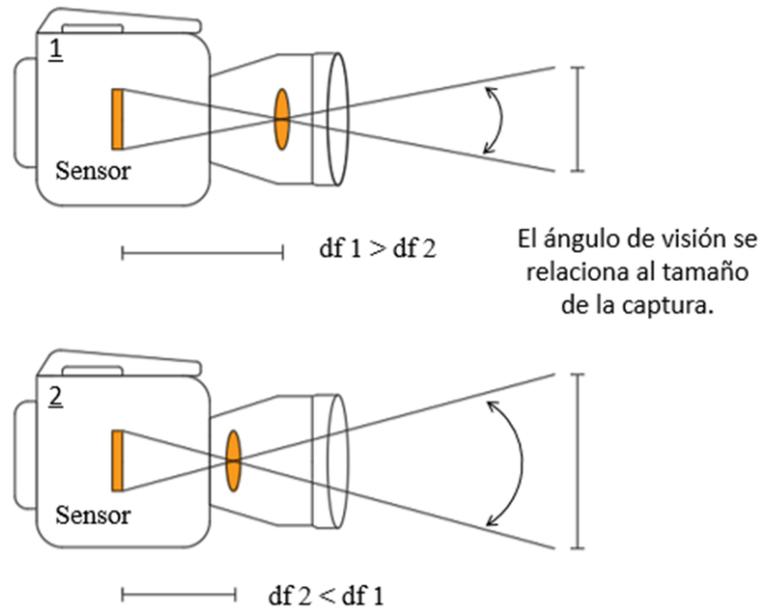
Los RPAS tienen una duración de vuelo que se ajustan a la capacidad de la batería, las condiciones climáticas, la altura de vuelo y la ruta que se plantee. En ocasiones no se podrá cubrir la totalidad del área en un solo vuelo y tendrán que planearse más de un plan de vuelo para una misma zona, también se debe considerar una parte de la batería para el aterrizaje.

2.7.6. Distancia focal.

La distancia focal es la distancia que existe entre la lente y el sensor o plano focal de la cámara fotográfica y se relaciona con el ángulo de visión, esta distancia es medida en milímetros. Una distancia focal pequeña genera un ángulo de visión amplio mientras que una distancia focal grande tendrá un ángulo de visión menor (Figura 15).

Figura 15.

Comparación de diferentes distancias focales.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

Una menor distancia focal provocará una proximidad a la escena de captura, logrando observar mejor los detalles, pero reduciendo la escena final y viceversa entre mayor sea la distancia focal la escena de captura aumentará, pero disminuirá el detalle. Tanto en la planeación como en los procesamientos es importante conocer este parámetro.

2.8. Procesamiento de fotografías digitales.

Para el procesamiento de fotografías generadas a partir de vuelos fotogramétricos se necesitan de pasos específicos para que los productos que se quieran obtener tengan una buena calidad, no se distorsionen las formas, que estén debidamente georreferenciadas, etc.

Como paso preliminar es preciso contar con información de la cámara que se utilizó, parámetros como la distancia focal, en ocasiones modelos o marcas, fechas y horas en las que se tomaron, el GSD, entre otras más dependiendo del software que se ocupe.

Uno de los principales procesos es la georreferenciación, esta es la técnica de posicionar espacialmente a un elemento o entidad en una localización geográfica con un sistema de coordenadas definidas, en esta fase se ingresan las coordenadas precisas obtenidas, por ejemplo, con sistemas de posicionamiento global o cualquier equipo que genere coordenadas.

Otro proceso muy utilizado es el modelo digital de elevaciones, es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite ilustrar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el sitio de interés.

El proceso principal en esta tesis es la orto-rectificación, la cual corrige las distorsiones geométricas y de escalas en las fotografías o imágenes satelitales producto de imperfecciones del sensor y las variaciones topográficas de la superficie de la tierra, ambas razones afectan a la distancia con la que se muestran las características de las imágenes. En este producto “se pueden realizar medidas lineales de gran precisión y sirve como base de cualquier tipo de sistema de información geográfica” (Zafra, s.f., p. 66).

3. Sistemas de Posicionamiento Global.

El sistema de posicionamiento global mejor conocido como GPS (Global Positioning System por sus siglas en inglés) es una herramienta que genera información sobre la ubicación de un punto a través de coordenadas espaciales referidas a un sistema de referencia. Esto se logra con el trabajo en conjunto de tres segmentos; el espacial, de control y el usuario.

Esta tecnología se desarrolló en un principio con fines militares y tiempo después comenzaron a desarrollarse aplicaciones civiles en la topografía, construcción, agricultura, aviación, navegación marítima y terrestre, recreación, etc., sus usos son muy amplios.

3.1. Historia de los Sistemas de Posicionamiento Global.

Como primer antecedente del GPS se puede mencionar al satélite Sputnik I creado por la URSS¹ en 1957, a raíz de este se inventó un método en el que utilizaba las señales que emitía el satélite y un receptor en tierra para obtener su órbita, después se planteó realizar este método de manera inversa y así conocer la ubicación del receptor en el planeta.

El sistema Transit desarrollado en 1958 por Estados Unidos con fines militares y puesto en operación en 1964, se utilizó 10 satélites en órbita y se basó en observaciones Doppler² para conocer la ubicación del receptor. En 1967 se permitió el uso civil principalmente para uso científico, en 1996 dejó de operar.

De nueva cuenta el Departamento de Defensa de los Estados Unidos decidió desarrollar otro sistema al cual denominaron NAVSTAR-GPS. En la primera fase se realizaron los estudios de viabilidad entre los años de 1973 y 1979, seguidamente se inició la fase dos con el desarrollo del equipamiento concluyendo en 1985.

La fase tres comenzó al finalizar la segunda, en ella se produjeron los equipamientos del GPS, se modernizaron los sistemas de la estación principal de control, el equipamiento de

¹ Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

² El cambio en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre emisor y receptor.

los usuarios y completaron la constelación de satélites, sin embargo, en 1983 ya estaba en operación este sistema generando buenos niveles de precisión y disponibilidad.

El sistema NAVSTAR-GPS logro su máxima capacidad de operación el 17 de julio de 1995 contando con 24 satélites en órbita, tres de estos designados como reservas en caso de que se presente algún problema con los demás, al declarar que la capacidad operacional es total significa que lograron los requerimientos previstos.

3.2 Segmentos del Sistema de Posicionamiento Global.

3.2.1 Segmento espacial

El sistema GPS como ya se había comentado está conformado por tres segmentos, el primero de ellos es el espacial que consiste en una constelación de satélites orbitando a una altitud aproximada de 20, 200 km de la Tierra, en la actualidad existen 31 satélites orbita, sin embargo, solo 27 se encuentran operando, el resto son reservas.

Antes la constelación principal constaba de 24 satélites activos y distribuidos en 6 planos equidistantes con 4 satélites en cada uno, con el fin de que el usuario observe en todo momento y desde cualquier parte del mundo un mínimo de 4 satélites, pero en el año 2011 se integraron 3 satélites a esta constelación para aumentar el rendimiento de operación.

3.2.2 Segmento de Control

Es el encargado de monitorear las transmisiones y obtener información de las constelaciones, calcular las efemérides¹ de los satélites con el objetivo de conocer su posición,

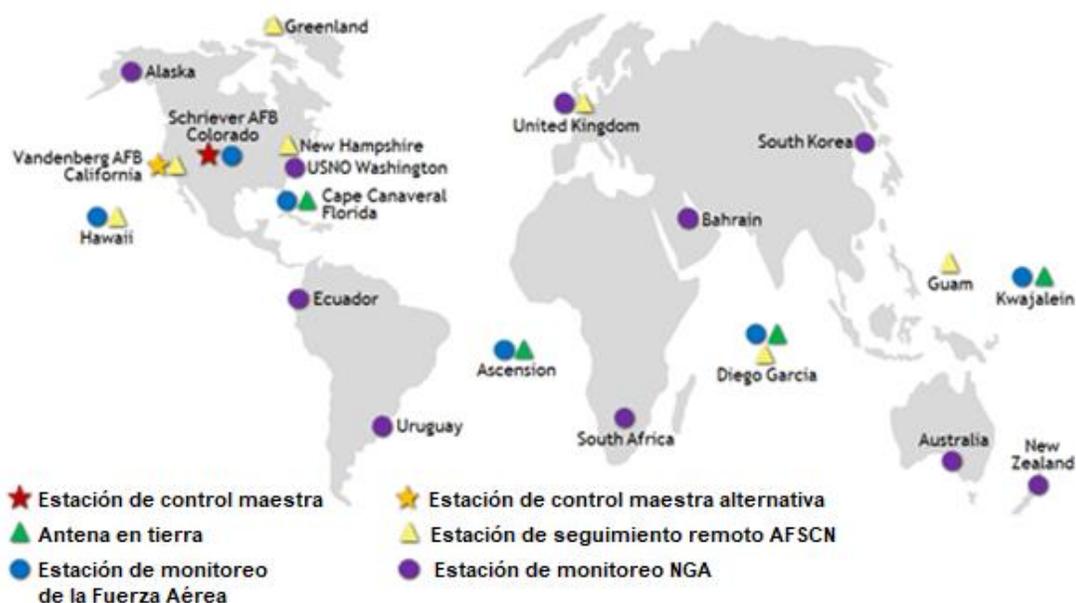
¹ Información orbital del satélite.

mandar información y controlar funciones de los satélites, este segmento mantiene sus instalaciones distribuidas por el planeta (Figura 16).

Las instalaciones están conformadas por una estación maestra y una alternativa encargándose tanto del comando como el control de la constelación, también por 11 antenas las cuales mandan y recopilan información de los satélites, también se cuenta con 16 sitios de monitoreo que brindan un seguimiento de los satélites recopilando información.

Figura 16.

Distribución de las instalaciones del segmento espacial GPS.



Nota. Figura obtenida de [13].

3.2.3 Segmento Usuario

Este último segmento este compuesto por cualquiera que haga uso de los dos segmentos anteriores con la ayuda de un equipo receptor la cual capta las señales de las constelaciones

para poder conocer su ubicación geográfica. Dependiendo del equipo será la calidad de las coordenadas que se obtengan

El funcionamiento del GPS es mediante la medición de distancias entre el receptor y un mínimo de 4 satélites. Si se considera la distancia entre el receptor y un satélite como el radio de una esfera donde el centro de esta es el satélite, de acuerdo a esta idea se plantea con tres satélites cada uno con su respectiva esfera se tendrán dos puntos de intersección, uno de ellos es la ubicación del receptor en el planeta. Agregando un cuarto satélite o más refuerza y verifica el punto de intersección ayudando al cálculo de la ubicación dando como resultado la latitud, longitud y altitud del receptor.

3.3 GNSS.

El sistema de posicionamiento global GPS no es el único que existe en el mundo países como Rusia con el sistema GLONASS, la Unión Europea con GALILEO, el BEIDOU de la República Popular de China, entre otros más que están en desarrollo, son sistemas globales de navegación por satélite o mejor conocido como GNSS.

Cada sistema tiene sus propias características como el número de satélites en órbita, la altura en la que se encuentran y las precisiones que son capaces de generar, es importante mencionar que hoy en día no todas ofrecen una cobertura tan amplia como el GPS.

3.4 Equipos GPS/GNSS

Así como existen diversas aplicaciones del posicionamiento por satélite también se desarrollan equipos que cumplan con las necesidades de cada una, estos equipos se diferencian en su complejidad de elaboración, la precisión, periodos de tiempo y el costo que resulta utilizarlo.

Los equipos pueden estar presentes en pequeños dispositivos integrados en un celular o vehículo, pero también existen aquellos que son equipos con múltiples partes y son capaces de generar una gran precisión para proyectos y trabajos de investigación, construcción, monitoreo, etc.

3.4.1 Equipos GPS/GNSS de alta precisión.

Cuando la aplicación de estos sistemas de posicionamiento necesita de precisiones exactas se recurre a equipos especiales con la capacidad de captar más de una frecuencia emitida por las señales de los satélites, entre más frecuencias se utilicen se genera mayor precisión.

Los equipos GPS/GNSS están conformados principalmente por:

- Receptor (1).
- Antena (2).
- Controlador (3).
- Baterías recargables para los receptores (4).
- Tarjeta de memoria (5).
- Tripie (6)
- Baliza (7).
- Base nivelante (8).
- Bípode (9).
- Nivel de burbuja para baliza (10).
- Cargador de baterías (11).
- Flexómetro (12).
- Extensión (13).
- Estuche de alto impacto (14).

En la figura 17 se observa un ejemplo de las partes principales que comprenden un equipo GPS/ GNSS de múltiple frecuencia, cada equipo puede variar dependiendo de la marca o modelo.

Figura 17.

Partes principales de un equipo de alta precisión GPS/GNSS.



Notas. Recopilatorio de imágenes obtenida de [14].

3.5 Métodos de medición diferencial.

Ya se ha mencionado que existen múltiples aplicaciones de los sistemas de posicionamiento por satélites y para estas se utilizan un método específico de medición, este por lo regular depende de ciertos factores como el equipo receptor, el costo, el tiempo y la precisión que se quiera generar. Existen principalmente dos modos de medición.

Al primero se le conoce como absoluto solo se ocupa un receptor que recibe la señal de manera automática y no ocupa ninguna corrección ya que no se requiere una gran precisión,

un ejemplo de estos serían los que utilizamos en el celular para conocer nuestra ubicación o la de un destino de interés.

El segundo modo es el diferencial o relativo, la principal característica es el empleo de un mínimo de dos equipos con características especiales, por ende, este método se utiliza en proyectos o trabajos que requieren una mejor precisión. Existen principalmente 4 tipos de medición diferencial: estático, estático rápido, cinemático y cinemático en tiempo real.

3.5.1 Método Estático

Este método es utilizado principalmente para la medición de líneas base largas, redes geodésicas, estudios de tectónica de placas, entre otras. Se coloca un equipo fijo en un punto cuyas coordenadas pueden ser o no conocidas a este se le llama estación base, el otro equipo se coloca al extremo de la línea base, ha este se le conoce como receptor móvil.

Los datos son registrados de forma simultánea con un intervalo de registro y periodo de tiempo que estén de acuerdo con las necesidades que se tengan, por lo regular el tiempo de captura es de aproximadamente una hora, pero también depende de que tan larga sea la línea. Aunque este método es conocido por ser lento también se obtiene una gran precisión.

3.5.2 Método Estático Rápido

En este modo de medición se vuelve a ocupar un equipo como estaciona base y con uno o más equipos como receptores móviles, por lo regular se realiza esta técnica para establecer redes de control locales, levantamiento de puntos de control, etc.

Se puede obtener una gran presión en un lapso menor de tiempo, pero las distancias son menores, en la Guía metodología de la Red Geodésica Horizontal indica que “ Se debe aplicar en posicionamiento de vectores cuya distancia sea menor a 20 kilómetros aproximadamente” (Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2017 p. 10), el tiempo de medición es de 20

minuto o más y mientras se levanten todos los puntos de control se debe tener en funcionamiento a la base.

3.5.3 Método Cinemático.

El método cinemático se realiza en un lapso menor de tiempo a comparación de los dos métodos anteriores, también se utiliza una estación base de referencia y uno o varios receptores móviles. Con esta técnica se pueden realizar levantamientos de detalle, registro de trayectorias, etc.

3.5.4 Método Cinemático en Tiempo Real.

También es conocido como RTK (Real Time Kinematic por sus siglas en ingles), se coloca la estación de referencia y se configura un radio de enlace que tendrán con los receptores móviles, la diferencia particular que tiene esta técnica es que la estación base recibe las señales de los satélites y las trasmite a los móviles en tiempo real resolviendo ambigüedades, de los cuatro métodos descritos es el que menor precisión genera.

3.6. Sistema de coordenadas.

Una coordenada se define como un conjunto de números que indican la posición de un punto en un sistema definido ya sea plano o en un espacio tridimensional. El objetivo de utilizar un mismo sistema de coordenadas en cualquier proyecto es ubicar ya sea puntos, líneas, polígonos, ráster o cualquier objeto dentro de un solo marco de referencia.

Si nos referimos a los sistemas de coordenadas que nos ayudan a localizarnos en el planeta, estos se pueden dividir primero en sistemas horizontales los cuales nos ayudan a

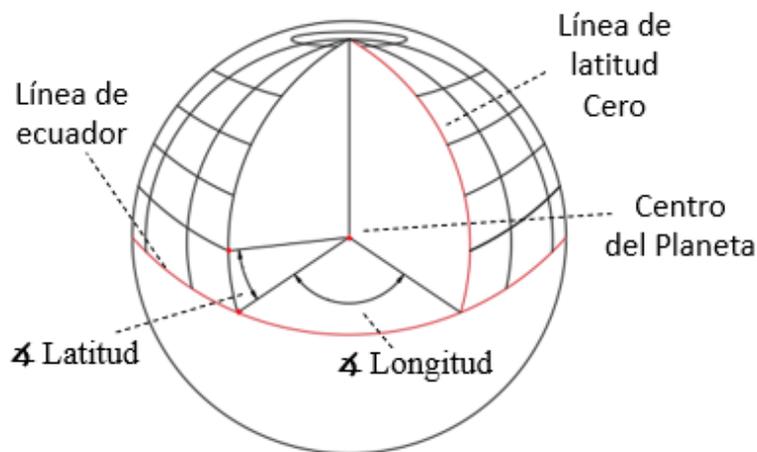
ubicarnos en la superficie terrestre dividiéndose en geográficos, proyectados y locales, el otro tipo son los sistemas verticales relacionados con la altura o profundidad.

3.6.1 Sistemas de coordenadas geográficas (GCS).

Este sistema es utilizado para ubicar puntos sobre la Tierra inicialmente a través de una superficie esférica tridimensional, las coordenadas que se ocupan se conocen como latitud y longitud los cuales son ángulos medidos desde el centro de la Tierra hasta la superficie como se muestra en la Figura 18.

Figura 18.

Sistema de coordenadas geográficas en un modelo esférico.



Notas. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

Este sistema plantea líneas imaginarias en la superficie, las verticales se les conoce como meridianos y las horizontales como paralelos. La latitud cero se define con la línea del ecuador la cual se encuentra a la mitad de los polos, mientras que la longitud cero se define a través de un meridiano base, el de uso común es el que atraviesa Greenwich, Inglaterra.

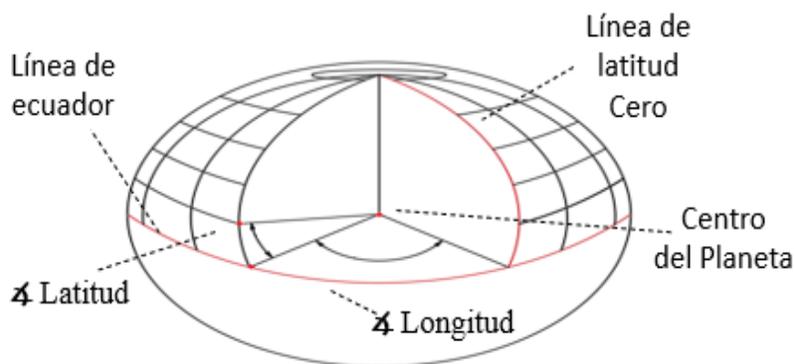
Como ya se ha mencionado las magnitudes que maneja la latitud y longitud son grados decimales o grados, minutos y segundos. Los valores de latitud son medidos desde el ecuador hasta 90° hacia el polo norte o -90° hacia el polo sur, la longitud se mide respecto al meridiano base van de 180° hacia el oeste y -180° hacia el este.

Es importante mencionar que por la forma en que se representa la tierra un grado tiene diferentes distancias dependiendo de donde se ubique, por ejemplo, un grado de longitud en la línea del ecuador representa más distancia que un grado de longitud en latitudes mayores o menores, por esta razón no es posible medir distancias ni áreas con precisión.

Otra forma de representar el planeta es a través de un modelo matemático el cual se adecua mejor a la forma con un esferoide o elipsoide (Figura 19), esta forma de representar las coordenadas geográficas genera que exista más de 1 modelo elipsoidal con sus propios semiejes, por esto dependiendo del lugar de interés puede ser que utilice un modelo diferente con sus propias características.

Figura 19.

Representación del sistema de coordenadas geográficas en un modelo elipsoidal.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

3.6.1.1. Geoide y Datum.

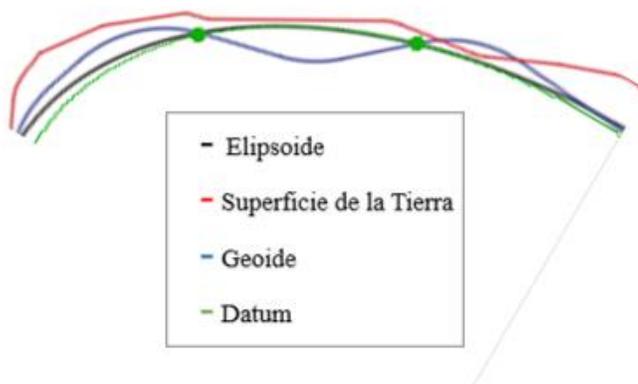
Existe una representación de la forma del planeta conocido como geoide el cual une todos los puntos de igual gravedad generando un modelo irregular que se aproxima al nivel medio del mar. El Datum se define como los puntos tangentes tanto al elipsoide como al geoide y que a la vez son coincidentes entre sí, en la Figura 20 se representa.

La utilidad del Datum es establecer puntos de referencia entre estos dos modelos ayudando a crear un origen para los sistemas de coordenadas ayudando a crear una mejor representación de la superficie del planeta a la vez que preserva las irregularidades. En cuanto a los tipos de Datum es importante mencionar que se pueden dividir en locales y geocéntricos.

Un Datum geocéntrico es utilizado de manera global con su origen en el centro de masa de la tierra, uno ampliamente utilizado es el WGS-1984. Los Datum locales se alinean a una parte específica del planeta provocando que su centro sea diferente al de la tierra.

Figura 20.

Modelo Elipsoidal, Geoide, superficie topográfica y Datum.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

3.6.2. Sistemas de coordenadas proyectadas.

Estos sistemas buscan representar en un plano coordenadas tridimensionales a través de una transformación. La forma del planeta provoca que existan deformaciones en los sistemas proyectados por eso se utilizan distintos procesos y algoritmos matemáticos para conservar características específicas generando un tipo de proyección.

3.6.2.1. Clasificación por la propiedad que conservan.

La primera forma de clasificar estas proyecciones es por la propiedad que conservan en su transformación. Las proyecciones equivalentes conservan las áreas distorsionando distancias y ángulos, las equidistantes conservan las distancias, pero no en todos los puntos del plano y las proyecciones conformes conservan los ángulos.

Existen otro tipo de proyección como las alifáticas que no conservan ninguna de las propiedades anteriormente mencionadas, siendo utilizadas para la representación del planeta en un globo terráqueo, continentes, entre otras.

3.6.2.2. Clasificación por la superficie de proyección.

Otra forma de clasificar las proyecciones es con la superficie que se utiliza. Las proyecciones planas o acimutales son tangenciales en punto, está a la vez se subdivide en gnomónicas que tiene el punto de vista en el centro de la tierra, estereográficas con el punto de vista en el lado opuesto al punto de tangencia y ortográficas con el punto de vista en el infinito, estas se pueden observar en la Figura 21.

Figura 21.

Representación de las proyecciones planas.

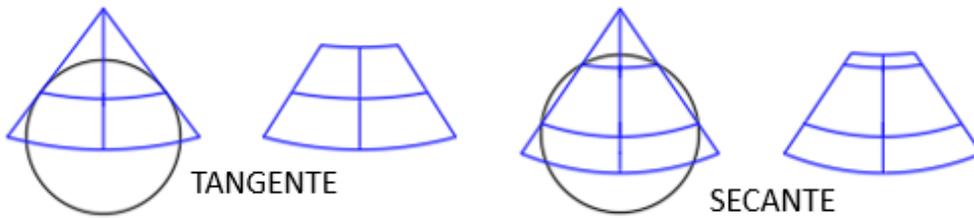


Notas. Imágenes obtenidas de [15].

Las proyecciones cónicas utilizan un cono que se sitúa sobre la superficie del planeta, puede ser tangente o secante (Figura 22) y la posición del cono provoca otra clasificación, las normales cuando el eje de simetría coincide con el eje de rotación de la tierra, transversal cuando el eje del cono forma un ángulo recto con respecto al eje de rotación de la tierra y las oblicuas que no sigue ninguna de las características anteriores.

Figura 22.

Representación de la proyección cónica, tangente y secante.

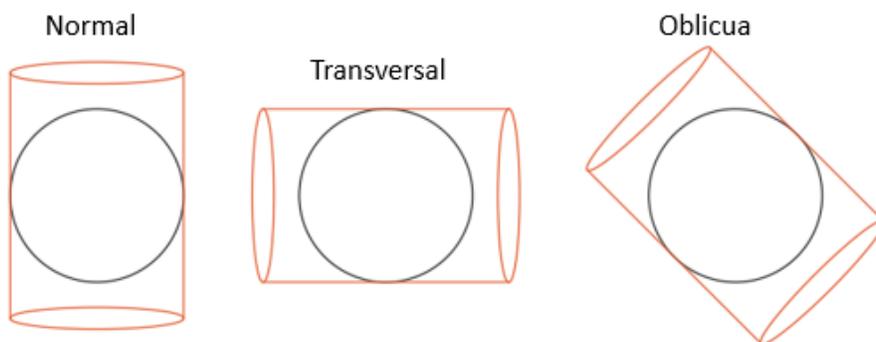


Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

Por otro lado, se tiene las proyecciones cilíndricas las cuales utilizan un cilindro que cubre a la tierra de forma tangente o secante, la posición del cilindro también genera otra clasificación, la primera es la normal cuando el eje de rotación y el eje de simetría coinciden, es transversal cuando el eje de simetría forma un ángulo recto con el eje de rotación y es oblicua cuando no cumple con ninguna de las características anteriores (Figura 23).

Figura 23.

Representación de la proyección cilíndrica en sus tres tipos de posición.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

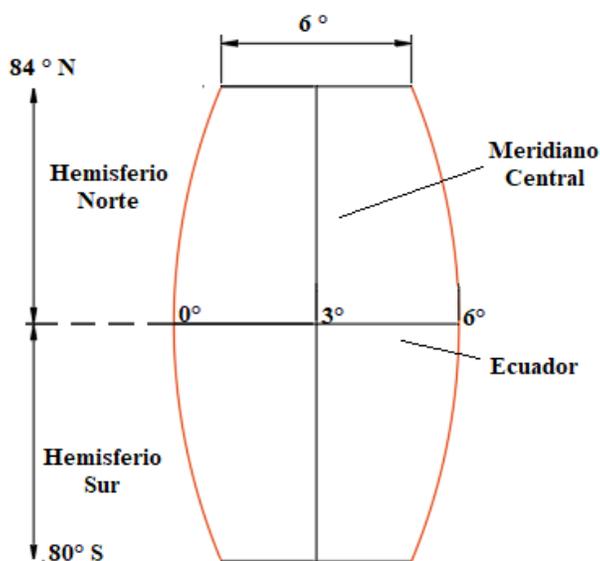
Las proyecciones por tipo de superficie se relacionan con propiedades de conservación, generando por ejemplo proyecciones como cónica equidistante o cilíndrica trasversal, cada una de estas tienen sus propias características y utilidad en los proyectos cartográficos.

3.6.2.3. Proyección UTM.

La proyección Universal Transversa de Mercator UTM se deriva de la proyección cilíndrica trasversal siendo también conforme. Para minimizar la deformación este sistema divide a la Tierra en 60 zonas iguales llamados husos con una separación de 6° de longitud, cada uno posee un meridiano central, mientras que el ecuador separa a los husos en dos hemisferios, el norte hasta la latitud 84° y el sur hasta la latitud 80° (Figura 24).

Figura 24.

Ejemplo y características de un huso UTM.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño

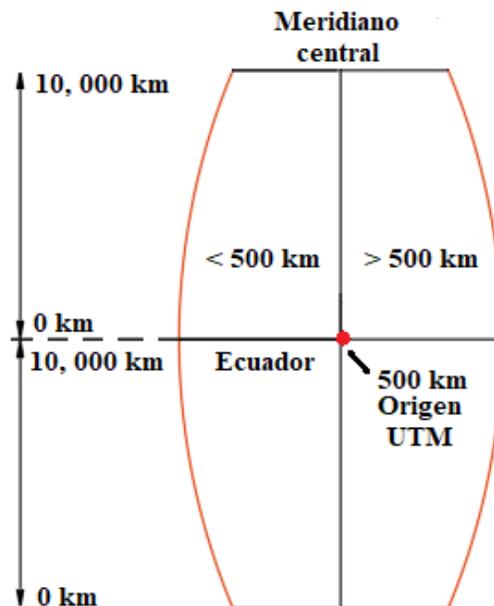
También cada huso se divide en bandas de 8° de latitud y cada una se identifica con una letra, empezando con la X en la parte superior hasta la C con excepción de algunas letras para evitar confusiones, también la banda X es de 12° a diferencia de las demás. En resumen, la proyección UTM genera zonas que se pueden identificar con un número y una letra.

Siendo una proyección plana ya no se utilizan coordenadas geográficas de latitud y longitud, son coordenada que por lo regular se expresan en metros o kilómetros. La intersección entre el ecuador y el meridiano central de cada huso define el origen, pero para no generar coordenadas negativas este origen no comienza en 0.

Las abscisas que se definen con el meridiano central comienzan en 500 km aumentando hacia el este y disminuyendo al oeste, mientras que las ordenadas se dividen con los hemisferios, en el norte se empieza desde el ecuador con 0 y va aumentando hacia el norte, pero en el hemisferio sur empieza en el ecuador con 10, 000 km y va disminuyendo hacia el sur, en la Figura 25 se ejemplifica lo anterior.

Figura 25.

Representación de las coordenadas UTM.



Nota. Figura de creación propia realizada en software de diseño.

4. Normativa y reglamentos oficiales en México

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son documentos emitidos por diferentes dependencias del gobierno y se encargan de describir como realizar procesos, servicios, productos, etc. Estas normas son estudiadas y analizadas por comités de expertos de los temas basándose en información científica y tecnológica.

Además de ayudar a la calidad de los procesos y/o productos eliminan los riesgos para la población, también si es el caso se encargan de la protección del medio ambiente. También existen reglamentos publicados en sitios oficiales del gobierno los cuales ayudan a complementar las NOMS.

Existen NOMS y reglamentos referidos a los levantamientos con tecnología de posicionamiento con satélites, autorización y requisitos para efectuar vuelos con vehículos aéreos no tripulados, entre otros temas referidos a los proyectos Aerofotogramétricos.

4.1. Autorización y uso de RPAS en México.

En México existen lineamientos que se deben seguir para poder realizar vuelos con RPAS de uso recreativo, comercial y no comercial, esto con el fin de evitar accidentes a terceras personas, prevenir que los usuarios infrinjan leyes vigentes y generar datos confiables.

En la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 establece los requerimientos para operar los RPAS en espacio aéreo mexicano. Esta norma crea una clasificación de acuerdo con el peso a la hora de su despegue, existen lineamientos en común pero también únicos como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación de los RPAS

CLASIFICACION DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTAS A DISTANCIA			
PESO MAXIMO DE DESPEGUE		USO	CUMPLIMIENTO AL NUMERAL DE LA PRESENTE NORMA OFICIAL MEXICANA
Igual o menor a 2 kg	RPAS Micro	Recreativo	4.10, 4.11 y 5.1
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8*
Mayor a 2 kg y hasta 25 kg	RPAS Pequeño	Recreativo	4.10, 4.11 y 6.1
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 6.2 y 8*
Mayor a 25 kg	RPAS Grande	Recreativo	4.10, 4.11 y 7.1
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 7.2 y 8*

Nota. Tabla obtenida de la NOM-107-SCT3-2019, punto 4.9.1.

4.1.1. Reglamento para uso de RPAS.

La NOM-107-SCT3-2019 describe un reglamento general para todo tipo de RPA en México, en la siguiente lista expondré los puntos con sus principales características:

- Se debe operar el RPA a una distancia de separación de 9.2 km de cualquier aeródromo y 0.9 km de cualquier helipuerto. La ubicación se puede encontrar en el sitio de internet de la SCT/DGAC¹ “Base de datos de aeródromos y helipuertos”.
- Está prohibido volar cerca o en zonas de acceso restringido a menos que se tramite una autorización especial y se cumpla con los requerimientos solicitados.

¹ Secretaria de Comunicaciones y Transporte / Dirección General de Aeronáutica Civil.

- Todos los involucrados deberán asegurarse de las siguientes condiciones:
 - Revisar el clima local antes del inicio de actividades.
 - Toda persona involucrada en el vuelo debe tener conocimiento de lo que se debe hacer en caso de algún accidente.
 - Corroborar el correcto funcionamiento de los sistemas de control remoto.
 - Asegurarse de contar con baterías cargadas antes de iniciar actividades.
- Está prohibido pilotar de manera negligente o temeraria, dejar caer o arrojar objetos y transportar materiales peligrosos, armas y explosivos.
- Todo vuelo se debe realizar durante el día, con excepción de que se cuente con la autorización de actividades en la noche.
- Durante el vuelo el piloto debe tener a la vista o conocimiento de la ubicación del RPA.
- Está prohibido manejar más de un RPA al mismo tiempo.
- Está prohibido operar en vehículos en movimiento, con las excepciones de contar con la autorización de operaciones especiales o que el vehículo se encuentre en el agua.
- Los RPA deben dar derecho de paso a cualquier aeronave tripulada.
- Se debe reportar cualquier accidente o daño a través de un reporte específico que se encuentra en el apéndice M de la NOM-107-SCT3-2019.
- Los RPA que sean utilizados para investigación será necesario contar con los permisos de la Autoridad Aeronáutica, el Instituto Nacional de estadística y Geografía INEGI y la secretaria de la Defensa.
- No se permite operar RPA con matrícula o registro extranjero, así como los operadores extranjeros, a menos que se cuente con los permisos requeridos.
- Se debe cumplir con el mantenimiento descrito por el fabricante.

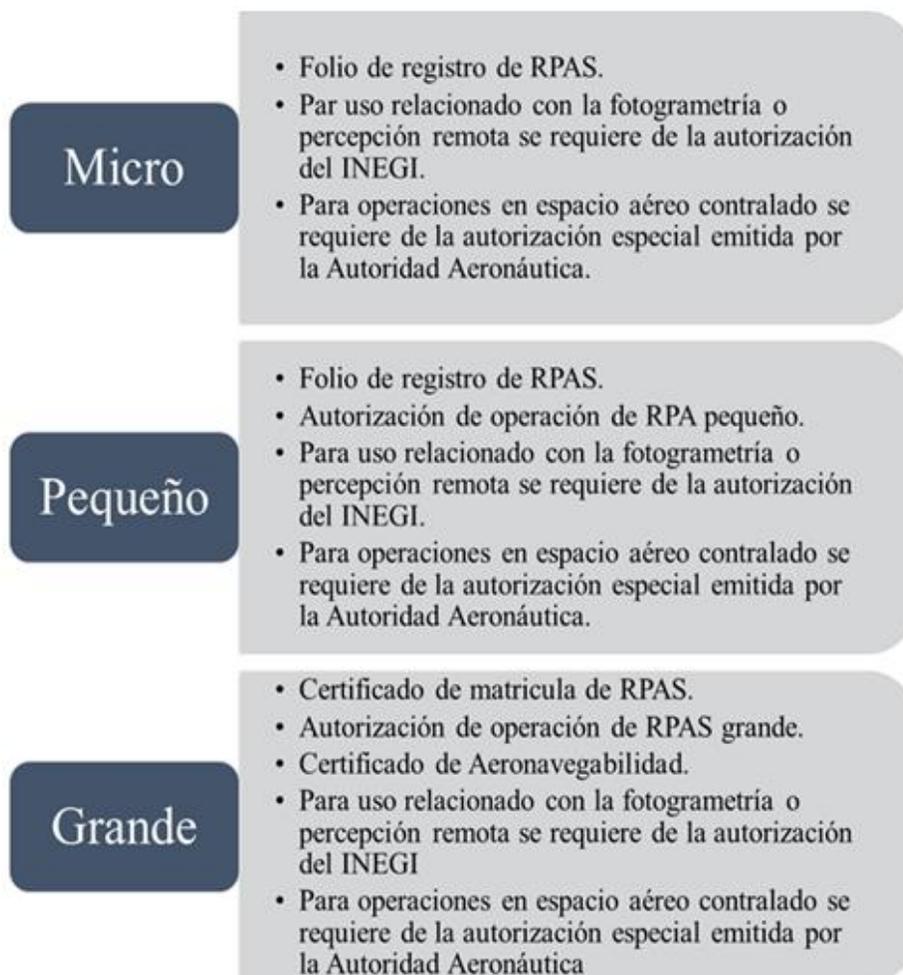
Es importante lo que se indica en la NOM-107-SCT3-2019 “El operador y/o piloto es el responsable de respetar todas la Leyes, Reglamentos y Normas de índole Federal o Local, relacionadas con Seguridad Nacional, Seguridad Pública, protección de la privacidad, propiedad intelectual, entre otras” (Diario Oficial de la Federación, Punto 4.11.3, 2019). Por

lo anterior es obligatorio para todo tipo de RPAS que se contrate una póliza de seguro de responsabilidad civil por daños a terceros.

Aunado a las reglas anteriormente descritas se tienen que solicitar permisos y certificaciones de acuerdo con el tipo de RPAS que se contemple utilizar, estos trámites son específicos para cada tipo y en ocasiones la aprobación de alguna de ellos dependerá del cumplimiento de trámites previos, en la Figura 26 están descritos los tramites de acuerdo al tipo de RPAS.

Figura 26.

Trámites para la autorización de vuelo con RPAS en México.



Nota. Figura de creación propia con información obtenida de [16].

4.1.2. Autorización para uso de RPAS fotogramétrico en México.

El Instituto Nacional de Geografía y Estadística INEGI es la dependencia oficial para autorizar levantamientos aéreos y exploración geográficas en territorio, mar y zona económica exclusiva del territorio nacional con el fin de tener un control, verificación y recabo de la información resultante de los proyectos.

Para solicitar la autorización es necesario descargar el formato de levantamiento fotogramétrico LA01 o exploración EG01, en la misma página se encuentran los formatos correspondientes para la entrega de información obtenida del proyecto, MNAC Y MEXT para nacionales y extranjeros respectivamente. El formato RLA01 es para el informe de levantamiento fotogramétrico.

4.2. Normas y guías para el levantamiento con equipos GPS/GNSS.

Como ya se ha mencionado existen diferentes métodos para llevar a cabo mediciones GPS/GNSS y se aplican dependiendo de las necesidades de cada proyecto. Para elegir la mejor opción se recomienda consultar documentos e información oficial ya sea en la Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal del INEGI y/o las normas técnicas del Diario Oficial de la Federación.

El 1 de abril de 1985 se publicó la Norma Técnica para Levantamientos Geodésicos, la cual describía y clasificaba las diferentes metodologías que existían en ese entonces, no fue hasta el 27 de abril de 1998 que se publicó un acuerdo que reforma y adiciona nuevas características y métodos.

En la reforma de 1998 se encuentra el punto XI “Levantamientos geodésicos horizontales” el cual enlista las técnicas para realizar levantamientos geodésicos, adicionando el método de técnicas diferenciales del sistema de posicionamiento global. Posteriormente en el documento explica las características y especificaciones para realizar un trabajo con este tipo de equipos.

El acuerdo de 1998 establece las órdenes y clases de acuerdo con la exactitud relativa que se puede obtener. En la Tabla 2 se muestra dicha clasificación, es importante mencionar que en todas las ordenes se pueden realizar con técnicas de GPS/GNSS, pero como única excepción las de orden C también se pueden realizar con otros equipos.

Tabla 2.

Clasificación de los levantamientos geodésicos.

Clasificación de los levantamientos geodésicos		
Orden	Clase	Exactitud relativa
AA	Única	1: 100 000 000
A	Única	1: 10 000 000
B	Única	1: 1 000 000
C		
Primero	Única	1: 100 000
Segundo	I	1: 50 000
	II	1: 20 000
Tercero	I	1: 10 000
	II	1: 5 000

Nota. Tabla del punto XI.2 del acuerdo de 1998 que reforma y adiciona las normas técnicas de los levantamientos geodésicos.

Es importante conocer la clasificación ya que puede ser un punto de partida para los parámetros y procedimientos a la hora de realizar cualquier tipo de levantamiento con equipos GPS/GNSS. En este punto la Tabla 3 contiene información adicional a las anteriores indicando las efemérides y el error base (cm).

Tabla 3.*Clasificación de levantamientos GPS.*

Clasificación de levantamientos GPS					
Orden	Clase	Exactitud relativa	P.P.M	Efemérides Base/Calculo	Error Base (En cm)
AA	Única	1: 100 000 000	0.01	Precisas	0.3
A	Única	1: 10 000 000	0.1	Precisas	0.5
B	Única	1: 1 000 000	1.0	Trasmitidas	0.8
C					
Primero	Única	1: 100 000	10.0	Trasmitidas	1.0
Segundo	I	1: 50 000	20.0	Trasmitidas	2.0
	II	1: 20 000	50.0	Trasmitidas	3.0
Tercero	I	1: 10 000	100.0	Trasmitidas	5.0
	II	1: 5000	100.0	Trasmitidas	5.0

Notas. Obtenida del punto XI.2 del Acuerdo de 1998 que reforma y adiciona las normas técnicas de los levantamientos geodésicos.

El 23 de diciembre del 2010 se publica la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional el cual actualiza los temas alusivos al sistema geodésico en las dos normas anteriormente mencionadas con el fin de que el marco geodésico sea el mismo para todos los proyectos de levantamientos geodésicos.

El marco de referencia oficial de los Estados Unidos Mexicanos es el ITRF08¹ época 2010 asociado al elipsoide de referencia GRS80, pero también es compatible con WGS84² o SIRGAS³, solo en el caso de que se necesite mayor exactitud posicional se tendrá que realizar una transformación de coordenadas al sistema oficial.

Como un apoyo extra en la “Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal 2017” publicada en la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. Se

¹ Sistema Internacional de Referencia Terrestre.

² Sistema Geodésico Mundial 1984.

³ Sistema de Referencia Geodésico para las Américas.

expone gran información desde la planeación, ejecución y procesamiento de los datos obtenido en un levantamiento geodésico con equipo GPS/GNSS contemplando la normativa oficial.

4.3. Red Geodésica Nacional Activa RGNA.

La RGNA son un conjunto de estaciones de monitoreo continuo de datos GNSS las cuales esta distribuidas de forma estratégica por todo el territorio nacional (Figura 27) para que puedan ser utilizadas desde cualquier lugar. Todas estas estaciones están debidamente documentadas tanto su ubicación y como su estado.

Figura 27.

Ubicación de las estaciones de la RGNA.



Nota. Figura obtenida de [17].

Como se menciona en la Norma Técnica del Sistema Geodésico Nacional

Toda Estación Geodésica perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referida al Marco de Referencia Terrestre Internacional definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y de Sistemas de Referencia para el año 2008, con datos de la época 2010.0, denominado ITRF08 época 2010.0, asociado al elipsoide de referencia definido en el GRS80. (Diario Oficial de la Federación, Artículo 10, p. 7)

La exactitud que maneja es de 5 centímetros y registra datos en intervalos de 15 segundos durante las 24 horas del día.

Su función principal es el apoyo como puntos de liga o de referencia para diversas actividades por ejemplo en levantamientos geodésicos, control de obras, apoyo terrestre, trabajos fotogramétricos, estudios de tectónica, investigación, proyectos donde se necesite determinar posiciones de alta exactitud, entre otros más.

Los datos se encuentran disponibles para su descarga en formato RINEX en la página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, son gratuitos con un archivo histórico de 90 días a partir del día de consulta, si se requiere datos anteriores a los 90 días se deberán solicitar en el Centro de Información y Ventas del INEGI.

4.3.1. Formato Rinex

Los datos provenientes de levantamientos geodésicos con equipos GPS/GNSS tienen un formato único y este varía dependiendo de la marca o modelo de los equipos por esto resulta difícil su procesamiento en softwares especializados, como solución a este problema se creó el formato independiente de intercambio de datos RINEX.

Este formato fue aceptado tanto por usuarios como por fabricantes, garantizando un intercambio de información libre, por lo regular todas las marcas cuentan con un programa de transformación de su formato nativo al RINEX.

5. Descripción de un proyecto Aero-fotogramétrico.

Este proyecto se realizó en la mina a cielo abierto Buenavista del Cobre localizada en Cananea en el estado de Sonora, se tenía que realizar la actualización de polígonos de afectación y cierre de la presa de jales para después ser integrados a Manifestaciones de Impacto Ambiental y Estudios Técnicos Justificativos para cambio de uso de suelo.

Ante esta necesidad se contrató a una empresa especializada llamada GEOPROCESO, esta estuvo a cargo de los levantamientos de puntos de GPS, vuelos Aero-fotogramétricos, los procesamientos de ambas actividades de campo y la generación de información a través de los productos obtenidos, así como su representación en planos.

El proyecto se llevó a cabo en el año 2018 y al manejarse grandes cantidades de datos como fotografías, archivos vectoriales, tablas de construcción, mapas, etc., solo se podrán mostrar aquellos que me fueron proporcionados y sean de utilidad como ejemplo o ayuda visual.

5.1. Planteamiento del proyecto.

Para realizar el planteamiento del proyecto es necesario tener una vista preliminar del terreno y su ubicación a través de imágenes satélites, estas imágenes serán lo más próximo a la fecha en que se realizó. En la figura 28 se muestra la ubicación y condición del terreno.

Figura 28.

Ubicación del proyecto y primera visualización del terreno.



Notas. Figura de creación propia con imágenes satelitales obtenidas de [18].

La mayoría del terreno donde se ubican los polígonos de afectación y la presa de jales cuenta con vegetación arbustiva, bosque de encinos y en general es una zona montañosa. Las características del terreno son fundamentales para la elección del método y el equipo a utilizar.

En la Figura 29 se representan los polígonos de interés que se contemplaban levantar, dado la extensión del terreno y sus características, el RPAS de ala fija es la mejor opción para realizar un levantamiento aerofotogramétrico y para georreferenciar los productos generados se ocupó equipo GPS de doble frecuencia, las metodologías que se emplearon serán descritas a detalle más adelante.

Figura 29.

Polígonos a levantar.



Notas. Figura de creación propia con imágenes satelitales obtenidas de [18].

La brigada de campo estuvo conformada por 4 personas incluyéndome, también se contó con la ayuda de personal de la mina, los cuales ayudaron principalmente al traslado y brindando asistencia en lo que se requiriera.

5.2. Fase GPS/GNSS.

Aunque hoy en día los sistemas que conforman los vehículos aéreos no tripulados con uso en la fotogrametría ya cuentan con un GPS integrado que los ayuda a georreferenciar los proyectos, se utilizan puntos de control GPS/GNSS para generar una mejor precisión en el trabajo.

De acuerdo con la normativa oficial el levantamiento de puntos de control terrestre de un proyecto fotogramétrico entra en la clasificación de orden “C segundo, clase II” y contaría con una exactitud relativa de 1:20,000 pero no se descarta que se pudiera utilizar una escala mayor.

5.2.1. Elección del método de medición.

En puntos anteriores se ha comentado de los métodos de levantamiento que existen, por las características del proyecto, las distancias entre polígonos que no excedían de los 20 kilómetros y que siempre se busca optimizar tiempos de trabajo se eligió el método estático rápido,

Si se analiza métodos como el estático que, aunque genera buena precisión el tiempo que se destina en cada punto no es factible para el trabajo, mientras que los métodos cinemático y cinemático en tiempo real generan poca precisión provocando que no sean elegibles para el proyecto.

5.2.2. Trabajo en campo – medición de puntos de control GPS.

Para el levantamiento de puntos se utilizaron 3 receptores de doble frecuencia con sus respectivos complementos, un tripie para la estación base y dos balizas con bípodes para las estaciones móviles. Como equipo extra los encargados de las estaciones móviles contaron con cámaras digitales para realizar un reporte visual, navegadores GPS, además se

confeccionaron dianas de un metro cuadrado para indicar la ubicación de los puntos de control en las fotografías.

El equipo de seguridad fue obligatorio por estar en el interior de una mina y también por las condiciones del terreno, este estaba conformado por botas con casquillo, chaleco con tiras reflectantes, casco y para ciertas zonas se utilizaron chaparreras o guantes de protección.

5.2.2.1. Estación base.

La estación base tiene que ubicarse en una zona tranquila donde el flujo de personas y vehículos sea mínimo para evitar un desplazamiento del equipo, deberá evitarse colocar el equipo cerca de construcciones, relieves o cualquier tipo de vegetación alta que impidan una buena recepción de información también es adecuado que la zona pueda ser monitoreada de forma constante.

Se propuso la zona que se muestra en un círculo rojo en la Figura 30 ubicada dentro del departamento de ecología de la mina, es una pequeña explanada entre edificios de un solo piso, por lo que no representaban ninguna obstrucción para la recepción de datos.

Figura 30.

Ubicación de la estación base.



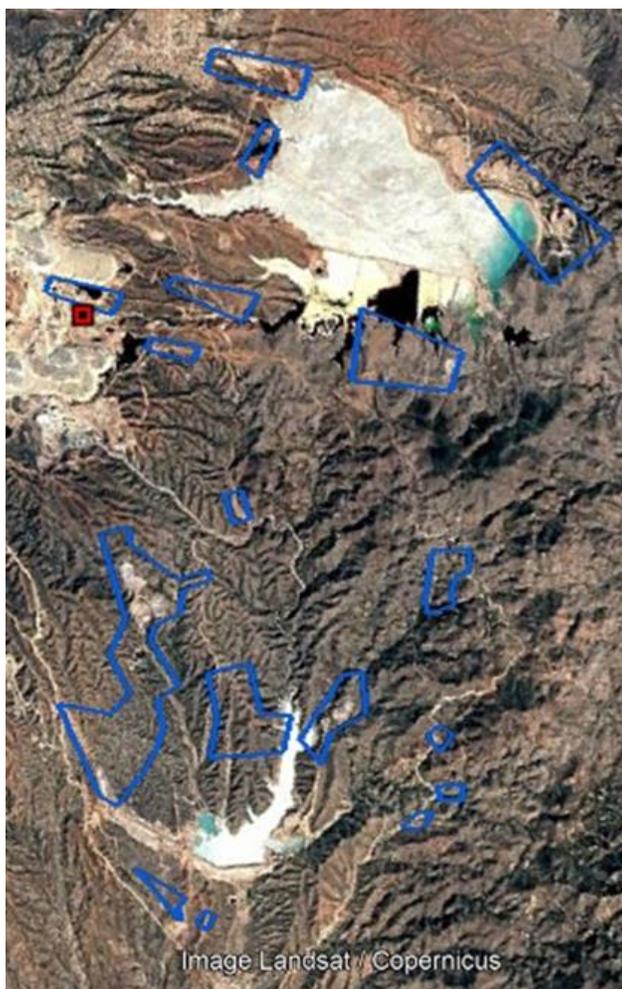
Nota. Imagen satelital del 2018, obtenida de [18].

Esta zona fue ideal ya que las distancias a cualquier punto de los polígonos a levantar no excedían los 20 kilómetros, además en las primeras visitas a esta zona se confirmó que la afluencia de vehículo y personas era mínima.

También es importante señalar que la zona estuvo en constante monitoreo por ser el departamento donde se resguarda parte del equipo GPS. En la Figura 31 se representa la ubicación de la estación base en relación con los polígonos y zonas de afectación.

Figura 31.

Ubicación de la estación en la zona de proyecto.



Nota. Figura de creación propia con imágenes satelitales obtenidas de [18].

Todos los días en que se realizaron levantamientos de puntos de control GPS la primera actividad fue posicionar la estación base en el punto fijo que se marcó, este equipo utilizó un trípode para asegurar su posición en todo momento y una batería externa por el tiempo que estaría en funcionamiento.

Para configurar el equipo primero se vincula el receptor con la controladora y se ingresan parámetros como la mascarilla de elevación, intervalo de registro, altura del equipo, entre otras características que pueden variar dependiendo la marca.

En la Tabla 4 se muestran ciertos parámetros que se recomiendan utilizar dependiendo de la actividad y la metodología. Teniendo como referencia lo anterior se utilizó mascarilla de elevación de 15° y el intervalo de registro se configuró cada 5 segundos.

Tabla 4.

Parámetros para equipos GPS/GNSS

Método	Actividad	Parámetros para equipos GPS/GNSS					
		Intervalo de registro (segundos)	Tiempo de observación	Equipo GPS/GNSS	Levantamiento	Elevación de la máscara	Medición de la altura vertical de la antena
Estático	Punto de control terrestre para triangulación	5	60 a 180 min.				
Estático rápido	Punto de control terrestre para triangulación. Control de calidad para orto imágenes.	Base: 5 Móvil: 5	Base: durante todo el levantamiento (Tiempo común con los Móviles) Móvil 45 a	Doble banda	Diferencial	10°	Al inicio y al final
Estático	Subsidencia	15	3 h				
Estático	GPS sobre bancos de nivel	16	4 h	Doble banda	Diferencial	15°	GPS GNSS Medición simultanea sobre dos Bancos de Nivel
Absoluto	Aquellas que requieren exactitudes métricas	N/A	N/A	Doble banda Una banda Navegador	Absoluto	N/A	N/A

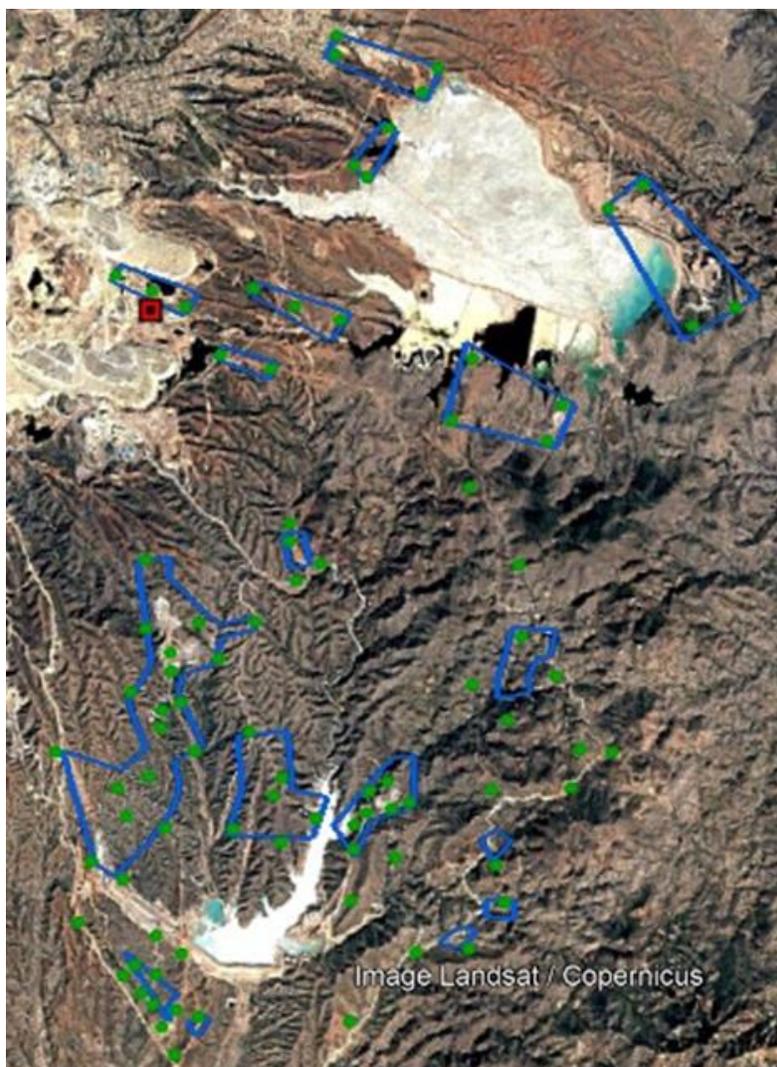
Notas. Tabla obtenida de la Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal 2017, punto 3.2.2.1.

5.2.2.2. Puntos móviles.

Como preámbulo del levantamiento de los puntos móviles se debe de planear su distribución en los polígonos a levantar. En la Figura 32 se expone la ubicación propuesta de cada punto de control, con la ayuda de las imágenes satelitales se buscó que los sitios tuvieran buen acceso y estuvieran fuera de cualquier peligro.

Figura 32.

Imagen satelital Landsat/Copernicus.



Nota. Figura de creación propia con imágenes satelitales del 2018 obtenida de [18].

La ubicación de los puntos de control deben ser acordes al tamaño del polígono, si son de grandes extensiones el número de los puntos aumentara, también se recomienda que sean posicionados en las esquinas o sitios estratégicos para cubrir la mayoría de las zonas.

Las brigadas de campo encargadas de las estaciones móviles se desplazaron con la ayuda de navegadores GPS, el uso de estos equipos fue necesario ya que son zonas donde los caminos no están marcados y no existen referencias a seguir.

Los equipos se configuraron con los mismos parámetros que en la estación base, se estableció una altura de 2 metros para todos los puntos de control, mientras que la recepción de datos fue entre 25 a 35 minutos, monitoreándose que en todo momento fuesen captados un mínimo de 4 satélites.

Al termino de cada recepción de datos se realizó un registro del punto de control con 4 fotografías desde distintas direcciones, esto con el fin de documentar el proceso. En la Figura 33 se hizo un recopilatorio con 3 puntos de control, también se puede observar cómo se utilizó la diana para marcar los puntos.

Figura 33.

Registro fotográfico de 4 puntos de control terrestre.



Notas. Las fotografías fueron capturadas después del levantamiento de cada punto en el año 2018.

5.2.3. Procesamiento de datos GPS.

Los datos crudos que se obtienen por levantamientos geodésicos con equipo GPS son latitud, longitud y altura elipsoidal, estos fueron corregidos y transformados a coordenadas UTM a través de softwares especializados para minimizar o eliminar errores.

Antes del procesamiento se necesita descargar los datos de una o más estaciones fijas de la Red Geodésica Nacional Activa. Una forma para determinar el número de estaciones a la que se debe ligar cualquier proyecto es a través de la Tabla 5.

Tabla 5.

Estándares Geométricos de precisión.

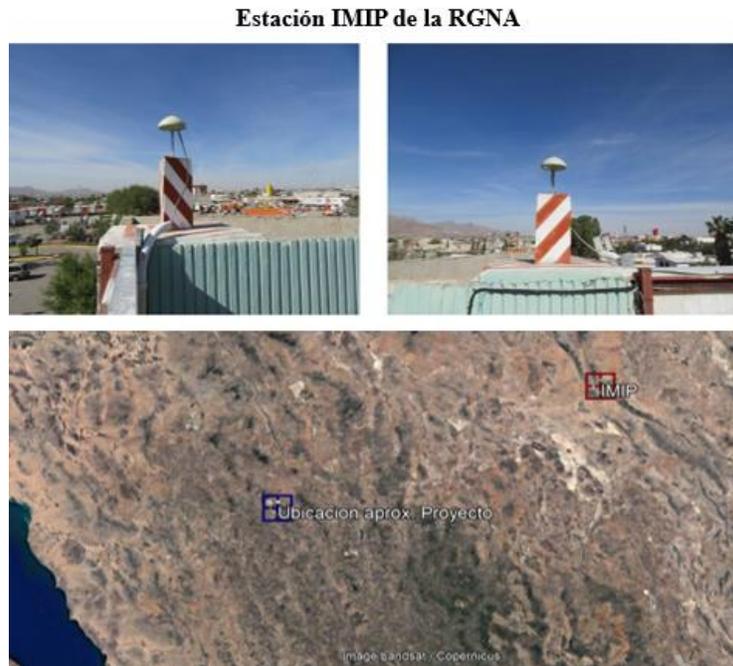
Estándares geométricos de precisión	AA	A	B	C		
				1°	2°	3°
Numero mínimo de estaciones de control de la Red Geodésica Horizontal que se deben ligar						
AA	4					
A	2	3				
B	2	2	3			
C						
1°	1	1	1	2		
2°	1	1	1	1	2	
3°	1	1	1	1	1	1
Ligas a la red Geodésica Vertical	5	4	3	2	op	op
Numero mínimo de estaciones de monitoreo continuo (RGNA) o Fiducial	4	3	2	op	op	op
Localización de las estaciones de control (Numero de cuadrantes)	2	2	2	1	na	na
Separación entre estaciones (km)						
Entre estaciones existentes fuera del área de proyecto y el límite del área del mismo	3000	500	400	5d	na	na
Entre estaciones existentes y el centro del proyecto a no más de	100d	10d	7d	d/5	na	na

Notas. Tabla de punto VIII.1 del acuerdo de 1998 que reforma y adiciona las normas técnicas de los levantamientos geodésicos.

Por ser un levantamiento “C segundo, clase II” y dado que la orden de las estaciones RGNA son de tipo A se recomienda una sola liga para poder realizar el procesamiento y no se indica algún límite de distancia entre ellas. Se eligió la estación IMIP que se encuentra en Ciudad Juárez Chihuahua (Figura 34).

Figura 34.

Fotografías y ubicación de la estación IMIP de la Red



Notas. Figura de creación propia con imágenes satelitales y fotografías obtenidas de [17 y 18].

Los datos de las estaciones RGNA se generan por hora y se encuentran en formato RINEX para su descarga, para ligar los puntos de referencia con cualquier levantamiento GPS/GNSS se descargan de forma individual para después ser unidos con la herramienta que proporciona el INEGI llamada UNERINEX y poder generar un solo archivo.

Generalmente los datos nativos de los equipos GNSS tienen su propio formato complicando el manejo entre diferentes archivos en un mismo trabajo, por esta razón todos los datos de este proyecto fueron transformados al formato universal RINEX.

Se ingresan los datos crudos a un software especializado, en la Figura 35 se pueden observar los lapsos de tiempo de captura entre la estación RGNA, la base y dos puntos móviles, también se expone información general como las distancias, ubicación, antenas, altura de los equipos, fechas, etc.

Figura 35.

Visualización de los lapsos de tiempo.



Point ...	Point ...	Start /	End	Durat...	GNSS Type
IMIP	Control	07/16/2018 ...	07/18/2018 ...	47h 59' ...	GPS
base	Navigat...	07/18/2018 ...	07/18/2018 ...	8h 17' ...	GPS
302	Navigat...	07/18/2018 ...	07/18/2018 ...	28' 15"	GPS
303	Navigat...	07/18/2018 ...	07/18/2018 ...	27' 15"	GPS
	Type	Height Re...	Measurement ...	Antenna Ty...	
	Static	0.2460	Vertical	TRM41249.00	
	Static	1.5390	Vertical	AT502	
	Static	2.0000	Vertical	TRMR4-3 ...	
	Static	2.0000	Vertical	TRMR4-3 ...	

Notas. Figura de creación propia, expone el proceso de ajuste en un software especializado en GPS/GNSS de la estación IMPI, estación base y puntos móviles del día 18/07/2018.

Se liga la estación IMPI (línea roja) con el punto base (línea verde) este primer paso se utilizó para ajustar las coordenadas de la base, para realizar el ajuste se configuran parámetros como la máscara de elevación, se habilitan o inhabilitan satélites, se elige el tipo de solución, en caso de que se necesite se descargan y se aplican efemérides precisas, se ingresa la distancias máximas entre puntos, se configuran los modelos “troposféricos y ionosférico”¹, aunque dependiendo del software, proceso de levantamiento o precisión es probable que se deban ingresar parámetros extras.

¹ Modelos matemáticos que se aplican para reducir los errores.

Las coordenadas de esta primera base es el primer paso para poder realizar el ajuste de los puntos de control, antes de realizar el ajuste es importante señalar que se configuraron las coordenadas de las bases con las coordenadas de la que se ajustó con la estación IMPI de la RGNA.

Todos los días que se realizó un levantamiento GPS se obtuvieron una estación base y de 3 a 5 puntos móviles, para su ajuste se configura a la estación base del día como la referencia y los puntos móviles se ajustan a partir de ella, al término de cada procesamiento se resuelven ambigüedades generando coordenadas geográficas referidas al DATUM WGS84 en la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional se indica que “Desde el punto de vista cartográfico, el Sistema Geodésico Horizontal definido en esta Norma es compatible con el WGS84, así como SIRGAS” (DOF, Artículo 10, p. 7) por ende no fue necesario una transformación de coordenadas, también se genera un informe que expone los parámetros utilizados así como las coordenadas antes y después del procesamiento (Figura 36).

Figura 36.

Informe del procesamiento del punto móvil 202.



Project Information			
Project name:	CANANEA (2)		
Date created:	02/23/2020 17:19:40		
Time zone:	-06:00		
Coordinate system name:	ZONA 12		
Application software:	LEICA Geo Office 5.0		
Processing kernel:	PSI-Pro 2.0		
Processed:	02/23/2020 17:27:00		
Point Information			
	Reference: base	Rover: 202	
Receiver type / S/N:	SR530 / 30100	R0 / 4733137025	
Antenna type / S/N:	AT502 Tripod / -	TRMR0 NONE / -	
Antenna height:	1.1790 m	2.0000 m	
Initial coordinates:			
Latitude:	30° 56' 51.12270" N	30° 48' 44.22704" N	
Longitude:	110° 18' 03.24513" W	110° 18' 06.44512" W	
Ellip. Hgt:	1546.9811 m	1258.0044 m	
Processing Parameters			
Parameters	Selected	Used	Comment
Cut-off angle:	15°	15°	
Ephemeris type (GPS):	Broadcast	Broadcast	
Ephemeris type (GLONASS):	Broadcast	Broadcast	
Solution type:	Automatic	Phase: all fix	
GNSS type:	GPS	GPS	
Frequency:	Automatic	Automatic	
Fix ambiguities up to:	20 km	20 km	
Min. duration for float solution (static):	5' 00"	5' 00"	
Sampling rate:	Use all	30	
Tropospheric model:	Hopfield	Hopfield	
Ionospheric model:	Automatic	Computed	
Use stochastic modelling:	Yes	Yes	
Min. distance:	10 km	10 km	
Ionospheric activity:	Medium	Medium	
Satellite Selection			
Manually disabled GPS satellites (PRNs):			None
Manually disabled GLONASS satellites (Slot Id):			None
Final Coordinates			
	Reference: base	Rover: 202	
Coordinates:			
Latitude:	30° 56' 51.12270" N	30° 48' 44.20950" N	
Longitude:	110° 18' 03.24513" W	110° 18' 06.45430" W	
Ellip. Hgt:	1546.9811 m	1255.1451 m	
Solution type:	Phase: all fix		
GNSS type:	GPS		
Frequency:	Ionofree (L3)		
Ambiguity:	Yes		
Quality:	Sd. Lat: 0.0020 m Posn. Qty: 0.0028 m	Sd. Lon: 0.0020 m Sd. Slope: 0.0020 m	Sd. Hgt: 0.0063 m

Notas. Imagen que expone el reporte de ajuste del punto de control 202.

El último proceso que realiza en esta fase es la transformación de coordenadas geográficas a coordenadas proyectadas con el fin de cumplir con los requerimientos plasmados en documentos oficiales como Manifestaciones de Impacto Ambiental y Estudios Técnicos Justificativos referidos a los temas de cambio de uso de suelo y presa de jales.

Se efectuó la transformación a coordenadas UTM Zona 12 con Datum WGS 1984, este tipo de sistemas de coordenadas permiten obtener áreas, distancias entre vértices y ángulos o rumbos de polígonos en específico. Los procesos de transformación se realizaron mediante el mismo software de ajuste de puntos GPS.

5.3. Fase Fotogrametría.

Se expondrá la eficacia de la fotogrametría aérea, con la descripción de procesos como la planeación, ejecución en campo y procesamiento de la información, se compararán los procesos con la normativa oficial vigente.

5.3.1. Planeación líneas de vuelo.

Puesto que las fases del levantamiento de GPS y vuelos aero-fotogramétricos se realizaron casi de manera simultánea se tiene que tener en cuenta que cada polígono de interés ya debe tener las dianas puestas para poder ser capturadas.

Para ejemplificar los siguientes procesos se expondrá el vuelo 8 por ser uno de los que poseo más información y datos. Se empleó un RPA de ala fija marca TRIMBLE modelo UX5, en lo que respecta a la planeación de vuelo este cuenta con su propio software para las líneas de vuelo.

El software del RPAS ayuda al operador a crear líneas de vuelo de acuerdo con la ubicación de interés y da la posibilidad de adjuntar polígonos de referencia, de esta forma se

planeó de manera independiente cada vuelo. Los primeros parámetros de configuración son los datos del GSD y el porcentaje de traslape en un rango de 60% a 90%.

La altura se ajusta al valor del GSD que entre más pequeña sea el RPAS necesitará de menos altura de vuelo, también dependiendo de estos tres datos se calcula un aproximado del área que se cubrirá, el tiempo que necesita para terminar la misión. Otros datos que se pueden configurar es la dirección, inicio y final de las líneas de vuelo.

En la Figura 37 se representa la línea de vuelo número 8, en esta se pueden observar dos vistas en la imagen superior se observa las líneas de vuelo en una vista perpendicular al terreno, mientras que en la imagen inferior expone una vista que permite ver la topografía del terreno y la altura que tomo el RPA en este vuelo.

Figura 37.

Perspectivas de las líneas de vuelo 8.



Notas. Figura de creación propia con imágenes satelitales obtenidas de [18].

El polígono de afectación del vuelo 8 tiene un área aproximada de 2 km² por lo que solo fue necesario una sola misión para abarcar el terreno, el GSD se estableció en 10 cm con una altura de vuelo entre 350 a 400 metros, estos datos pueden variar al final del procesamiento ya que la topografía de la zona es irregular y montañosa.

En este punto es importante mencionar que la NOM-107-SCT3-2019 establece una altura máxima de 122 metros para los RPA pequeños de uso comercial sin embargo esta norma entro en vigor tiempo después. En la fase de fotogrametría mencionare tanto lo que se hizo en el proyecto como los cambios que se hacen de acuerdo a esta NOM.

Mientras que este proyecto se rigió por la norma técnica para levantamientos aerofotográficos con cámara digital con fines de generación de información geográfica y la Norma para la Autorización de levantamientos Aéreos y Exploraciones Geográficas en el Territorio Nacional.

En el proyecto existieron polígonos de afectación de grandes dimensiones o con formas muy estrechas, para estos se tuvieron que planear más de una misión y/o rotar las líneas para ajustar a la forma a la del polígono de referencia, es fundamental una buena planeación para optimizar tiempos de trabajo.

5.3.2 Trabajo de campo – Vuelo de RPA.

En esta fase se describirá a detalle el proceso de vuelo, se analizarán las características físicas del RPA, la preparación del equipo, despegue, vuelo y aterrizaje, así como experiencias que experimente en campo.

5.3.2.1. Descripción física del RPA.

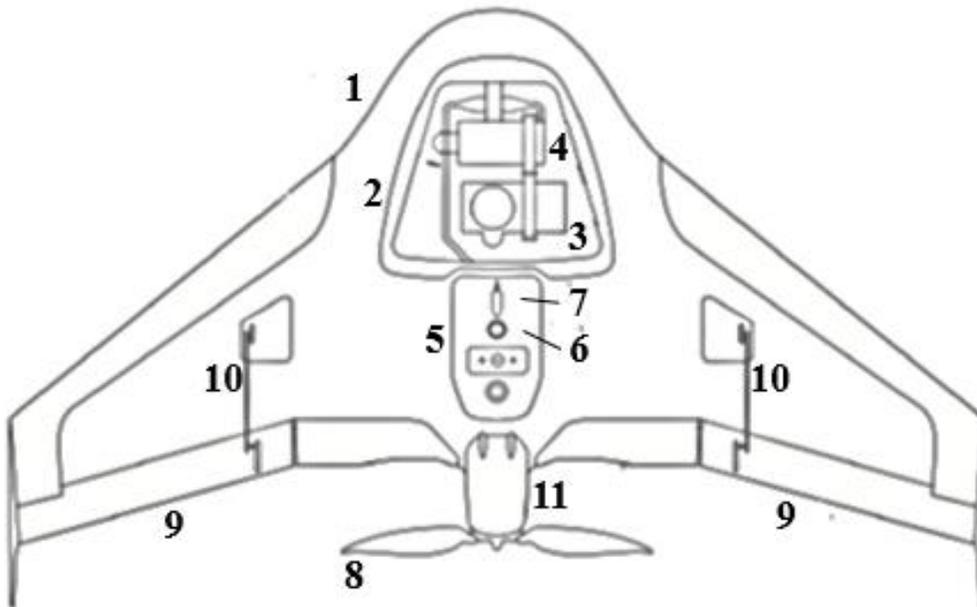
El RPAS modelo UX5 de la marca TRIMBLE es de tipo ala fija, con un peso 2.5 kg, sus dimensiones son de 100 cm x 65 cm x 10 cm y el material del que esta echo es espuma de polipropileno con partes de fibra de carbono lo que genera que sea ligero y a la vez resistente a los impactos.

Las principales partes del RPA UX5 son las siguientes:

- Cuerpo del RPA (1).
- Compartimiento de carga (2).
- Cámara fotográfica (3).
- Batería (4).
- Caja de electrónica (5).
- Antena GPS (6).
- Tubo Pitot (7).
- Hélice (8).
- Alerón (9).
- Controles de alerón (10).
- Motor (11).

Figura 38.

Partes físicas del RPA que se utilizó durante el proyecto.



Notas. Figura de creación propia con imagen obtenida de [19].

La cámara digital que se ocupó en este proyecto tiene una resolución de 23.4 megapíxeles con un sensor APS-C lo que indica que es del tipo matricial, una longitud focal de 15 mm, una velocidad de 1/4000 – 60. Sus dimensiones son de 109.6 x 62.8 x 35.7 mm (ancho x alto x profundidad) y un con un peso de 224 gramos.

Aunque en el mercado existen sensores que generan mejor calidad en las imágenes, el tipo de sensor con el que cuenta la cámara ayuda a que esta tenga menores dimensiones y peso lo que beneficia al RPA.

Un elemento fundamental es la controladora es el instrumento que se utiliza para la planificación, monitoreo del vuelo y la programación del despegue/aterrizaje, también se integra un rastreador en caso de pérdida de la señal, una catapulta para los despegues, repuestos, cargadores, cables de transferencia de datos, baterías y herramientas extras.

5.3.2.2 Despegue, monitoreo del vuelo y aterrizaje.

El equipo que se utiliza es especializado y como tal se necesita de un proceso de revisión antes del despegue. Este proceso se inicia conectando la controladora, después la misma te indica los pasos a seguir para asegurar que las partes del RPA se encuentren en su sitio y que las funciones de los alerones, hélices y motores funcionen de manera eficiente.

En el compartimiento de carga se le ingresa la cámara fotográfica comprobando que tenga una memoria SD¹ vacía, después se agrega la batería con carga completa y por último se le adiciona una antena rastreadora en caso de accidente, se aseguran todos los elementos y se cierra la tapa del compartimiento.

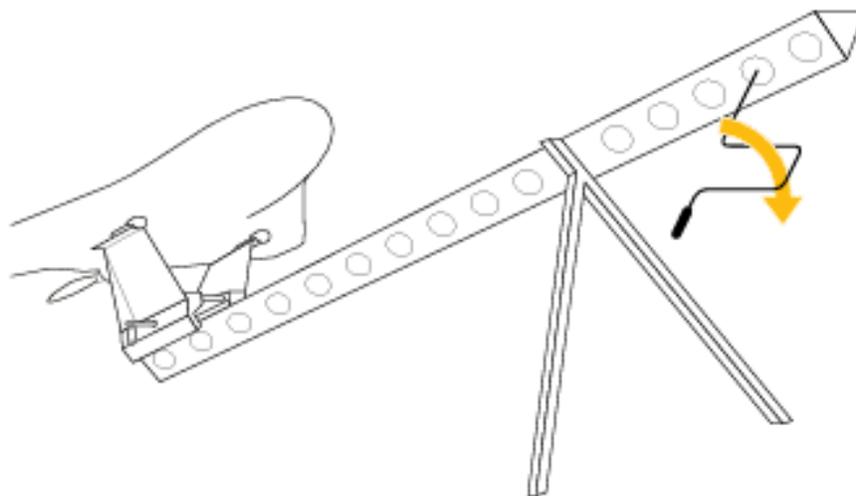
Se inicia la revisión de los alerones y su funcionalidad, si estos reflejan un problema se ajustan con una herramienta de llave hasta que se muevan de manera correcta, también se revisa la condición física de las hélices en caso de que estén dañadas se cambian por los repuestos.

¹ Tarjeta de memoria flash extraíble que permite guardar información y contenidos de forma digital.

Para el despegue se busca una zona sin obstáculos a la vista y a la vez que la dirección del despegue concuerde con la dirección del viento, si ambas condiciones se cumplen se programan a través de la controladora y se arma la catapulta Figura 39. La controladora ajusta los tiempos que tardara en llegar al inicio de las líneas de vuelo y solo basta con accionar el disparador de la catapulta para iniciar el vuelo.

Figura 39.

Imagen de la catapulta para despegues del RP.



Nota. Figura obtenida de [19].

Durante el vuelo se puede visualizar el recorrido del RPA, se muestra el porcentaje de la batería, el tiempo que le resta para terminar la misión y la calidad de la señal entre la controladora y el RPA. En ocasiones la fuerza del viento en contra provoca un mayor esfuerzo del motor causando una baja repentina del porcentaje de batería, en estos casos la persona a cargo del monitoreo determinara si la misión acaba antes de lo provisto.

El sitio para el aterrizaje puede ser diferente al del despegue, ya que este busca una zona amplia y plana puesto que el equipo aterriza por fricción en el suelo, también es necesario que la dirección del viento sea en contra para ayudar al frenado y disminuir el riesgo de dañar el cuerpo del RPA.

En ocasiones se necesitó cambiar la ubicación del aterrizaje durante el vuelo, solo basta con indicarlo en la controladora para que se programe la nueva ruta, por lo regular esto ocurre cuando la dirección del viento cambia de manera notoria o existen algún obstáculo que antes no se encontraban en la zona, como vehículos o personas.

Para realizar los vuelos fueron necesarios un mínimo dos personas, una de ellas fue la encargada de monitorear al RPA con la controladora y la otra la asistirá en lo que se necesite, por ejemplo, en caso de que algún obstáculo nuevo se encuentre en la zona de aterrizaje este intentara despejar la zona para evitar cualquier tipo de accidentes.

En cuanto aterrice el RPA se revisa su condición física, en caso de que presente daños visibles no se deberá mover del lugar donde se encontró, se le tomaran fotografías para ser añadidas a un reporte de accidentes. Como experiencia personal presencie 2 accidentes durante el proyecto.

El primero de ellos fue durante el despegue unos segundos después de que la catapulta lo impulsara, cuando empezaba a tomar altura se desvió de su ruta y termino por estrellarse, el equipo mecánico y electrónico no sufrió daños, no obstante, el cuerpo del RPA se fracturo en una de las alas, esto género que se buscara un nuevo cuerpo para continuar el proyecto.

El segundo accidente fue durante el recorrido de las líneas de vuelo, la controladora empezó a perder la ubicación del RPA hasta el punto que hubo una pérdida total de la señal, en este caso se recurrió al rastreador del equipo, después de ser encontrado se revisó la condición física antes de levantarlo, en este caso no se dañó ningún elemento esencial.

Los accidentes con este tipo de equipos se deben atender de manera especial y cuidadosa, brindando una revisión exhaustiva de cada elemento para garantizar la calidad de cada fotografía. Puesto que el aterrizaje es por contacto más de una vez fue necesario utilizar

repuestos de hélices, alerones, lentes, también se utilizó una cinta especial para reforzar partes del RPA y cerrar compartimientos.

Exponer la fase de campo de los levantamientos Aero-fotogramétricos me pareció esencial en esta tesis, en proyectos de esta magnitud existieron escenarios que no fueron contemplados durante la planeación, y poder solucionar todos los problemas ayudaron al buen término del mismo.

Por día se realizan de 3 a 4 vuelos, se contaba con tres baterías las cuales al comienzo de cada día contaban con 100% de batería, para realiza un cuarto vuelo se utilizaba un cargador que podía ser conectado al vehículo.

Al término de cada vuelo se extraen las fotografías de la cámara, se hace una inspección rápida de las mismas, si resultan con algún tipo de distorsión o ruido se descartan, si se cuenta tiempo y condiciones climáticas se realiza nuevamente el vuelo. Si las fotografías resultan confiables, se almacenan en una computadora y se borran de la memoria SD para que estas puedan ser reutilizada.

Como parte de la organización del proyecto se realizó un inventario de los vuelos como se muestra en la Tabla 6, en ella se ingresó información como numero de vuelo y fotografías obtenidas, el DSC¹, si existió algún problema durante la misión, y su estatus de procesamiento.

¹ Sistema de cámara digital, fichero que ayuda al orden de la toma de las fotografías.

Tabla 6.*Inventario de vuelo.*

FECHA	VUELO	NO. FOTOS	PROYECTO	OBSERVACIONES
21-jul	1	393	Pr_Cananea.jxl	
23-jul	2	547	Pr_Cananea.jxl	duda en fotos
24-jul	3	422	Pr_Cananea.jxl	
27-jul	4	0	Pr_Cananea.jxl	Cayo al despegar
28-jul	5	200	Pr_Cananea.jxl	
	6		Pr_Cananea.jxl	No se realizo
29-jul	7	377	Pr_Cananea.jxl	
29-jul	8	468	Pr_Cananea.jxl	
30-jul	9	233	Pr_Cananea.jxl	Esta en el Vuelo 3
30-jul	10	15	Pr_Cananea.jxl	Cayo en la. L.V.

DSC	DSC	NO FOTOS	NOMBRE DE ENTREGA	STATUS
271	663	393		PROCESANDO
668	1353	686		NO SE SABE
1359	1885	527	POLIGONO 2	ENTREGADO
				NO HAY
3278	3477	200	POLIGONO 1	ENTREGADO
				NO HAY
3484	3860	377		PROCESANDO
3864	4331	468	POLIGONO 3	ENTREGADO
3862	4094	233		NO PROCESADO
4096	4110	15		NO HAY

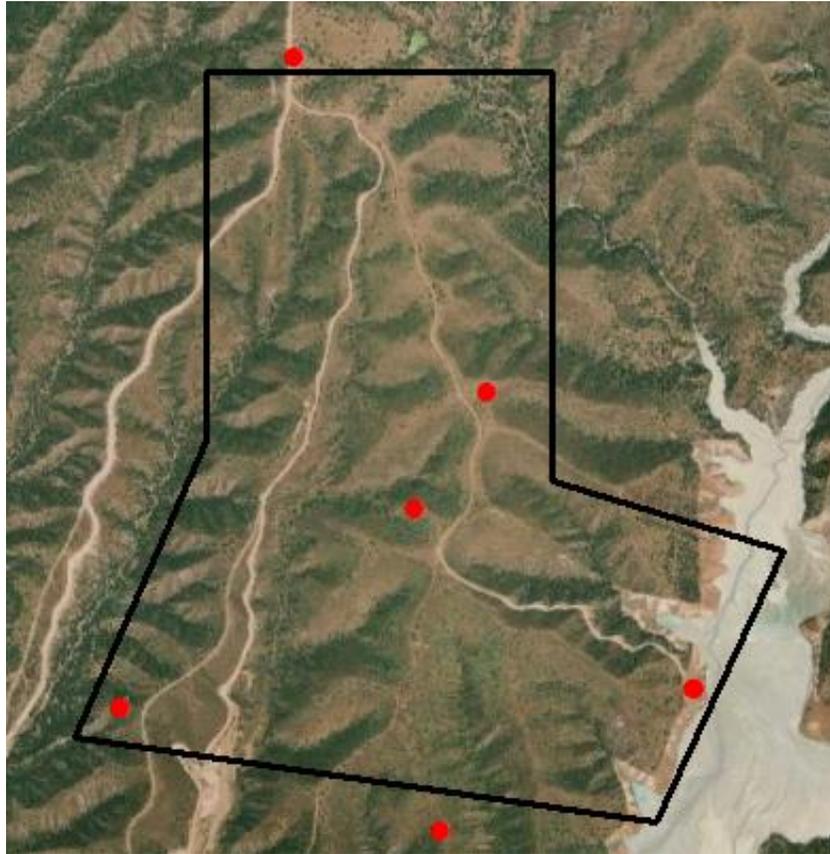
Notas. Tabla generada durante el proyecto con fechas del 21 al 30 de Julio del 2018

5.3.3. Procesamiento de las fotografías.

El siguiente paso en la fase de fotogrametría es generar ortofotografías de cada vuelo, para representar los procesos nos basaremos nuevamente en el vuelo número 8. De esta misión se sabe que se obtuvieron un total de 468 fotografías y en el terreno fueron marcados un total de 6 puntos de control (Figura 40).

Figura 40.

Puntos de control del polígono a levantar.

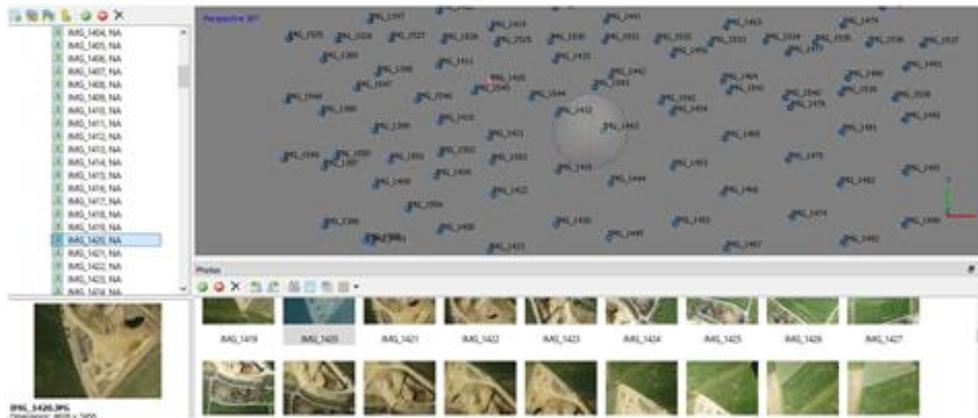


Notas. Puntos de control del polígono de interés del vuelo No. 8. Con imagen satelital del 2018 obtenida de [18].

Al ingresar las fotografías en el software de procesamiento te dará una vista preliminar de su ubicación Figura 41. Los primeros parámetros que se ingresan es la información de la cámara, como la distancia focal de 15 mm, el GSD de 10 cm, entre otros aspectos específicos, en ocasiones estos softwares cuentan con la información en su base de datos y bastaría con ingresar marca y modelo.

Figura 41.

Fotografías añadidas al software.

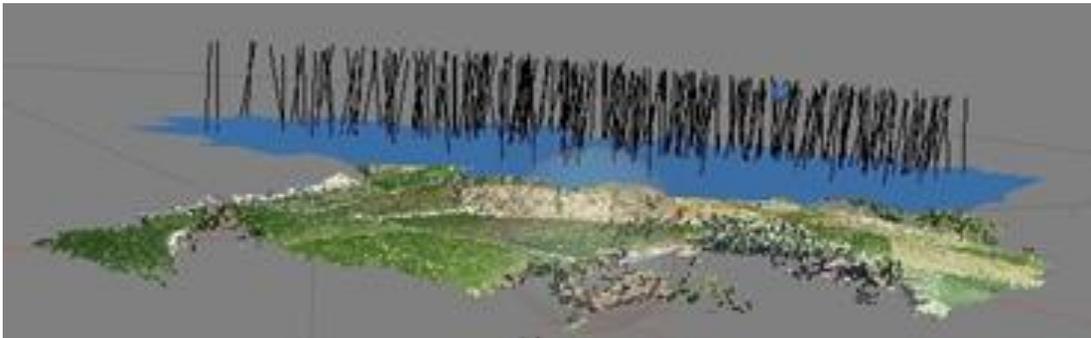


Notas. Esta imagen fue obtenida ingresando fotografías del vuelo fotogramétrico Numero 8 en un software de procesamiento de imágenes digitales.

El siguiente proceso es la alineación de las fotografías con un nivel de calidad a escoger, por ser un proceso donde se empieza a generar un solo archivo tiende a ser pesado si no se cuenta con equipo de cómputo con buena capacidad, en este paso se genera una nube de puntos como se muestra en la Figura 42.

Figura 42.

Primera nube de puntos, Vuelo No. 8.

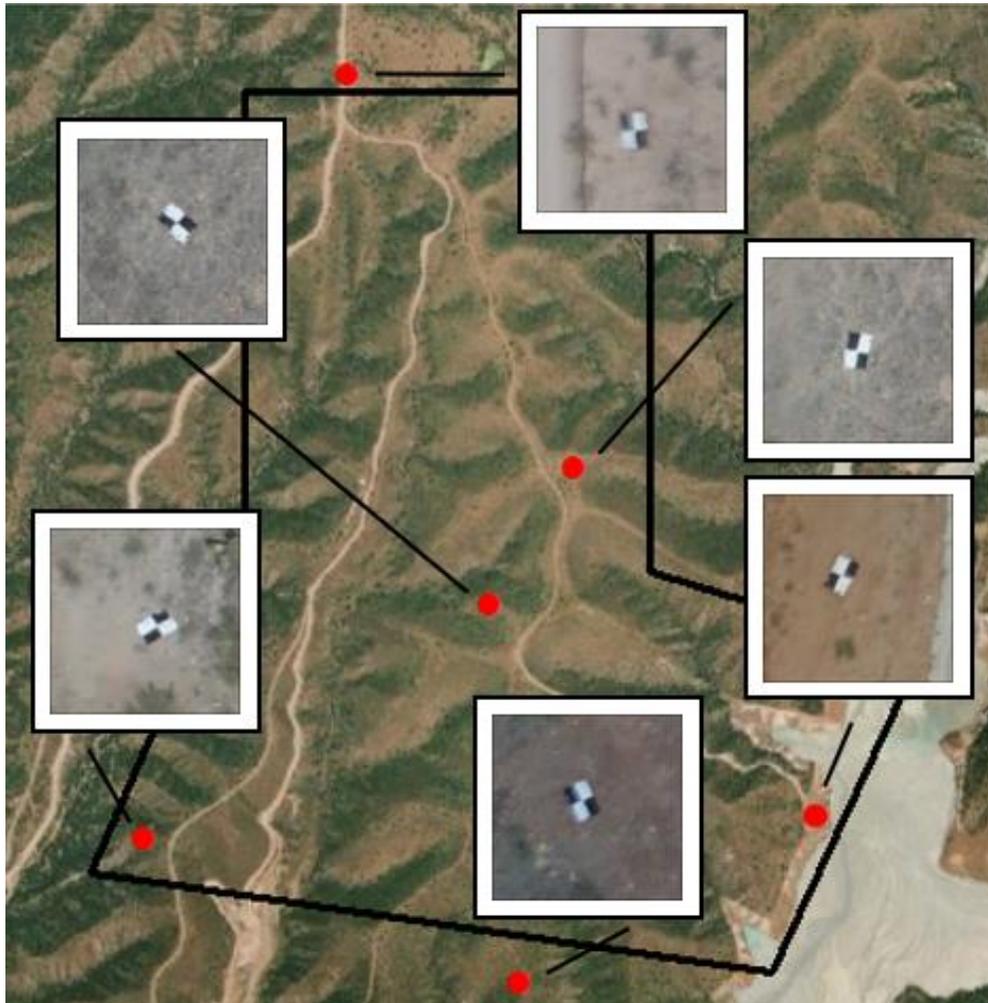


Notas. Imagen obtenida con el primer proceso para la generación de productos fotogramétricos a través de un software de procesamiento de imágenes digitales.

Puesto que el RPAS que se utilizó cuenta con un equipo de GPS integrado, las fotografías cuentan con cierta georreferencia, pero para generar una mejor precisión se debe realizar la georreferenciación con los puntos de control obtenidos en la fase de levantamiento con equipo GPS. En la Figura 43 se muestra las dianas en cada uno de los lugares propuestos en el polígono de interés del vuelo 8.

Figura 43.

Ubicación de las dianas en el polígono de interés del Vuelo No. 8.

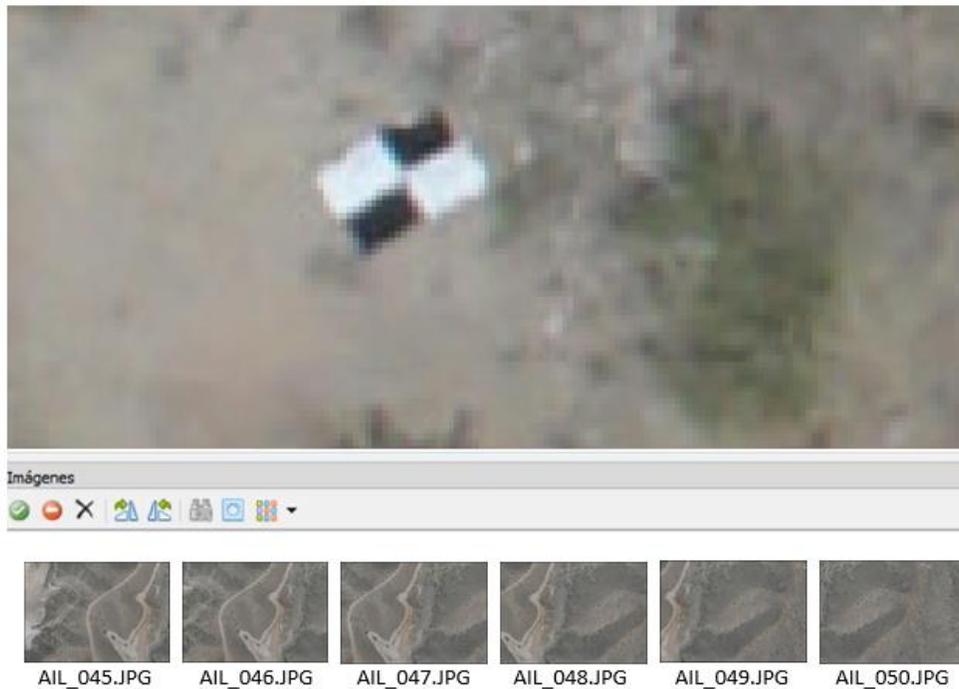


Notas. Figura de creación propia con fotografías del vuelo 8 y una imagen satelital obtenida de [18].

Por misión se le agrega al software un listado de las coordenadas GPS corregidas, en la Figura 44 se expone fotografías del Vuelo número 8, en ella se realiza un acercamiento hasta encontrar la referencia en este caso es la diana del punto de control 326, por el barrido del RPA los puntos de control están presentes en más de una fotografía y se debe marcar en cada una de ellas.

Figura 44.

Proceso de georreferenciación del punto de control 326.



Notas. Imagen obtenida iniciando el proceso de georreferenciación del Vuelo No. 8 a través de un software de procesamiento de imágenes digitales.

En los siguientes pasos se encuentran procesos como la creación de nube de puntos densas en este se crean miles o hasta millones de puntos dependiendo de la cantidad de fotografías y la calidad, a partir de este paso se crean mallas y textura generando archivos que representan mejor los terrenos.

El último paso antes de crear una ortofotografía es el modelo digital de elevaciones, en él se utilizó el parámetro del GSD, este proceso no se guardó en el proyecto, pero se efectuó por ser un paso necesario para avanzar en los procesos, por la irregularidad del terreno en el vuelo 8 el parámetro fue de 10.1698 cm. En este punto se crea la orto-fotografía u ortomosaico, en la Figura 45 se expone.

Figura 45.

Ortografía del vuelo número 8.



Nota. Producto generado a partir del vuelo no. 8 a través de un software de procesamiento de imágenes digitales.

Los procesamientos fotogramétricos se realizaron mientras en campo se seguían realizando tanto levantamientos de puntos GPS como otros vuelos en diferentes zonas de la mina, en la Figura 46 se exponen diferentes ortofotografías del proyecto. La coordinación de las brigadas fue fundamental para generar los resultados en tiempo y forma.

Figura 46.

Ortofotografías generadas durante el proyecto.

VUELO NO. 5



VUELO NO. 12



VUELO NO. 3



VUELO NO. 10



Nota. Esta imagen muestra 4 ortofotografías, de ellas se obtuvieron aéreas, rumbos y distancias de polígonos de interés. Obtenidas de un software de procesamiento de imágenes digitales.

6. Generación de información y su representación en planos.

El objetivo por lo que se crearon ortofotografías en zonas específicas de la mina, fue la generación de información como áreas de polígonos, distancias y rumbos de sus vértices, así como la identificación de zonas y caminos de interés. Las orto-fotografías permitían una visión actualizada de las zonas de interés.

Figura 47.

Procesamiento para obtener información de polígonos de afectación.



Notas. Imagen comparativa de cómo se obtuvo información del polígono de afectación del Vuelo 8. Obtenida a través de un software de diseño.

En la Figura 47 se observa un ejemplo de cómo se generó la información de un polígono de afectación, en este caso fue un camino dentro de la ortofotografía del vuelo 8, como se

muestra en la imagen se van marcando los vértices, en cuanto se termina de marcar el camino se genera el cuadro de construcción (Figura 48).

Figura 48.

Cuadro de construcción PA-3, Vuelo No. 8.

CUADRO DE CONSTRUCCION PA-3

LADO		RUMBO	DISTANCIA	V	C O O R D E N A D A S	
EST	PV				Y	X
				1	3,416,417.258	567,810.486
1	2	N 03°10'02.904" E	33.899	2	3,416,451.105	567,812.359
2	3	S 13°14'26.097" E	10.504	3	3,416,440.881	567,814.765
3	4	S 26°33'53.498" E	13.449	4	3,416,428.852	567,820.779
4	5	S 36°52'11.632" E	12.029	5	3,416,419.229	567,827.996
5	6	S 61°17'37.027" E	13.953	6	3,416,412.526	567,840.235
6	7	S 53°36'56.904" E	12.247	7	3,416,405.261	567,850.094
7	8	S 62°47'01.665" E	20.424	8	3,416,395.921	567,868.257
8	9	S 76°15'49.582" E	24.039	9	3,416,390.213	567,891.609
9	10	S 85°30'55.434" E	26.546	10	3,416,388.137	567,918.074

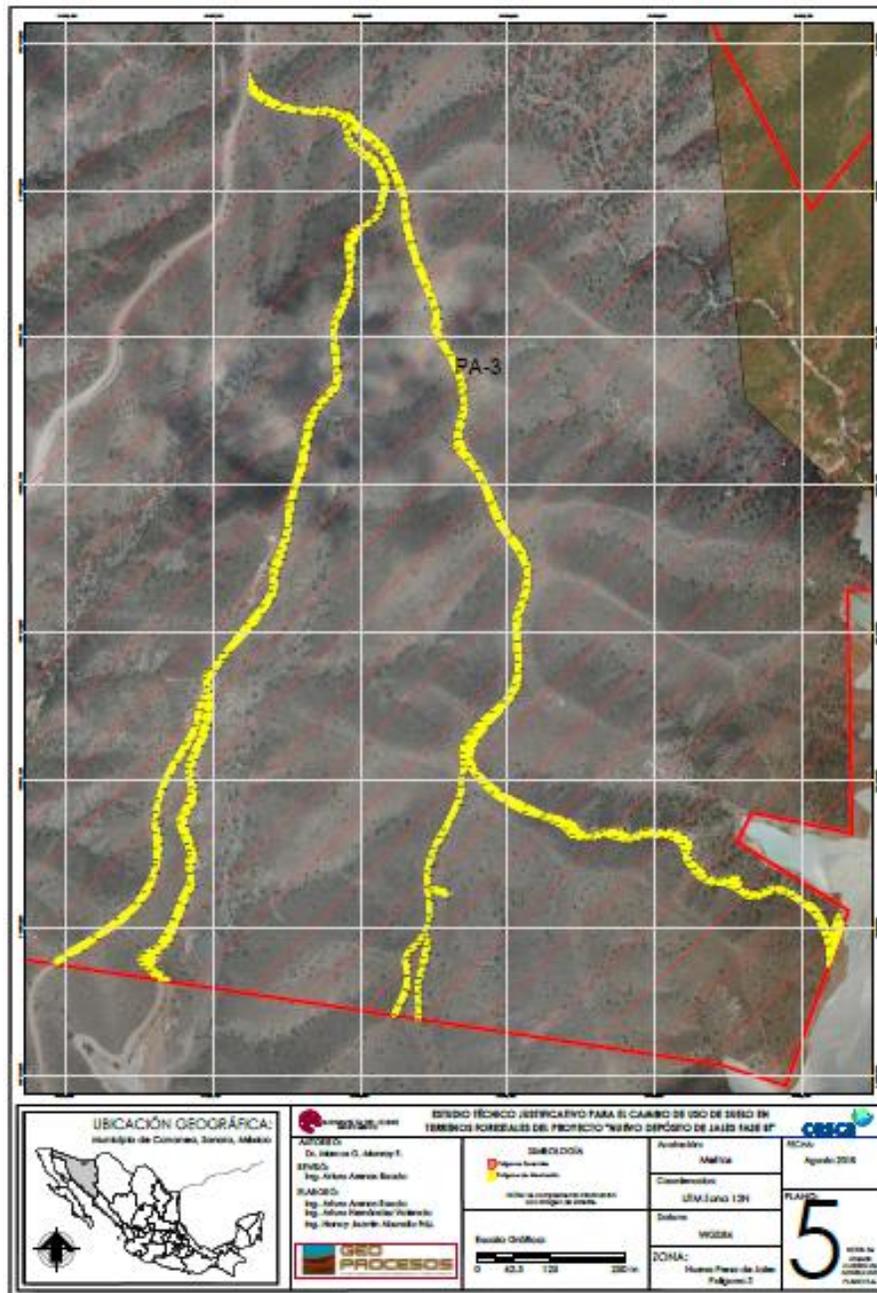
Nota. Esta imagen es una parte del cuadro de construcción del polígono de afectación del vuelo número 8. Obtenida por parte de GEOPROCESOS.

Para generar la información se ocuparon softwares especializados para el manejo de datos vectoriales como ráster, se utilizaron sistemas de información geográfica, se crearon bases de datos espaciales y se formaron cuadros de construcción por cada polígono de afectación. Toda esta información es representada a través de planos.

La información que se genero fue plasmada a través de planos con sus respectivos elementos como el título, simbología, sistemas de coordenadas, escalas, croquis de localización, fecha de creación, los trazos de los camino o polígonos se realizaron en las ortofotografías (Figura 49).

Figura 49.

Ejemplo de uno de los planos generados en el proyecto.



Notas. Plano No 5, obtenido a través del vuelo 8. Obtenido por parte de GEOPROCESOS.

7. Conclusión

Esta tesis describió la relación que existe entre un conjunto de ciencias referidas a la geomática. Si bien se analizó principalmente los sistemas de posicionamiento global y la fotogrametría es importante mencionar que se ocuparon ciencias como la cartografía, geodesia, sistemas de información geográfica, percepción remota y se manejaron diversos softwares especializados.

Estas ciencias constantemente se actualizan en la manera de obtener los datos y sus procesos, por ejemplo, en la fase de fotogrametría anteriormente se hubiese utilizado fotografías análogas obtenidas a través de un vuelo fotogramétrico con un avión tripulado, pero hoy en día existen tecnologías como los RPAS que facilitan la obtención de imágenes digitales sin reducir precisiones o calidades, solo son procesos optimizados que generan los mismos productos de manera rápida y reduciendo costos.

Tener los conocimientos de estas ciencias y poder relacionarlas no es suficiente para llevar a cabo proyectos de ingenierías similares al descrito, existen normas, reglamentos, instrucciones, etc., que se deben de cumplir para garantizar la confiabilidad de lo que se genera, te ayudan a prevenir o actuar en caso de accidentes.

Estas normas también se actualizan cada determinado tiempo adecuándose a las nuevas tecnologías, por ejemplo, no fue hasta el acuerdo de 1998 de los levantamientos geodésicos que se incorporó a los sistemas de posicionamiento global, de igual manera en la norma NOM-107-SCT3-2019 que establece los requerimientos para operar un sistema RPAS se implementaron límites en la altura de vuelo, distancias máximas entre el RPA y operador, solo por mencionar algunas características.

La NOM-107-SCT3-2019 entro en vigor tiempo después de que se realizó el proyecto, pero si no hubiese sido así, los productos generados tendrían cambios significativos sobre el GSD, la cantidad de fotos, el tiempo de realización de cada vuelo, todo lo anterior hubiese provocando un aumento en los costos generales del proyecto. Esta norma fue estudiada por expertos en la materia y posiblemente sus estándares hoy en día son requeridos por parte de

las instituciones que lo solicitan. En todo momento se debe tener atención especial con la publicación de nuevos documentos oficiales, una desatención en este aspecto podría ser perjudicial a la hora de la entrega de resultados o en caso de un accidente o percance.

En la elaboración de esta tesis utilice diferentes software especializados para el manejo, visualización, ajuste y generación de datos, cada uno de ellos con sus características únicas, sin embargo puedo concluir que un Ingeniero Geomático no es aquel que maneja más equipos o softwares, si no que cuenta con los conocimientos, el razonamiento y la habilidad para saber qué tipo de herramienta utilizar sin importar la marca o modelo, debe de tener noción del tipo de información que se obtiene en campo y conoce las maneras de representarlo ya sea en planos, modelos, etc.

Se presentaron múltiples complicaciones durante el trabajo en campo, en estos casos se debe buscar una solución rápida que no afecte ni comprometa los resultados, el Ingeniero Arturo Hernández encargado del trabajo en campo me demostró que ante los problemas se debe de tener calma, plantear opciones ante la brigada y actuar de forma rápida para la solucionar cualquier problema.

Figura 50.

Fotografía propia.



Nota. Esta fotografía fue tomada durante la elaboración del proyecto, a un lado de la presa de jales de la mina Buena Vista del Cobre, Sonora Cananea 2018.

8. Referencias

Acuerdo por el que aprueba la Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional. Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 2010.

Acuerdo por el que aprueba la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional. Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 2010.

Acuerdo por el que aprueba la Norma Técnica para la elaboración de Metadatos Geográficos. Diario Oficial de la Federación, 24 de diciembre de 2010.

Acuerdo por que se aprueba la Norma Técnica para Levantamiento Aerofotogramétricos con Cámara Digital con fines de Generación de Información Geográfica. Diario Oficial de la Federación 20 de julio de 2016.

Acuerdo que reforma y adiciona las Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos, publicados el 1 de abril de 1985. Diario Oficial de la Federación 27 de abril de 1998.

AEROVANT ESPECIFICACIONES TECNICAS PHANTOM 4 RTK. (S.F.). Recuperado de <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://aerovant.com/wp-content/uploads/2022/05/Phantom-4RTK.pdf>

Alcaraz Gonzales P. (s.f.). Levantamiento Mediante GPS. Recuperado de ATYGES FV8+ (S.F.). Recuperado de <https://atyges.es/tienda/atyges-fv8/>

Autorización para levantamientos aéreos y exploraciones geográficas en el territorio nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (S.F.).

Cheli Antonio E. (2011). Introducción a la Fotogrametría y su Evolución. Recuperado de <http://up-rid2.up.ac.pa:8080>

Cortes Bolívar D. Procesamiento de información GNSS en software Leica Geoffice y Magnet Tools. Recuperado de <http://igacnet2.igac.gov.com>

Davalos Gonzales P. (S. F.). AFI Aerofotogrametría Inteligente. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/467656/Libro_Aerofotogrametr_a_Inteligente_AFI.pdf

Diccionario de Datos Geodésico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013.

Drones cartográficos de ala fija de alto rendimiento (S.F.). Recuperado de <https://ageagle.com/solutions/drones/>

El Sistema de Posicionamiento Global. (s.f.). Recuperado de <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish>.

Establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. Diario Oficial de la Federación, 14 de noviembre de 2019.

Guía de proyecciones cartográficas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2004. Guía del usuario solución de trimble UX5 (2015). Recuperado de <https://help.trimblegeospatial.com>

Guía metodología de la Red Geodésica Horizontal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017.

Guía para la interpretación de cartografía, Fotografía Aérea. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015. Recuperado de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4651/pfc5890.pdf>

Huerta E., Mangiaterra A., Noguera G. GPS Posicionamiento satelital. Recuperado de https://www.fceia.unr.edu.ar/gps/GGSR/libro_gps.pdf

Inteligencia visionaria. Precisión elevada. (S.F.). Recuperado de <https://aerovant.com/phantom-4-rtk/>

Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global) (1999). Recuperado de <https://www.academia.edu>

Norma para la autorización de levantamientos aéreos y exploraciones geográficas en el territorio nacional. Diario Oficial de la Federación, 5 de junio de 2013.

Norma técnica para la producción de cartografía digital urbana por métodos fotogramétricos. Instituto de Información Territorial del Estado de Jalisco, 18 de septiembre de 2007.

Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos. Diario Oficial de la Federación, 01 de abril de 1985.

Proyección universal transversal de Mercator (2019). Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/map/projections/universal-transverse-mercator.html>

Quirós Rosado E. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Recuperado de <https://www.researchgate.net>

Receptores de alta precisión (2018). Recuperado de <https://doc.arcgis.com>

Red Geodésica Nacional Activa (s.f.). Recuperado de https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/

Sabes cómo te benefician las Normas Oficiales Mexicanas (28 de julio de 2021). Recuperado de <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/sabes-como-te-benefician-las-normas-oficiales-mexicanas?state=published>

Sistema Nacional de Fotogrametría Aérea. mayo del 2000. Sistemas de coordenadas, proyecciones y transformaciones (s.f.) Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/properties/coordinate-systems-and-projections.html>

Tipos de proyección (2019). Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.6/map/projections/projection-types.html>

Vehículo aéreo no tripulado Trimble UX5 (2013). Recuperado de <http://www.geosystemsperu.com>

Zafra Granados Y. (S.F.). Manual para el postproceso de imágenes obtenida a partir de una aeronave tripulada remotamente (drone) en los softwares Photoscan y PIX4D. Recuperado de <https://repository.udistrital.edu.com>

9. Referencias de Figuras.

1. Toro Juan (2014, 25 de febrero). El padre de la Fotogrametría, Aimé Laussedat. Interés por la Geomática. Recuperado por <https://interesporlageomatica.com/2014/02/25/el-padre-de-la-fotogrametria-aime-laussedat/>
2. Mi Punto de Vista (2021, 22 de mayo). Los drones para la agricultura, el futuro de la industria. Recuperado de <https://www.mipuntodevista.com.mx>
3. Adeva Roberto (2022, 10 de febrero). Drones de ala fija: qué son, para qué sirven y qué modelo comprar, 7C Topes de gama. Recuperado de <https://topesdegama.com/listas/gadgets/drones-ala-fija>

4. Atherton Kelsey D. (2017, 19 de septiembre). The Plimp is a plane-blimp mashup that promises safe air transport, Popular Science 150 years. Recuperado de <https://www.popsci.com/plimp-plane-blimp-drone/>
5. BBC News Mundo (2018, 12 de julio). Cómo es el MQ-9 Reaper, el dron más letal y más usado por el ejército de Estados Unidos cuya información se compartió en la "internet profunda. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44813793>
6. Juárez Carlos (2021, 8 de enero). Uso de drones para entrega de mercancías modificaría la cadena de suministro en Estados Unidos, The Logistics World. Recuperado de <https://thelogisticsworld.com/tecnologia/uso-de-drones-para-entrega-de-mercancias-modificaria-la-cadena-de-suministro-en-estados-unidos/>
7. Aero Expo (s.f.). Drones helicóptero. Recuperado de <https://www.aeroexpo.online/es/fabricante-aeronautico/dron-helicoptero-2067.html>
8. Rodríguez Ana (s.f.). Diferencias entre vuelos recreativos y vuelos profesionales con drones. IBERF Drone. Recuperado de <https://iberfdrone.es/diferenciasvuelos-recreativos-vuelos-profesionales-drones/>
9. Gst (s.f.). TRIMBLE UX5 HP. Precisión de altos vuelos. Recuperado de https://www.gst-sl.com/ux5_hp.html
10. AGRO.com (s.f.). Trimble se asocia con el fabricante de drones Multirotor. Recuperado de <https://profesionalagro.com/noticias/trimble-se-asocia-con-el-fabricante-de-drones-multirotor.html>
11. Amino (2018, 9 de septiembre). Arbol Pixel Art. Recuperado de https://aminoapps.com/c/mcft-es/page/blog/arbol-pixel-art/movu_kuePWbrPzID34Vb2aLMm4a88Q5

12. Entorno Turístico (s.f.). Hablemos de turismo, hotelería y sustentabilidad.
Recuperado de <https://www.entornoturistico.com>
13. GPS.GOV (s.f.). Segmento de control. Recuperado de
<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>
14. Mercado libre (s.f.). Equipo GPS. Recuperado de
<https://listado.mercadolibre.com.mx/accesorios-vehiculos/navegadores-gps/equipos-gps>
15. Guía de proyecciones cartográficas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2004
16. Establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. Diario Oficial de la Federación, 14 de noviembre de 2019.
17. INEGI (s.f.). Red Geodésica Nacional Activa. Recuperado de
https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa.
18. GOOGLE EARTH PRO. Sistema de Información de Geográfica basado en visualizar formas diferentes del Planeta como imágenes satélites, modelos tridimensionales, mapas, fotografías, entre otras.
19. Guía del usuario solución de trimble UX5 (2015). Recuperado de
<https://help.trimblegeospatial.com>
20. Inteligencia visionaria. Precisión elevada. (S.F.). Recuperado de
<https://aerovant.com/phantom-4-rtk/>
21. ATYGES FV8+ (S.F.). Recuperado de <https://atyges.es/tienda/atyges-fv8/>

22. Drones cartográficos de ala fija de alto rendimiento (S.F.). Recuperado de <https://ageagle.com/solutions/drones/>.
23. COMPARACIÓN DE DRONES DE MAPEO PROFESIONAL (2021). Recuperado de <https://wingtra.com/es/best-drones-for-photogrammetry-wingtraone-comparison/ebee-x-vs-dron-wingtra/>
24. Quirós Rosado E. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Recuperado de <https://www.researchgate.net>
25. senseFly Aeria X (S.F.). Especificaciones. Recuperado de <https://www.skyviv.com/sensfly/sensefly-aeria-x>