



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD MÉRIDA

“ACTUALIZACIÓN DE BASES CARTOGRÁFICAS A ESCALA
DE DETALLE CON DRONES EN ISLA ARENA, CAMPECHE.”

MODALIDAD DE TITULACIÓN
Ampliación y Profundización de Conocimientos – Diplomado Interno

QUÉ PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO (A) EN Ciencias de la Tierra.

PRESENTA:
Benjamin Abraham Maldonado

TUTOR O TUTORES PRINCIPALES:
Dr. Gustavo Martin Morales, ENES Mérida
Dr. Jose Carlos Pintado-Patiño, ENES Mérida



UNAM

**ESCUELA
NACIONAL DE
ESTUDIOS
SUPERIORES**

UNIDAD

MÉRIDA

10 de octubre de 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación o Graduación con trabajo escrito)**

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo titulado:

ACTUALIZACIÓN DE BASES CARTOGRÁFICAS A ESCALA DE DETALLE
CON DRONES EN ISLA ARENA, CAMPECHE en la modalidad de
Ampliación y Profundización de Conocimientos - Diplomado Interno
que presenté para obtener el título de Licenciado(a) en Ciencias de la Tierra,
es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por
mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes,
gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ATENTAMENTE


Benjamin Abraham Maldonado
42014211-9

NOMBRE, FIRMA Y NÚMERO DE CUENTA DEL ALUMNO/A

Índice

1. Introducción.....	3
2. Definiciones y Términos	6
3. Marco Teórico.....	7
3.1. Cartografía.....	7
3.2. Bases Cartográficas.....	7
3.3. Drones en la Cartografía.	10
3.4. Imágenes Multiespectrales.....	12
3.5. Tecnologías Relacionadas.	13
3.6. Consideraciones para la selección de drones y sensores.....	16
3.7. Procesamiento de imágenes aéreas.	16
4. Metodología.	17
4.1. Área de Estudio.	17
4.2. Drones y Sensores Utilizados.	19
4.3. Obtención de Datos.	21
4.4. Procesamiento de datos batimétricos.....	26
4.5. Procesamiento de datos de GPS diferencial.	27
4.6. Procesamiento de fotogrametría.	28
4.7. Procesamiento de mascara de Isla Arena.	29
5. Resultados.	30
5.1. Datos del GPS diferencial obtenidos.....	30
5.2. Batimetrías.....	31
5.3. Modelo Digital Superficial.....	34
6. Consideraciones del procesamiento de datos.....	37
7. Conclusiones.....	37
8. Referencias.....	38
9. Anexos.....	41
9.1. Anexo 1.	41
9.2. Anexo 2.	46

1. Introducción.

El aumento del nivel del mar, junto con la intensificación de fenómenos meteorológicos como tormentas tropicales y huracanes, representan una amenaza creciente para las zonas costeras en todo el mundo. Este fenómeno se ha intensificado en las últimas décadas como resultado del cambio climático, el cual ha incrementado la frecuencia e intensidad de las tormentas (Yáñez-Arancibia et al., 2014). Las inundaciones, además de causar daños en infraestructuras y pérdidas económicas, suponen un riesgo significativo al bienestar de las poblaciones costeras. En México, comunidades como Isla Arena, Campeche, son especialmente vulnerables debido a su ubicación geográfica y la limitada capacidad de respuesta ante estos eventos extremos que pueden ocasionar desastres.

El problema para la planificación y gestión de riesgos en estas zonas radica en que las herramientas tradicionales de cartografía utilizadas carecen de la precisión y capacidad de actualización que se requiere para enfrentar los cambios rápidos en el entorno costero. Las metodologías convencionales, aunque han sido útiles en el pasado, presentan limitación en cuanto a la recolección de datos en tiempo real y la capacidad de adaptación a las variaciones topográficas provocadas por el aumento del nivel del mar y las marejadas ciclónicas. Según estudios recientes, el uso de drones para la cartografía ha emergido como una herramienta prometedora para superar estas limitaciones, permitiendo capturar imágenes de alta resolución y generar modelos topográficos detallados que facilitan la identificación de áreas susceptibles a inundaciones (Chen, Liu y Zhang, 2022).

Las zonas costeras como Isla Arena enfrentan un problema multifactorial debido al incremento del nivel del mar, la urbanización sin control, la deforestación de manglares y humedales, y el insuficiente desarrollo de sistemas de drenaje eficaces. Las tormentas tropicales y los huracanes provocan lluvias torrenciales que sobrepasan la capacidad de los sistemas

de desagüe, lo que resulta en inundaciones frecuentes. Además, el crecimiento descontrolado de la construcción urbana y la consecuente impermeabilización del suelo han incrementado el escurrimiento superficial, reduciendo la capacidad del terreno para absorber el agua, lo que contribuye al riesgo de desastres (López, Gutiérrez y Fernández, 2021). En este contexto, es crucial que las bases cartográficas sean lo más precisas y actualizadas posible para permitir una gestión efectiva del riesgo.

En los últimos años, se ha evidenciado que los métodos tradicionales de levantamiento cartográfico, aunque útiles para estudios de gran escala, no responden adecuadamente a las necesidades específicas de las zonas costeras vulnerables. En este sentido, el uso de drones ha ganado relevancia como una herramienta más precisa y eficiente para la recopilación de datos geoespaciales. Los drones permiten obtener datos en tiempo real, lo que mejora la capacidad para reaccionar rápidamente a cambios en el terreno y generan imágenes detalladas que pueden ser utilizadas para modelar escenarios de inundación y evaluar zonas de riesgo con mayor exactitud (Elbakri, Ali y He, 2019).

La relevancia de este problema es clara: si no se actualizan las bases cartográficas de manera precisa y oportuna, las decisiones sobre la planificación urbana y la gestión de emergencias se basarán en información obsoleta o inexacta, lo que podría agravar las consecuencias de las inundaciones en términos de pérdidas humanas, daños materiales y destrucción de ecosistemas. Además, la falta de datos actualizados dificulta la implementación de estrategias de mitigación efectivas, como la construcción de infraestructura de drenaje adecuada o la reforestación de áreas críticas.

Investigaciones previas han demostrado que los drones ofrecen una gran ventaja en términos de precisión y rapidez, permitiendo recopilar datos detallados en un tiempo considerablemente menor que los métodos

convencionales (López et al., 2021). Esto no solo permite una actualización más rápida de la cartografía, sino que también facilita la integración de estos datos en sistemas de información geográfica para su análisis y modelado (López et al., 2021).

Si bien las técnicas tradicionales de cartografía han servido de base durante muchos años, los estudios indican que los levantamientos fotogramétricos realizados con drones pueden alcanzar una precisión comparable a la de los métodos tradicionales, con errores mínimos que se encuentran dentro de los estándares necesarios para mapeos de alta resolución (Elbakri et al., 2019). Además, la eficiencia de los drones en la captura de datos detallados y su capacidad de operar en áreas de difícil acceso los convierten en una herramienta ideal para la gestión de riesgos en regiones costeras.

En resumen, el problema central que se investiga en este estudio es si la utilización de drones para la actualización de bases cartográficas puede mejorar significativamente la precisión en la identificación y delimitación de zonas vulnerables a inundaciones en comparación con los métodos tradicionales. Con esto se busca contribuir con una nueva base de datos que pueda representar una mejoría significativa en la gestión del territorio, del riesgo ante potenciales desastres, y de recursos en el área.

Finalmente, la estructura de esta investigación se organiza en siete capítulos. Primero se abordará una revisión exhaustiva de la literatura sobre el uso de drones en cartografía y su impacto en la gestión de inundaciones costeras. Luego, se describirá la metodología empleada detallando las técnicas de captura, procesamiento y análisis de datos. Posteriormente, se presentarán las batimetrías y los modelos digitales de elevación, seguidos de un análisis que conecta estos hallazgos con los objetivos planteados, derivando en conclusiones que reflexionen sobre las implicaciones del estudio y posibles aplicaciones prácticas. Para terminar, se incluyen las referencias de consulta y anexos.

2. Definiciones y Términos

- Riesgo: Es el resultado de combinar la vulnerabilidad y el peligro ante un fenómeno natural y antropogénico, que represente una amenaza a la población. (Rosengaus Moshinky et al., 2002)
- Vulnerabilidad: Es un factor interno del riesgo de un sujeto, objeto o sistema, expuesto a la amenaza, que corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado. (Integración de información para la estimación del peligro sísmico & Gutiérrez Martínez, 2006)
- RGB¹: Por sus siglas en ingles Red, Green, Blue, es un sistema aditivo donde los colores se forman combinando las intensidades de rojo, verde y azul. (Gonzales & Woods, 2018)s
- GNSS: Sistemas globales de navegación por satélite (por sus siglas en ingles), engloban una constelación de satélites que proporcionan datos de posicionamiento y navegación. (Kaplan & Hegarty, 2006).
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés) es un sistema GNSS. (Hofmann-Wellenhof et al., 2001).
- RBB: Por sus siglas Radio Banda Base, es un componente en sistemas de telecomunicaciones que procesa señales en sus frecuencias originales (Molisch, 2011).
- RINEX: Los formatos de intercambio de GPS (por sus siglas en inglés), es un estándar de formato para almacenar datos GNSS sin importar el fabricante del receptor (Gutner & Estey, 2007).

¹ <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rgna/>

3. Marco Teórico.

3.1. Cartografía.

La cartografía es la ciencia que se enfoca en la creación de los mapas además del estudio de los principios y las técnicas usadas en la representación gráfica del espacio (Fallas, 2023). Menéndez (2009) menciona que el análisis de riesgo es uno de los conceptos clave de la cartografía debido a, que hace referencia al proceso a través del cual se reconocen, evalúan y gestionan los principales riesgos que perjudicarán a un proyecto, organización o un sistema. El análisis de riesgo tiene como objetivo entender los posibles eventos adversos que afectan a un sistema y su impacto para la toma de decisiones de manera informada y la mitigación de efectos negativos (Sánchez y Martínez, 2019).

Mumford y Surtherland (2021) definen a la fotogrametría como la ciencia y la técnica que permite la obtención de información sobre los objetos y el entorno a través del uso de las fotografías. Suele basarse en la toma de las imágenes aéreas o terrestres que se van analizando para poder extraer los datos precisos relacionados con las dimensiones y la posición de los objetos que son fotografiados. Finalmente, la teledetección, es el proceso donde se obtiene la información sobre algún área, objeto o fenómeno sin que se tenga un contacto físico de manera directa, por lo general, se realiza a través del uso de los sensores montados en satélites, aviones y/o drones (Lillesand, Kiefer y Chipman, 2015).

3.2. Bases Cartográficas.

Torres (2015) menciona que las bases cartográficas se refieren a los fundamentos, así como los principios sobre los que se va construyendo y

usando mapas de una forma efectiva. Dentro de las bases cartográficas más importantes se pueden mencionar:

- Sistema de coordenadas.

El sistema de coordenadas se refiere a un sistema de referencia que permite la ubicación de puntos específicos en la superficie terrestre a través de coordenadas (Menéndez, 2009). Existen diferentes tipos, como:

- Coordenadas planas. Las coordenadas planas utilizan sistemas de proyección para la representación de la superficie terrestre, como el *Universal Transverse Mercator* (UTM) o la cuadrícula de referencia local.
- Coordenadas gráficas. Se basan en la longitud y la latitud. Estas coordenadas se caracterizan por definir la posición en la esfera.

- Proyecciones cartográficas

Son los métodos usados para la representación de la superficie curva de la Tierra en algún plano (Fallas, 2003). Snyder (1987) menciona que entre las más usadas se encuentran:

- Proyección de Mercator. Es ampliamente usado para la navegación marítima y aérea, debido a que conserva los ángulos y direcciones.
- Proyección de Universal Transverse Mercator. Divide la Tierra en zonas longitudinales que permiten representar pequeñas áreas con alta precisión, se utiliza en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

- Proyección de Robinson. Es una proyección que equilibra las distorsiones proporcionando una visión más realista del mundo, es comúnmente utilizada para fines educativos.
- Cartografía temática

La cartografía temática incluye mapas que muestran la información específica sobre algún tema en específico como son la densidad de población, el uso del suelo, permiten un análisis detallado de ciertos aspectos particulares del área representa (Torres, 2015).
- Datos espaciales

Se refiere a la información con relación a la localización y las características de los objetos en la superficie terrestre. Pueden ser diferentes tipos como ráster, o de vectores (Fallas, 2003).
- Modelos digitales del terreno

Se refiere a las representaciones digitales de la superficie terrestre, englobando la información sobre las elevaciones (Torres, 2015). Hay diferentes tipos como son:

 - Modelo digital de elevación. Representará las elevaciones del terreno.
 - Modelo digital de superficie. Engloba las elevaciones del terreno, así como las características relacionadas con el terreno como son los edificios.

3.3. Drones en la Cartografía.

La tecnología de los drones ha logrado revolucionar la cartografía al brindar nuevas maneras de recopilación de los datos geoespaciales con una gran precisión, eficacia, así como flexibilidad. Los drones, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados (VANT) han logrado actualizar la forma en que se van creando y actualizando los mapas, gracias a la alta resolución de las cámaras y el procesamiento (Pineda y Perdomo, 2015).

- Fotogrametría área

Se refiere a la técnica para capturar las fotografías desde los drones para la creación de los mapas y modelos tridimensionales del terreno. Los drones van tomando diferentes imágenes con cierta área de traslape, necesario para procesar con el software especializado, quien como producto genera un ortomosaico, así como los modelos 3D de manera detallada (Henao y Montero, 2020).

Las principales aplicaciones son:

- Generación de los modelos digitales de elevación

Se refiere a la creación de las representaciones digitales del relieve terrestre haciendo uso de los datos que se captura por los drones. Posibilita la visualización exacta de las elevaciones y pendientes, es de utilidad para los estudios topográficos, la planificación territorial, así como el análisis de terrenos (Pineda y Perdomo, 2015).

- Monitoreo y gestión de recursos

El uso de los drones permite la supervisión y gestión de los recursos naturales, como los bosques, los cuerpos de agua, además de las regiones agrícolas (Pineda y Perdomo, 2015).

- Inspección de infraestructuras

Se refiere a la inspección de las infraestructuras como son los puentes, los edificios, así como las torres para la evaluación del estado y realización de los mantenimientos. Brinda las vistas de manera detallada, así como el acceso a las regiones difíciles de alcanzar, a través de la mejora de la seguridad y disminuyendo los costos de inspección (Henao y Montero, 2020).

- Recopilación de datos para Sistemas de Información Geográfica

Se refiere a la integración de tanto datos vectoriales como rasterizados, recopilados por los drones en los sistemas SIG para el análisis geoespacial avanzado (Pineda y Perdomo, 2015).

- Documentación de cambios en el terreno

Hace referencia al registro y el análisis de los cambios en el terreno conforme pasa el tiempo, teniendo como beneficio la evaluación de los impactos ambientales, dar un seguimiento de los procesos de erosión, así como los cambios en el uso del suelo (Henao y Montero, 2020).

Pineda y Perdomo (2015), así como Henao y Montero (2020) mencionan que dentro de los principales beneficios se pueden enlistar:

- Eficacia y rapidez

Los drones podrán cubrir grandes regiones en poco tiempo, logrando acelerar la recopilación de los datos y disminuyendo el tiempo necesario para crear los mapas

- Acceso a las áreas inaccesibles

Los drones posibilitan la recopilación de los datos en las regiones difíciles de alcanzar o peligrosas como terrenos accidentados o regiones de desastre

- Versatilidad

Los drones se podrán equiparar con diferentes sensores como cámaras RGB, las cámaras multiespectrales, además de los sensores térmicos logrando adaptarse a distintas necesidades de cartografía

Además, estos mismos autores mencionan que dentro de los principales desafíos y consideraciones se pueden enlistar:

- Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas adversas podrán perjudicar el rendimiento de los drones, así como la calidad de los datos recopilados

- Almacenamiento y procesamiento de datos

Los datos que se capturan por los drones podrán ser voluminosos, así como recurrir un software avanzado para el procesamiento, así como el análisis

3.4. Imágenes Multiespectrales.

Las imágenes multiespectrales, se refieren a conjuntos de datos que permiten captar información sobre un área determinada a partir de múltiples longitudes de onda del espectro electromagnético. De manera textual: “Las imágenes multiespectrales se basan en la adquisición de espectros de

reflectancia a través de dispositivos optoelectrónicos” (Hardeberg, 1999, cit. por, Botina, 2015, p. 62). De esta forma, permiten analizar características detalladas del terreno, como la vegetación, el agua, el suelo y los cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Esto las convierte en una herramienta valiosa para el monitoreo y la toma de decisiones en una amplia gama de campos. Por ejemplo, permiten monitorear la salud de los cultivos, detectar enfermedades, estimar rendimientos y optimizar la gestión de la fertilización y el riego; además ayudan en el monitoreo de la vegetación, en la detección de cambios en el uso del suelo, en la evaluación de la calidad del agua y la detección de contaminación ambiental.

De manera muy importante, las imágenes multiespectrales son cruciales para la elaboración de mapas temáticos, mapas de uso del suelo y cobertura vegetal, así como la generación de modelos de elevación o sus correcciones, con lo cual se puede contar con una mayor precisión. Estos productos a su vez permiten una mejor toma de decisiones en diversas áreas relacionadas al manejo como la gestión de recursos naturales (bosques, cuerpos de agua, suelos fértiles y áreas protegidas), evaluación de daños después de desastres naturales y planificación de medidas de respuesta y recuperación, entre otras.

3.5. Tecnologías Relacionadas.

De acuerdo con Henao y Montero (2020) podemos enlistar las tecnologías relacionadas que a continuación se mencionan:

- GNSS y GPS

Se refieren a los sistemas de navegación que brindan datos precisos sobre la ubicación y permiten la georreferenciación de manera exacta de los datos capturados por los drones.

Los mismos autores, afirman que dentro de los sensores para los drones se pueden enlistar:

- Cámara RBB

Es una cámara estándar que captura imágenes a color, ofreciendo como ventaja un aérea adecuada para la fotogrametría, así como la creación de ortofotos.

- Cámara térmica

Es el sensor que se encarga de detectar la radiación infrarroja para la captura de imágenes térmicas. Tiene como ventaja la detección de las diferencias de temperatura. Suele ser útil para la inspección de los edificios y el monitoreo de los cambios térmicos.



Figura 1. Cámara térmica marca DJI Aerial IR Gimbal.

- *LiDAR* (del inglés *Light Detection And Ranging*).

Es el sensor que ocupa el láser para medir distancias y generar modelos detallados del terreno, teniendo como ventaja brindar los

datos de elevación precios y detallados así las áreas con vegetación densa.



Figura 2. Cámara térmica marca DJI Zenmuse L2.

- Radar de apertura sintética.

Este tipo de tecnología utiliza sensores que usa antenas de radar capaces de emitir y recibir pulsos de ondas electromagnéticas a partir de las cuales se producen imágenes del terreno. Este tipo de tecnología tiene la gran ventaja y capacidad de operar en condiciones meteorológicas adversas y brinda datos detallados de forma independiente a las condiciones de visibilidad o cobertura de nubes.

- Sensores de fluorescencia.

Logran capturar la fluorescencia natural que emiten los objetos en respuesta a la radiación. Una de las ventajas de este tipo de sensores es que permite identificar características específicas de plantas y minerales.

- Cámaras de alta resolución.

Son aquellas cámaras que logran captar las imágenes a gran detalle, su principal ventaja es que brinda las imágenes nítidas para los análisis previos.

3.6. Consideraciones para la selección de drones y sensores.

Pineda y Perdomo (2015) afirman que, para seleccionar el tipo de dron y el tipo de sensor a utilizar, lo primero es establecer el objetivo o propósito de la misión, ya sea para el mapeo general, la inspección detallada o el monitoreo ambiental. Posteriormente, se debe de considerar la resolución de los sensores debido a que impacta de forma directa en la calidad de los datos recopilados, así como la precisión de los mapas generados. Después, es necesario elegir los drones con suficiente duración de vuelo, así como el alcance para lograr cubrir el área de interés sin la necesidad de diferentes recargas. Es necesario además asegurar que el dron, así como los sensores sean los adecuados para las condiciones ambientales en donde se llevará a cabo la misión además de la cobertura de nubes, cantidad de lluvia y acceso a la región de interés. Finalmente, se requiere cumplir con las regulaciones locales y nacionales establecidas para el uso de drones, así como asegurar que la toma de imágenes o información sea posible para su posterior procesamiento y análisis.

3.7. Procesamiento de imágenes aéreas.

El procesamiento de imágenes aéreas a partir de datos capturados por los drones, satélites o aviones es un proceso fundamental para la creación y el análisis de los mapas, así como modelos geoespaciales. Es un proceso que requiere un conjunto de técnicas y de etapas en las que las imágenes

aéreas se convierten en productos cartográficos de gran utilidad (Heano y Montero, 2020). A continuación, en la Figura 3, se presentan los pasos que se involucran en el procesamiento de las imágenes aéreas:

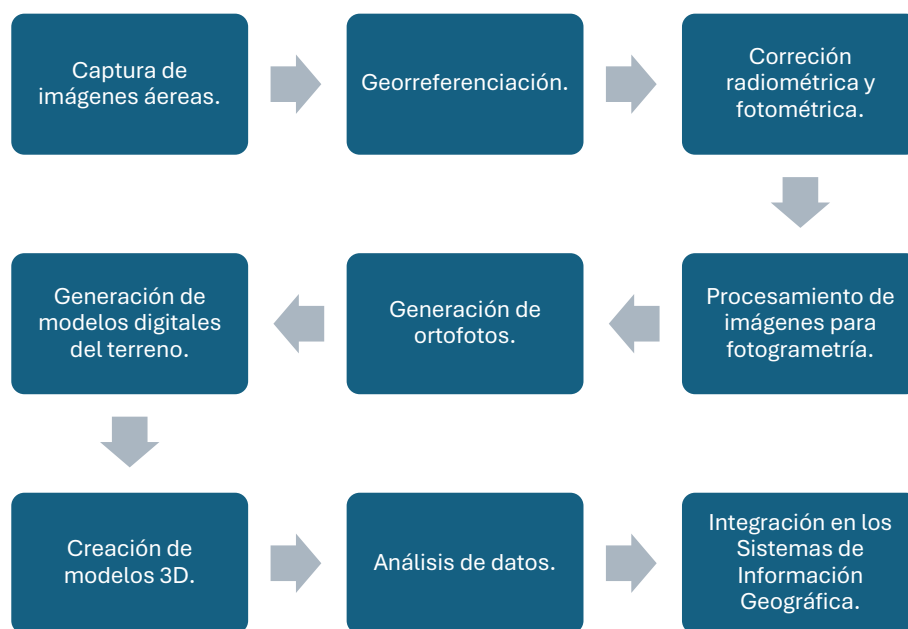


Figura 3. Procedimiento para el procesamiento de las imágenes aéreas.

4. Metodología.

4.1. Área de Estudio.

Bojórquez (s.f.) menciona que Isla Arena es una isla que se encuentra en el estado de Campeche, México y es parte de la región de la península de Yucatán (Figura 4). Se caracteriza por ser una isla pequeña, su extensión es de 12 kilómetros de largo y de ancho son 3 kilómetros. Tiene una tipografía plana y se encuentra rodeada por mar, bosques de manglar y una laguna costera.



Figura 4. Área de estudio.

A la isla se le reconoce por su biodiversidad, así como los ecosistemas costeros que engloba: áreas de bosques de manglar, playas arenosas y zonas inundables o marismas. Dichos ecosistemas brindan hábitat para diferentes especies de flora y fauna. Es un sitio de anidación para aves marinas, englobando las diferentes especies de flamencos y otras aves costeras. De igual manera es hogar para diferentes especies de reptiles, así como de mamíferos pequeños. Los manglares además de las áreas costeras brindan hábitats cruciales para diferentes especies de peces, así como la vida marina (Conservación Internacional México, 2024).

La historia de Isla Arena se encuentra marcada por ser un sitio de importancia pesquera y ecológica. La población cercana, especialmente en los municipios de la región, tiene una larga tradición pesquera, además de realizar otras actividades relacionadas con el mar. La cultura local se

encuentra influenciada por comunidades mayas, así como mestizas de la zona. La isla es un destino que tiene popularidad para la observación de las aves, particularmente para observar a los flamencos, así como otras aves marianas en su hábitat natural.

4.2. Equipo utilizado.

Para la ejecución de la recolección de datos se utilizaron los siguientes equipos:

- DJI Phantom 4 Multispectral.

Es un dron equipado con un sistema de captura multispectral, cuenta con una sensor RGB y cinco multispectrales (azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano) que permiten capturar la información a aproximadamente 5.2cm por píxel a 50 metros de altitud. El dron está equipado con el sistema TimeSync que alinea el controlador de vuelo, las cámaras y el GPS; igualmente utiliza un sensor de luz para corregir la variación de iluminación (DJI, s/f).

- SonTek-M9

Es un medidor acústico Doppler de velocidad (ADCP) diseñado para la medición de caudales en ríos, arroyos y otros cuerpos de agua. Está equipado con nueve transductores acústicos que operan en múltiples frecuencias. Permite obtener de la velocidad de flujo con una precisión de $\pm 0.3\%$ de la medición $\pm 0.003\text{m/s}$; y la profundidad con una precisión de $\pm 1\%$ de la medición en diferentes perfiles de agua. Utiliza tecnología *RiverSurveyor*, la cual integra GPS y brújula interna para garantizar la precisión en la localización de las mediciones (YSI, s/f).



Figura 5. Equipo Utilizado para la toma de los datos batimétricos (Sontek-M9).

- T300 Plus GNSS Receiver

Se trata de un receptor de alta precisión diseñado para la captura de datos geoespaciales utilizando un sistema global de navegación por satélite (GNSS) y es capaz de proporcionar precisión espacial en el orden de centímetros. El receptor utiliza tecnología *RTK* (del inglés *Real Time Kinematics*), lo que permite corregir la posición con precisión y en tiempo real (ya sea en una estación base o a través de redes de estaciones de referencia). Asimismo, para la medición de los puntos de control, se instaló el GPS diferencial, la base se colocó como referencia estática y el móvil se utilizó para la medición.



Figura 6. Equipo Utilizado para la toma de los datos de GPS (T300 Plus GNSS Receiver).

4.3. Obtención de Datos.

Se realizó una visita al sitio de estudio durante los días 11 y 12 del mes de enero de 2024, esta visita fue parte de un proyecto interno del Departamento de Matemáticas Aplicadas a Geociencias (DMAG) de la ENES Unidad Mérida. Durante la visita, se tomaron datos de batimetría, imágenes de dron y datos de GPS diferencial.

Para las fotos de dron, se realizaron 8 planes de vuelo comenzando en la parte sur de la isla y terminando en el extremo norte de la isla (Figuras 7-14). Los planes de vuelo fueron precargados en el programa GSpro de DJI², utilizado para controlar el dron. Durante el proceso de obtención de imágenes fue necesario asegurar una superposición mínima del 60% entre las imágenes y un 80% en la parte frontal, además de mantener una altura constante de 50m para garantizar la calidad del modelo 3D; en las figuras se observa la longitud del vuelo

El plan de vuelo fue el siguiente:.

² <https://www.dji.com/mx/ground-station-pro>

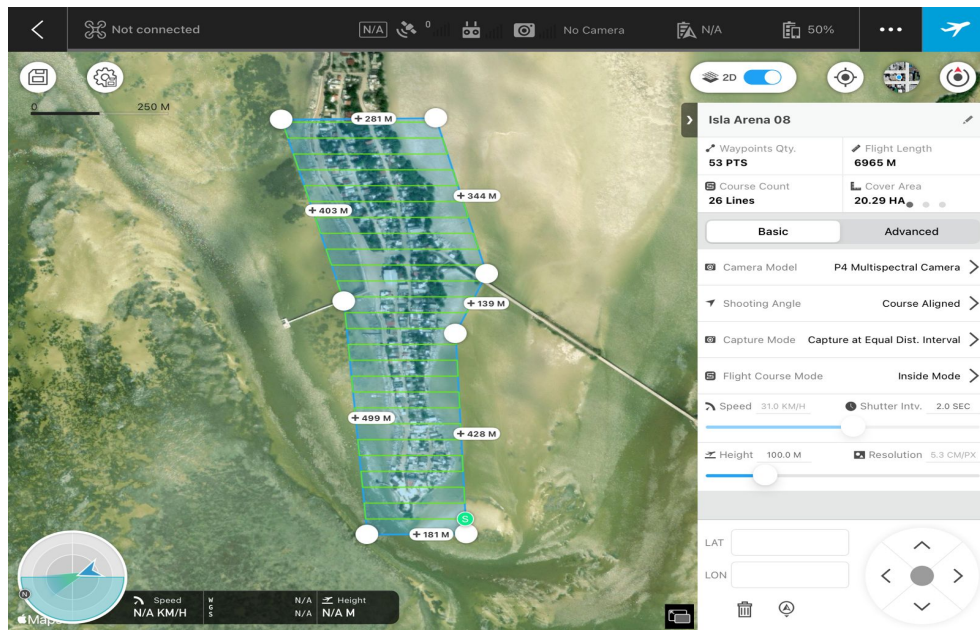


Figura 7. Plan de vuelo para la sección 1 localizada en el extremo sur de Punta Arena, Campeche.

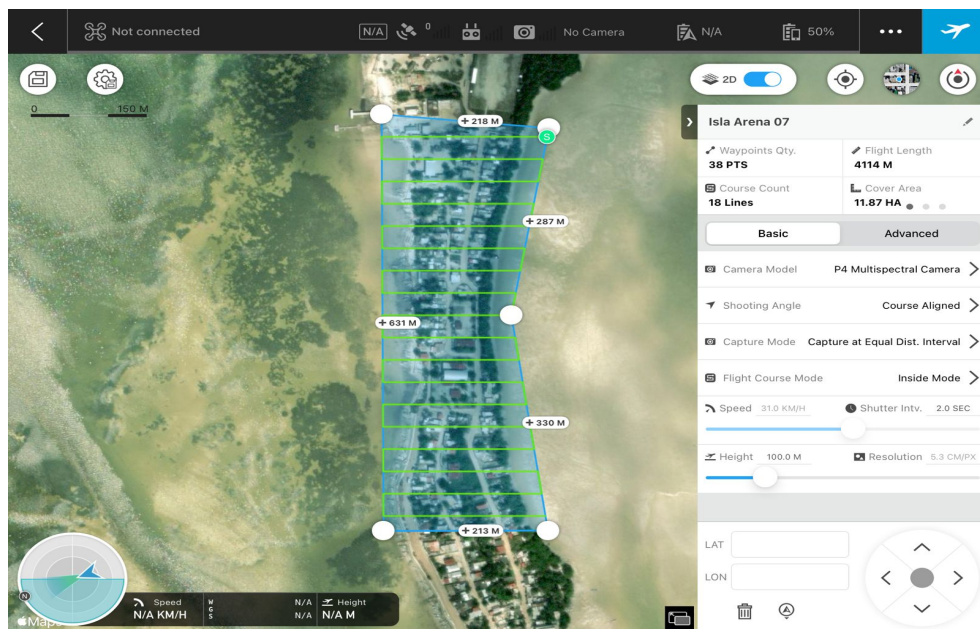


Figura 8. Plan de vuelo para la sección 2 de Punta Arena, Campeche.

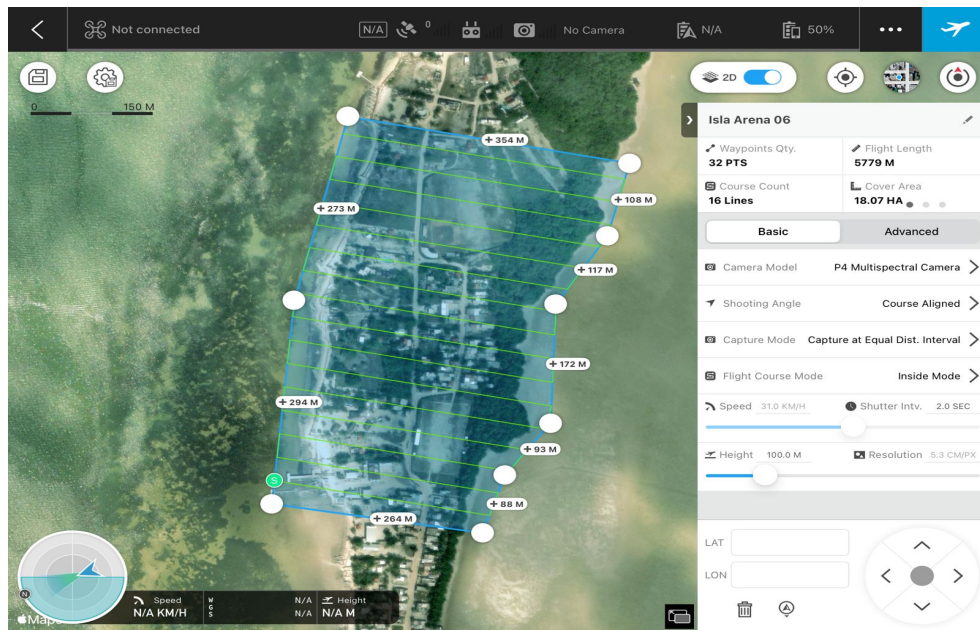


Figura 9. Plan de vuelo para la sección 3 de Punta Arena, Campeche.

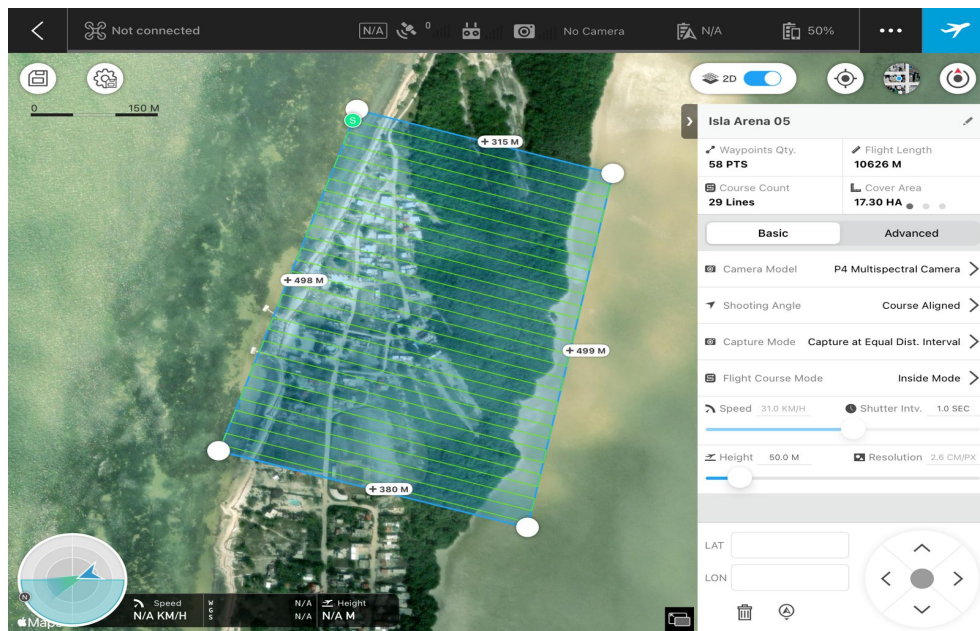


Figura 10. Plan de vuelo para la sección 4 de Punta Arena, Campeche.

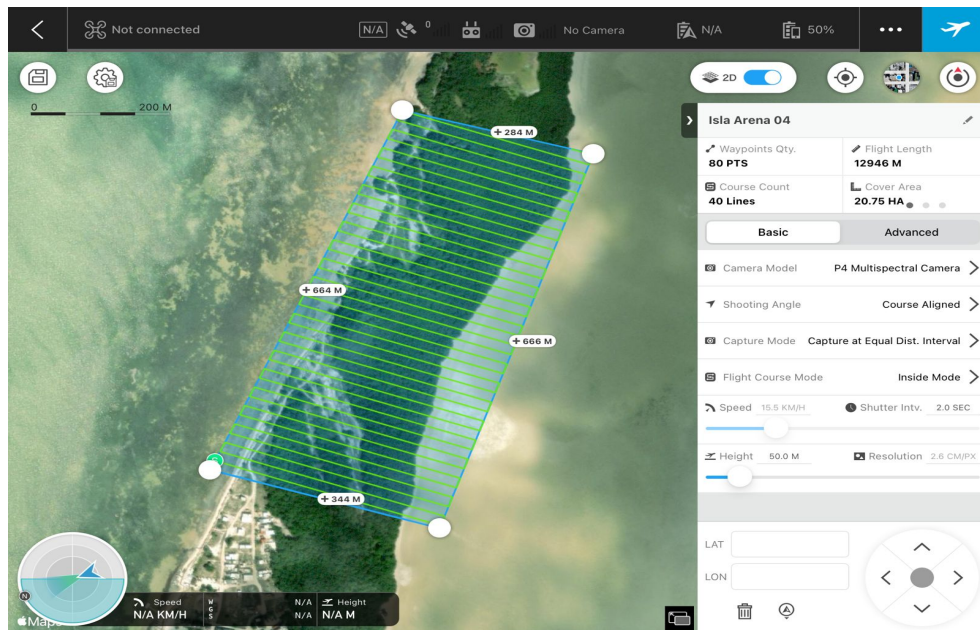


Figura 11. Plan de vuelo para la sección 5 de Punta Arena, Campeche.

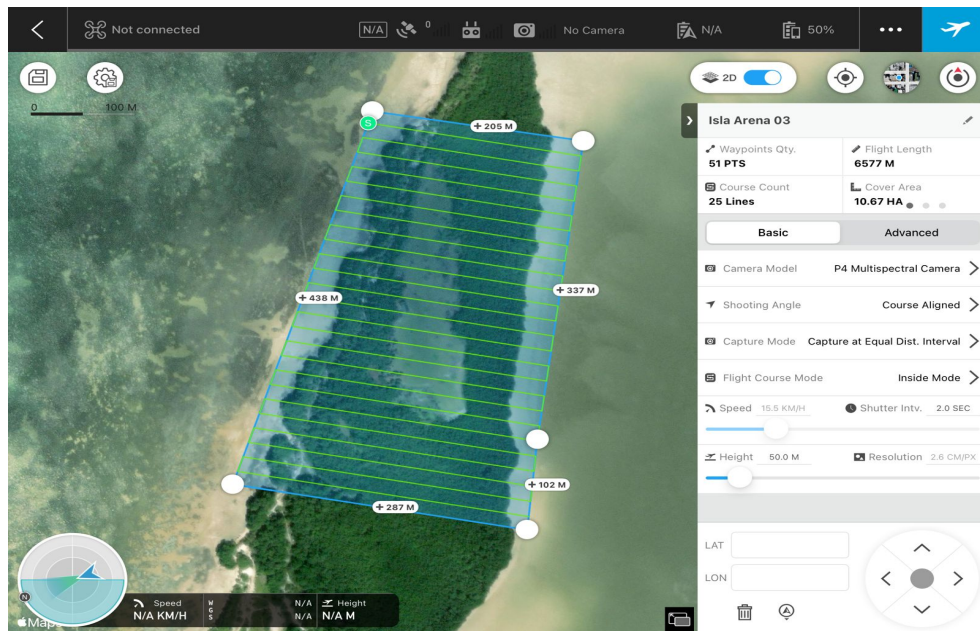


Figura 12. Plan de vuelo para la sección 7 de Punta Arena, Campeche.

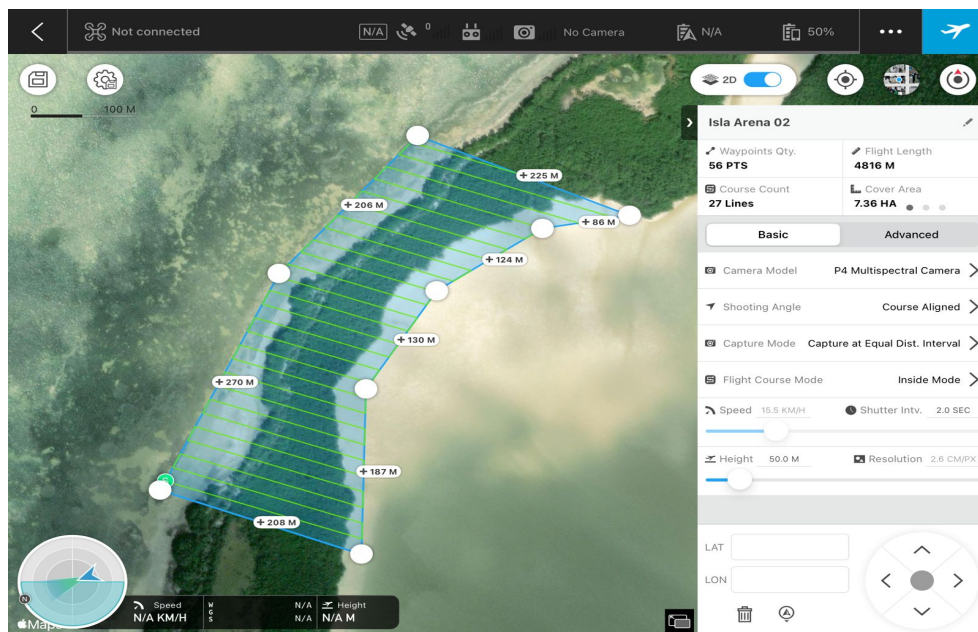


Figura 13. Plan de vuelo para la sección 7 de Punta Arena, Campeche.

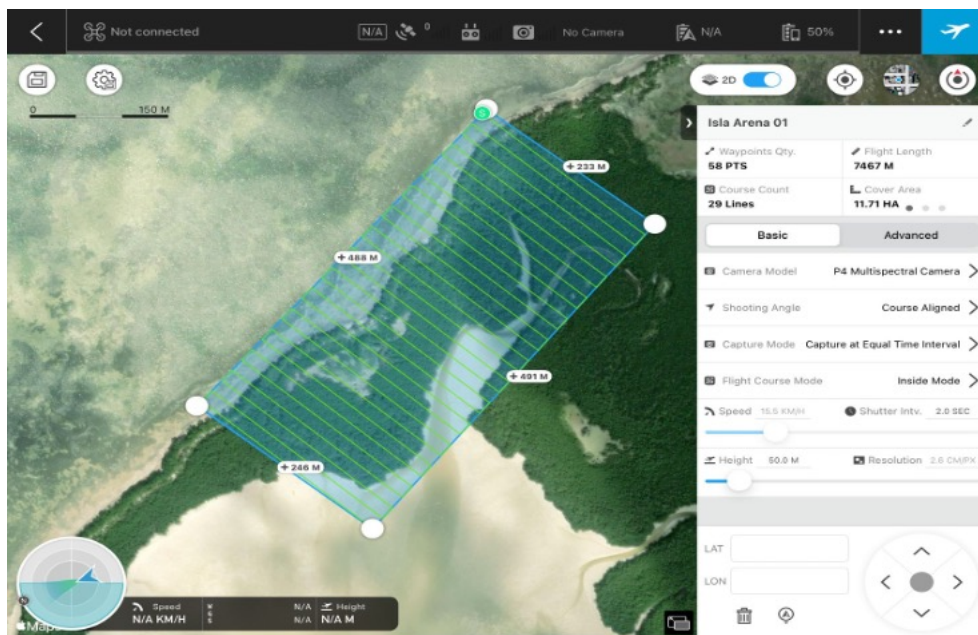


Figura 14. Plan de vuelo para la sección 8, localizada en el extremo norte de Punta Arena, Campeche.

El proceso de recolección de batimetría se realizó programando el instrumento mediante el software Sontek RiverSurveyor Live³; colocando el sensor dentro del agua mediante una estructura fija a la borda de una embarcación menor y realizando la toma de datos de profundidad a lo largo del recorrido. Al igual que con el dron, se colocó una base de GPS diferencial para la corrección de los datos de GPS obtenidos por la sonda y eliminar las variaciones de la señal debido al movimiento de la embarcación.

4.4. Procesamiento de datos batimétricos.

Para este procesamiento, se desarrolló un código en el software MATLAB⁴, conocido por sus capacidades de cálculo numérico y herramientas de visualización, además de su capacidad para incorporar múltiples lenguajes de programación.

Se comenzó creando un catálogo con todos los archivos con la extensión *.mat*. Seguidamente, se cargaron los datos a la memoria para extraer los valores “*GPS.Longitude*”, “*GPS.Latitude*” y “*Summary.Depth*”, los cuales se asignaron a las variables ‘x’, ‘y’ y ‘z’. Posteriormente, se concatenaron los valores para crear una matriz. Finalmente, se generó un gráfico 3D con los datos, utilizando marcadores, y se guardaron en formato *.csv* para su posterior procesamiento.

Para el suavizado de los datos, se creó otro código en MATLAB que utilizó un promedio móvil. Primero, se cargaron los datos anteriores y se extrajeron las columnas ‘x’, ‘y’ y ‘z’ por separado. Luego, se definió el número de puntos para el promedio móvil mediante la inspección visual de los datos. El número de puntos considerado para el promedio móvil y suavizado de los datos se

³ <https://www.xytem.com/en-us/products--services/software/riversurveyor-live-rsl/>

⁴ <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

estableció en 10. Para concluir se realizó nuevamente la matriz de longitud, latitud y profundidad con los datos suavizados y se graficó la profundidad en azul; se guardó la información en formato .csv para seguir con el procesamiento.

Finalmente, se realizó una interpolación tipo Kriging con semi variogramas. Para ello, se inició separando nuevamente las variables 'x', 'y' y 'z, y se multiplicó los valores de z por -1 para que sean valores por debajo del nivel medio del mar (NMM); el valor de NMM se definió como 0 para evitar problemas en los valores de interpolación. Se creó una malla uniforme de 100x100 puntos de las variables 'x', 'y' y, y Esta malla fue utilizada para la interpolación tipo *Kriging* y se creó una imagen bidimensional para representar los valores interpolados. Todos los códigos creados relacionados al procesamiento de la batimetría se encuentran en el Anexo 1.

4.5. Procesamiento de datos de GPS diferencial.

El procesamiento de los datos de GPS diferencial se realizó con diferentes programas, los cuales fueron:

- Leica Geo Office⁵.

En este programa primero se cargaron los datos RINEX de la estación de Mérida, que fueron obtenidos a través de la página de INEGI. Posteriormente, se procedió a ajustar las bases obtenidas con los archivos RINEX de la estación de Mérida. Finalmente, se corrigieron los datos móviles con la base.

- Unerinex.

⁵ <https://leica-geosystems.com/es-mx/rugbycl/archive-data/software/leica-geo-office>

Esta herramienta fue utilizada para unir los RINEX de la base de Mérida, ya que estos se encuentran divididos por horas.

- Compass Solution.

Esta herramienta al igual que el software Leica Geo Office, se utilizó para corregir las bases con la estación de Mérida, y posteriormente corregir los móviles.

- Compass Receiver Utility⁶.

Este programa se utilizó para convertir los archivos RINEX a archivos *.cnb* los cuales fueron utilizados en el programa Leica Geo Office.

- Leica Infinity⁷.

Se procesaron como puntos geodésicos y se ataron los móviles a las bases con las efemérides de los días 11 y 12 de enero.

4.6. Procesamiento de fotogrametría.

Para el análisis de las imágenes se utilizó fotogrametría a través del software Pix4D⁸. Posteriormente, las imágenes fueron preprocesadas, eliminando aquellas con defectos y verificando los metadatos (coordenadas GPS) para asegurar la correcta georreferenciación. Las imágenes seleccionadas se importaron en Pix4D, donde se creó un nuevo proyecto configurado con un sistema de coordenadas UTM. Una vez cargadas, se verificó la precisión georreferenciada y se procedió a la generación del modelo inicial mediante el proceso de alineación de imágenes, que permitió crear una nube de puntos densa a través de triangulación fotogramétrica. A continuación, se construyó una malla tridimensional detallada y se aplicaron

⁶ <https://www.comnavtech.com/sp/about/blogs/445.html>

⁷ <https://leica-geosystems.com/es-mx/products/gnss-systems/software/leica-infinity>

⁸ <https://www.pix4d.com/product/pix4dmatric-large-scale-photogrammetry-software/>

técnicas de filtrado para eliminar artefactos o puntos de fuera de lugar en la nube de puntos.

A partir de este proceso, se generaron diversos productos fotogramétricos como el ortomosaico que representa geométricamente la superficie terrestre, los modelos 3D para visualización tridimensional, el Modelo Digital de Superficie (MDS) y el Modelo Digital del Terreno (MDT). Asimismo, se produjeron curvas de nivel para el análisis topográfico y se realizaron análisis volumétricos en áreas específicas del terreno.

Finalmente, los resultados fueron validados mediante los puntos de control terrestre procesados anteriormente, con el objetivo de asegurar la precisión del modelo. Los productos finales fueron exportados en formatos como GeoTIFF para ortomosaicos y ONJ para modelos 3D.

4.7. Procesamiento de mascara de Isla Arena.

Este proceso se realizó en el programa ArcMap, y se comenzó cargando las capas del infrarrojo cercano y la banda verde que fueron obtenidos del vuelo de dron. Se generó un índice de vegetación normalizado (NDVI) utilizando la banda verde, con el fin de obtener mejores resultados durante la clasificación no supervisada. La fórmula utilizada fue:

$$GNDVI = \frac{(NIR - green)}{(NIR + green)}, \quad (Ec.1)$$

donde *NIR* se refiere a la banda del Infrarrojo Cercano (Near Infrared, por sus siglas en ingles) y *green* es la banda verde. Seguidamente, se realizó una clasificación no supervisada con un número de bandas que se ajusta de acuerdo con cada capa. Como paso final, se realizó una reclasificación del ráster y de las bandas dentro de la línea de costa. Posteriormente, se

realizó una conversión de ráster a polígono para eliminar las bandas fuera de la línea de la costa. Para finalizar se realizó una última transformación de polígono a línea y se delimitó la línea de costa con las líneas anteriormente obtenidas.

Una vez obtenida la máscara de la isla, se recortó las batimetrías y los modelos de elevación superficial obtenidos para crear un modelo 3D.

5. Resultados.

5.1. Datos del GPS diferencial obtenidos.

Los resultados de los datos procesados del GPS diferencial se generaron en formato .csv, los cuales se encuentran en el Anexo 2. En la figura 15 se observa que los puntos de control 4 al 7 se encuentran dentro del área estudiada; mientras que la figura 16 se observa que los puntos de control 1, 2 y 3 están fuera del área de estudio.



Figura 15. Datos GPS diferencial ampliado.



Figura 16. Datos GPS diferencial extendido

5.2. Batimetrías.

Las batimetrías se dividieron en tres partes ya que de esa forma se evitaron errores en la interpolación de datos por su separación, como se observa en la Figura 17. La forma en que se eligió la división de los datos fue la siguiente, los datos del lado oeste de Isla Arena como uno solo, mientras que los datos del lado este se separaron en norte y sur.

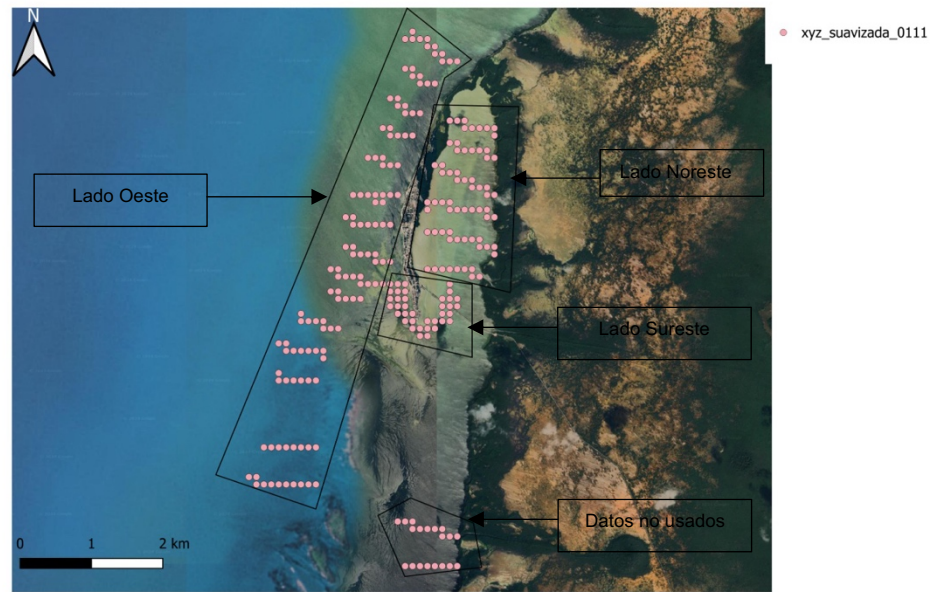


Figura 17. Representación espacial de batimetría.

Como se observa en la figura 18, los valores de la profundidad disminuyen conforme se acerca a la costa.

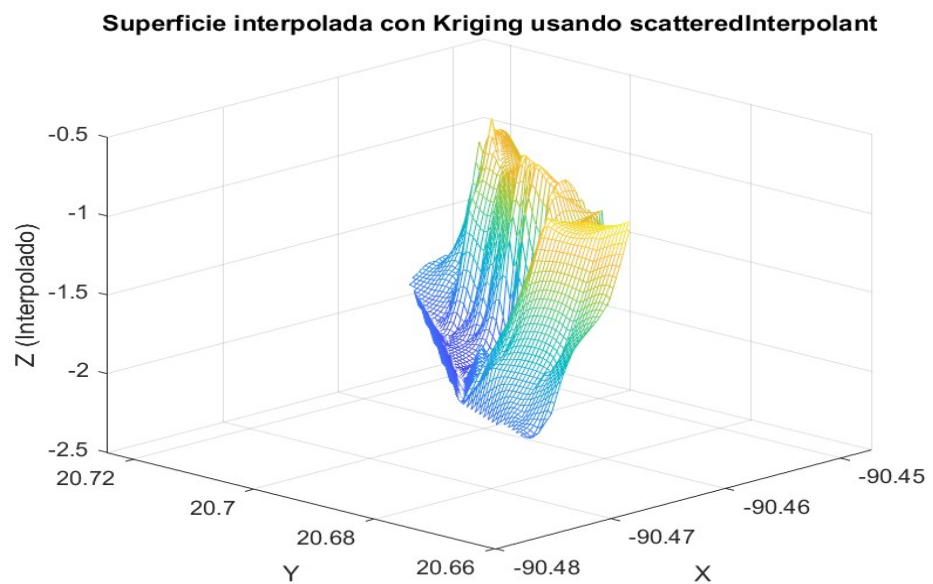


Figura 18. Interpolación Kriging, lado Oeste.

Mientras que en la figura 19, se observa la presencia de un cuerpo de agua.

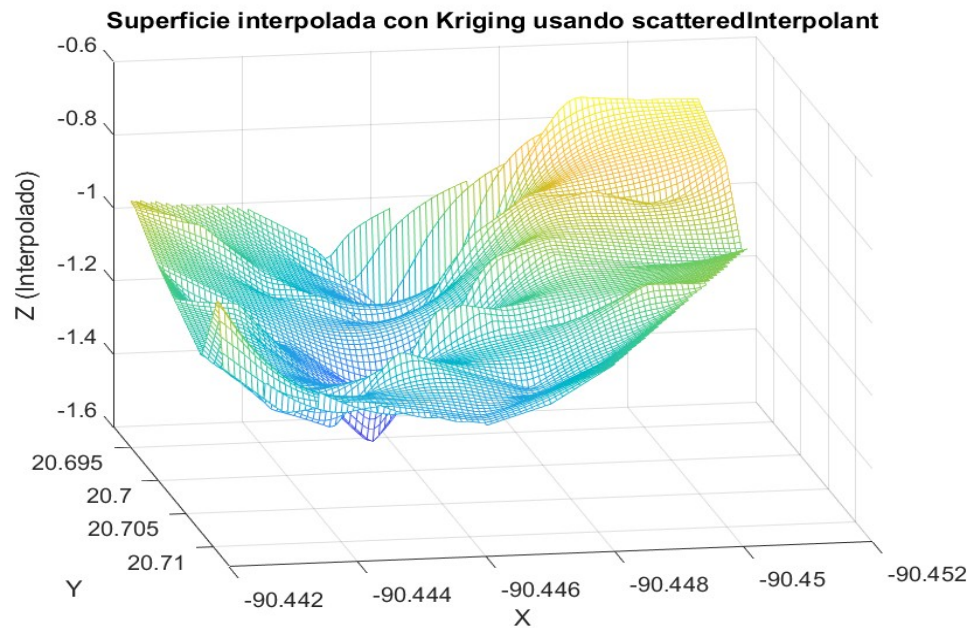


Figura 19. Interpolación Kriging, lado Noreste.

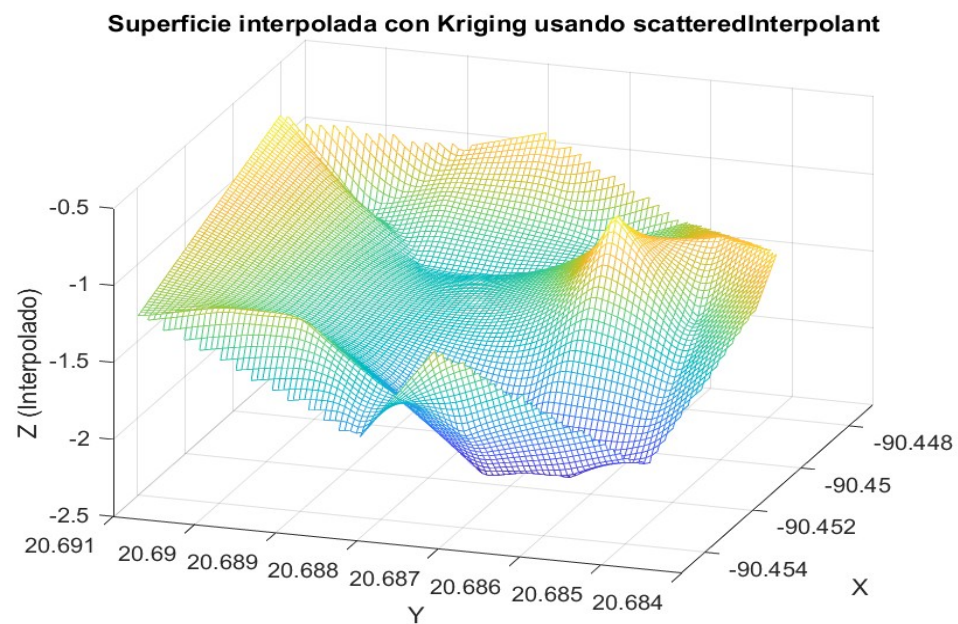


Figura 20. Interpolación Kriging Sureste

Una vez obtenidos los datos, estos se convirtieron a 2D para poder introducirlos al programa ArcMap, y la visualización quedó como se muestra en la imagen 15.

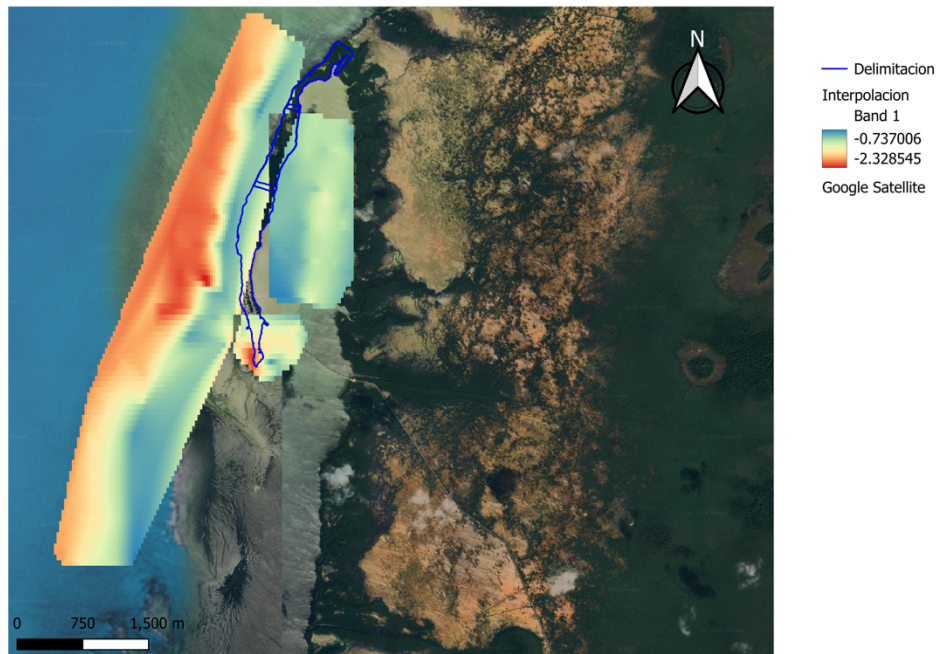


Figura 21. Interpolación representada en 2D.

5.3. Modelo Digital Superficial.

Los modelos digitales superficiales se dividieron en tres partes debido a el tamaño de la información a procesar. Se fraccionaron en tres áreas: el norte de la isla (Figura 22), zona intermedia (Figura 23) y zona urbana (Figura 24). La representación en 3D se presenta en las siguientes imágenes.

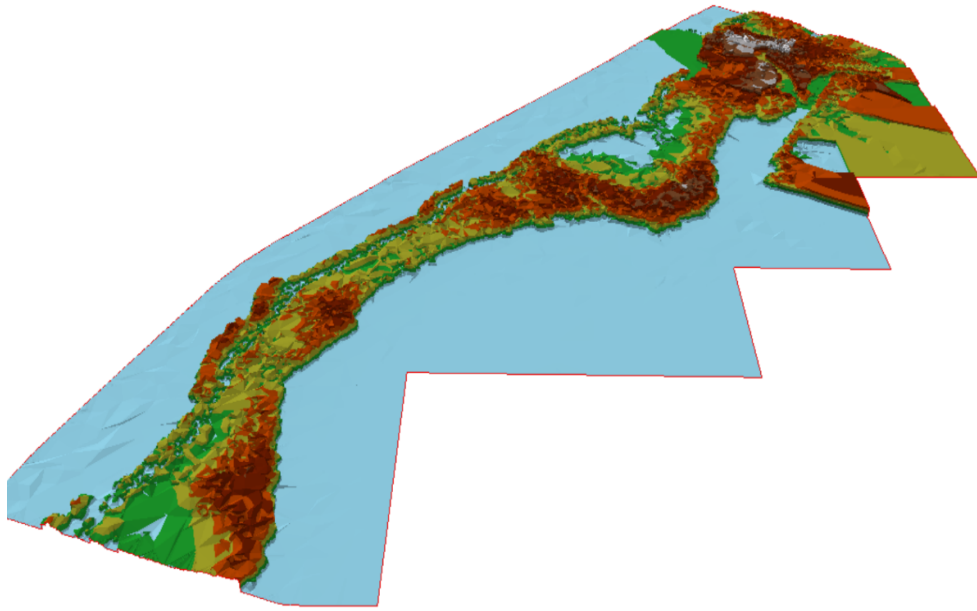


Figura 22. Modelo 3D del Modelo Digital Superficial de la parte Norte.

Para la parte intermedia y la zona urbana de la isla, se modeló lo siguiente en 3D.

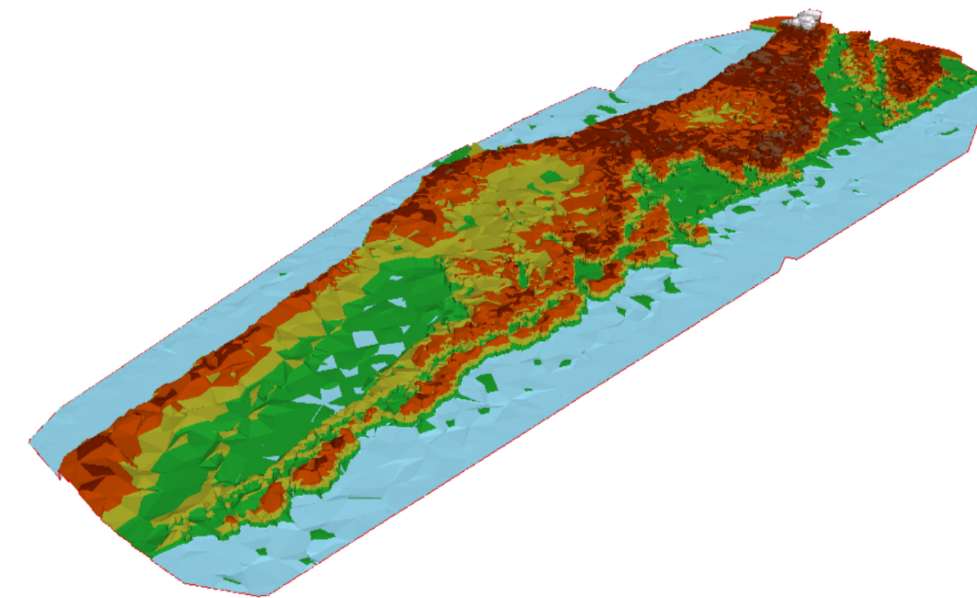


Figura 23. Modelo 3D del Modelo Digital, zona Intermedia.

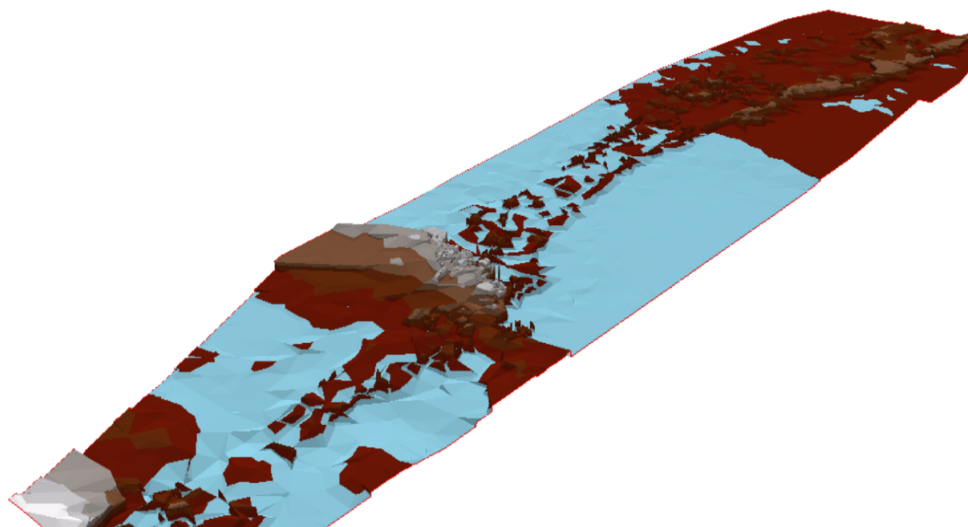


Figura 24. Modelo 3D del Modelo Digital, zona urbana.

Juntos se observan de la siguiente forma:

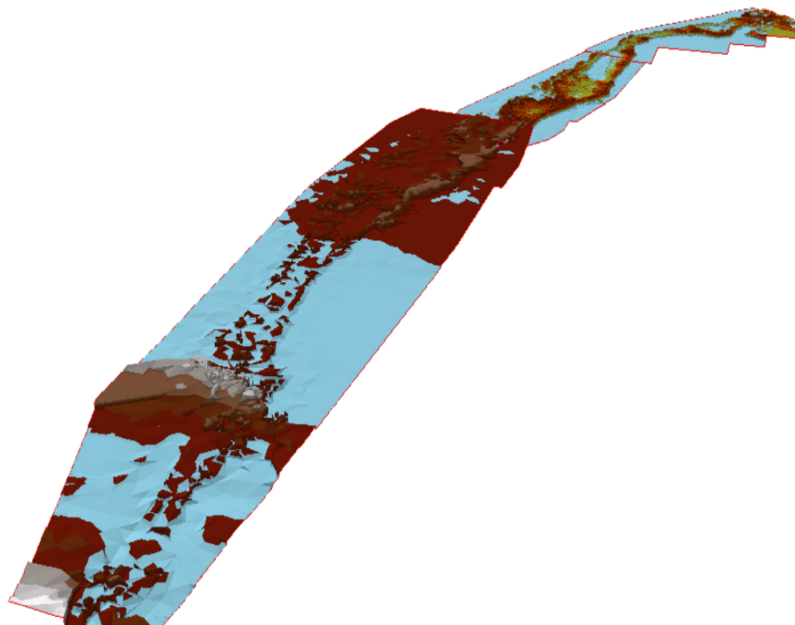


Figura 25. Modelo 3D del Modelo Digital de Isla Arena.

6. Consideraciones del procesamiento de datos.

El procesamiento de datos de GPS diferencial tuvo algunos inconvenientes al momento de hacer las correcciones de los puntos móviles, ya que por algún motivo el software Compass Solution no generaba las correcciones. Por esta razón se finalizó el procesamiento de los datos móviles en el software Leica Infinity. Sin embargo, al representar los datos en coordenadas se mostraba un claro ejemplo de que al momento de almacenar los datos se dañaron algunos de los datos, lo que ocasionó que los algunos de los puntos no pudieran ser corregidos o se encontraran fuera de la isla. Las batimetrías reflejaron la distribución de los datos a lo largo de la línea de costa de Isla Arena.

Los Modelos Digitales Superficiales fueron corregidos con los valores de la batimetría ya que, al hacer el procesamiento de los datos del GPS diferencial, no fue posibles corregirlos. Esta imposibilidad se relacionó a la forma en que se almacenaron los datos y generó errores importantes en el modelo 3D dentro de la sección de la zona urbana.

7. Conclusiones.

Los datos del GPS diferencial fueron almacenados utilizando el método PPK debido a la naturaleza del proyecto y la ausencia de una antena que permitiera el almacenamiento en RTK. Sin embargo, a partir de la experiencia adquirida durante el procesamiento, se concluye que el uso de RTK habría proporcionado una mayor resolución y precisión, lo que hubiera mejorado significativamente los resultados de este estudio.

El proyecto cumplió con su objetivo principal de actualizar las bases cartográficas. Además, la integración de drones demostró ser una herramienta valiosa para mejorar la precisión en la recolección de datos y la delimitación de zonas vulnerables a inundaciones. No obstante, para aprovechar al máximo esta tecnología, es necesario optimizar los métodos

de obtención y procesamiento de datos para superar los retos presentados en este proyecto. De esta manera, se podrá maximizar la precisión y fiabilidad del mapeo con drones, especialmente en comparación con los métodos tradicionales.

8. Referencias.

- Bojórquez, A. (s.f.). *Isla Arena, donde el tiempo se detuvo*.
<https://www.mexicodesconocido.com.mx/isla-arena-campeche-2.html>
- Bravo, J. D. (2000). *Breve introducción a la cartografía ya los sistemas de información geográfica (SIG)*.
- Chen, Z., Liu, Y., & Zhang, Y. (2022). Simulación y predicción de inundaciones utilizando datos de UAV: Un enfoque integrado. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 514.
<https://doi.org/10.1007/s10661-022-10640-4>
- Conservación Internacional México (2024). Conservación Internacional restaura 217 hectáreas de manglar en Campeche. *Portal Ambiental*.
<https://www.portalam biental.com.mx>
- DJI. (n.d) *Phantom 4 Multispectral*. DJI. <https://www.dji.com/phantom-4-multispectral>
- Elbakri, H., Ali, K., & He, H. (2019). Evaluación de los levantamientos fotogramétricos basados en drones para mapeo de alta precisión. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 156, 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.009>
- El-Rabbany, A. (2006). *Introduction to GPS: The Global Positioning System* (2nd ed.). Artech House.

- Fallas, J. (2003). *Conceptos básicos de cartografía. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre y Escuela de Ciencias Ambientales*. Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Gonzales, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- Gurtner, W., & Estey, L. (2007). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. *Astronomical Institute, University of Bern*.
- Henao, J. A., & Montero, J. C. (2020). Aeron: Tecnología drone para proyecto de cartografía geológica. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (281), 40-42.
- Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2001). *GPS: Theory and Practice*. Springer
- Integración de información para la estimación del peligro sísmico, & Gutiérrez Martínez, C. A. (2006, noviembre). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Gobierno de México. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/archivo/documentos/GB_Elaboracion_AE&M_Peligros_Riesgos_FEN_GEO.pdf
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS: Principles and Applications* (2nd ed.). Artech House.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- López, A., Gutiérrez, J., & Fernández, J. (2021). Estrategias de mitigación para el riesgo de inundaciones: El papel de los drones en la gestión

de llanuras aluviales. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(2), 657-674. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-657-2021>

Menéndez, F. J. S. (2009). Geodesia y cartografía: Los conceptos y su aplicación práctica (Vol. 3). *EOSGIS SL*.

Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications*. Wiley.

Mumford, J., & Sutherland, W. (2021). Fundamentos de fotogrametría y aplicaciones modernas. *Ediciones Técnicas*.

Pineda, M., & Perdomo, C. (2015). Los Drones. Una Alternativa para la Cartografía. # *VirtualDTIC*, (6).

Ribera Masgrau, L. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2004, núm. 43, p. 153-171.

Rosengaus Moshinky, M., Jiménez Espinosa, M., & Vázquez Conde, M. T. (2002, diciembre). Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México. *Gobierno de México*.
http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/archivo/documentos/ATLAS_CLIMA_CICLON_MEX.pdf

Sánchez, J. A., & Martínez, E. (2019). Análisis y gestión de riesgos: Enfoques y metodologías. *Ediciones Gestión 2000*.

Snyder, J. P. (1987). Map Projections: A Working Manual. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1395*.

Thomas, A., et. Al. (2015). Corrección de modelos digitales de elevación con imágenes multi-espectrales. In *XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (Junin 2015)*., 1-10

https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/50223/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Torres, I. (2015). Cartografía y ciudad. *URBS: Revista de estudios urbanos y ciencias sociales*, 5(2), 265-272.

Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Twilley, R. R., & Day, R. H. (2014). Manglares: ecosistema centinela frente al cambio climático, Golfo de México. *Madera y Bosques*, 20(), 39-75.

YSI. (n.d) *Sontek M9*. Sontek <https://www.ysi.com/sontek-m9>

9. Anexos.

9.1. Anexo 1.

```
catalogo=dir("*.mat");  
name=catalogo(1);  
  
for i=1:length(catalogo)  
    if i==1  
        load(catalogo(i).name)  
        x=GPS.Longitude;  
        y=GPS.Latitude;  
        z=Summary.Depth;  
    elseif i>1  
        load(catalogo(i).name)  
        x=[x;GPS.Longitude];  
        y=[y;GPS.Latitude];  
        z=[z;Summary.Depth];  
    end
```

```
end
```

```
xyz=[x,y,z];
```

```
plot3(x,y,z, 'r')
```

```
filename='xyz.csv'
```

```
writematrix(xyz,filename)
```

```
% Cargar los datos de batimetría desde un archivo CSV con tres columnas
```

```
% Se asume que las columnas son: [Latitud, Longitud, Profundidad]
```

```
datos = csvread('xyz.csv');
```

```
% Separar las columnas:
```

```
latitud = datos(:, 1);
```

```
longitud = datos(:, 2);
```

```
profundidad = datos(:, 3); % Suponiendo que la tercera columna es la  
batimetría
```

```
% Definir el número de puntos para el promedio (en este caso 5)
```

```
n = 10;
```

```
% Inicializar un vector para los datos de profundidad suavizados
```

```
profundidad_suavizada = zeros(size(profundidad));
```

```
% Aplicar el promedio móvil de 5 datos a la columna de profundidad
```

```
for i = 1:length(profundidad)-n+1
```

```
    profundidad_suavizada(i) = mean(profundidad(i:i+n-1));
```

```
end
```

```

% Completar los últimos valores para que coincida el tamaño del vector
profundidad_suavizada(end-n+2:end) = profundidad_suavizada(end-n+1);

% Combinar las columnas de latitud, longitud y profundidad suavizada
datos_suavizados = [latitud, longitud, profundidad_suavizada];

% Graficar los datos originales y suavizados para la profundidad
figure;
plot(profundidad, 'b', 'DisplayName', 'Profundidad Original');
hold on;
plot(profundidad_suavizada, 'r', 'DisplayName', 'Profundidad Suavizada');
legend;
xlabel('Punto de muestra');
ylabel('Profundidad');
title('Suavizado de Batimetría');

% Guardar los datos suavizados en un nuevo archivo CSV
csvwrite('krigingx.csv', datos_suavizados);

% Cargar el archivo CSV
data = readtable('krigingx.csv'); % Reemplaza con la ruta correcta
x = data.X;
y = data.Y;
z = data.Z;

% Multiplicar los valores Z por -1 para obtener valores negativos
z = z * -1;

% Crear una cuadrícula para la interpolación

```

```

[Xq, Yq] = meshgrid(linspace(min(x), max(x), 100), linspace(min(y), max(y),
100));

% Crear un objeto de interpolación
F = scatteredInterpolant(x, y, z, 'natural', 'none'); % Usar 'natural' para
kriging

% Aplicar la interpolación sobre la cuadrícula
Zq = F(Xq, Yq);

% Crear una imagen bidimensional (2D) usando un mapa de calor
figure;
imagesc(Xq(1,:), Yq(:,1), Zq); % Representar Zq como un mapa de calor
colorbar; % Añadir una barra de colores para representar la escala de
profundidad
title('Interpolación Krigingg - Imagen Bidimensional (Valores Negativos)');
xlabel('X');
ylabel('Y');

% Ajustar el mapa de calor para SIG
set(gca, 'YDir', 'normal'); % Ajusta para que las coordenadas estén en el
orden correcto

% Crear el vector de referencia espacial
R = georefcells([min(y), max(y)], [min(x), max(x)], size(Zq));

% Guardar los datos interpolados como archivo GeoTIFF (formato para
SIG)
geotiffwrite('interpolacion_krigingg1_2D.tif', Zq, R);

```

(En caso de requerirse el modelo en 3D se modifica el código al siguiente)

```
% Cargar el archivo CSV
```

```
data = readtable('kriging3.csv'); % Reemplaza con la ruta correcta
```

```
x = data.X;
```

```
y = data.Y;
```

```
z = data.Z;
```

```
% Multiplicar los valores Z por -1 para obtener valores negativos
```

```
z = z * -1;
```

```
% Crear una cuadrícula para la interpolación
```

```
[Xq, Yq] = meshgrid(linspace(min(x), max(x), 100), linspace(min(y), max(y),  
100));
```

```
% Crear un objeto de interpolación
```

```
F = scatteredInterpolant(x, y, z, 'natural', 'none'); % Usar 'natural' para  
krigingg
```

```
% Aplicar la interpolación sobre la cuadrícula
```

```
Zq = F(Xq, Yq);
```

```
% Visualizar el resultado
```

```
figure;
```

```
mesh(Xq, Yq, Zq);
```

```
title('Superficie interpolada con Kriging usando scatteredInterpolant');
```

```
xlabel('X');
```

```
ylabel('Y');
```

```
zlabel('Z (Interpolado)');
```

```
% Opción para guardar el resultado interpolado
```

```
writematrix([Xq(:), Yq(:), Zq(:)], 'resultados_krigingg.csv');
```

9.2. Anexo 2.

Etiqueta (Id)	Valor Z (Altitud)	Latitud	Longitud
a0	4.81	20.69518	-90.4448
a1	4.106	20.07414	-90.4459
a3	6.13	20.65055	-90.447
a4	8.571	20.71764	-90.4467
a5	6.625	20.71297	-90.4495
a6	3.585	20.70915	-90.4505
a7	6.622	20.69031	-90.4533