

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Análisis batimétrico en las costas caribeñas de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Omar Ricardo
Barrios Miranda para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



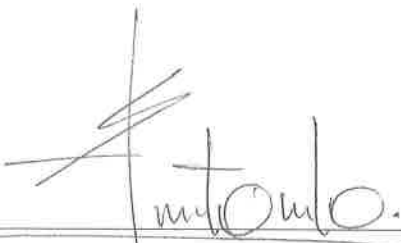
Análisis batimétrico en las costas caribeñas de Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Omar Ricardo
Barrios Miranda para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Civil

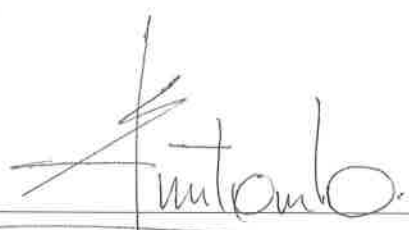
Guatemala,

2025

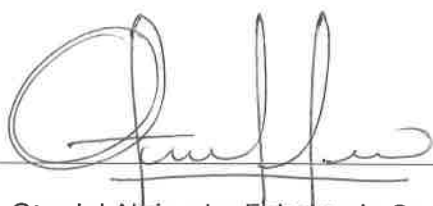
V.ºB.º:

(f) 
Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

(f) 
M. Sc. Diego Josué Incer Nuñez

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio del 2025

CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE ACRÓNIMOS	VIII
RESUMEN	IX
Abstract	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	2
3. JUSTIFICACIÓN	3
4. IMPORTANCIA	4
5. OBJETIVOS	5
5.1 Objetivo general	5
5.2 Objetivos específicos	5
6. MARCO TEÓRICO	6
6.1 Zona de estudio	6
6.1.1 Hidrología	6
6.1.2 Clima	6
6.1.3 Fisiografía	7
6.2 SIG	7
6.2.1 Tipos de información en SIG	7
6.2.2 Tipo de capas	8
6.2.3 Posicionamiento	8
6.2.4 Generación del contenido por el usuario	9
6.2.5 Difusión de datos	9
6.2.6 Análisis e interacción	10
6.3 Topografía	10
6.3.1 Batimetría	10
6.3.2 Aplicaciones de la Batimetría	11
6.3.3 Métodos Batimétricos	13
6.4 Sistema de referencia de coordenadas	17
6.4.1 Sistema de coordenadas geográficas	17
6.4.2 Sistema de coordenadas proyectadas	17

6.4.3	UTM	18
6.4.4	GTM	18
6.5	Cartografía.....	19
6.5.1	Elementos en un mapa	19
6.6	Programas y herramientas	19
6.6.1	QGIS.....	19
6.6.2	HYPACK y HYSWEEP	20
6.6.3	SEAPATH 130	20
6.6.4	EM 2040P.....	21
6.7	Comercio marítimo.....	21
6.7.1	Embarcaciones por carga	21
6.7.2	Embarcaciones por tamaño.....	22
6.7.3	Contaminación de buques.....	23
6.8	Navegación marítima.....	23
6.9	Puertos marítimos.....	24
6.9.1	Puertos de Guatemala	25
6.10	Marco legal.....	26
6.10.1	Ordenamiento jurídico en Guatemala	26
6.10.2	Las normas superiores del Estado	26
6.10.3	Convenios internacionales.....	27
6.10.4	Legislación ordinaria	27
6.10.5	Normas reglamentarias	28
6.10.6	Otras fuentes.....	29
7.	METODOLOGÍA	30
7.1	Ubicación de la zona de estudio	30
7.2	Levantamiento.....	30
7.2.1	Equipo	30
7.2.2	Recorrido	32
7.3	Procesamiento de datos	33
7.3.1	HYPACK y HYSWEEP	33
7.3.2	QGIS.....	33
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
9.	CONCLUSIONES	38
10.	RECOMENDACIONES	39
11.	BIBLIOGRAFÍA	40
12.	APÉNDICES.....	44

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Tipo de capas en sistemas GIS	8
2	Componentes del sistema Seapath 130 para navegación	20
3	Componentes de ecosonda multihaz EM 2040P.....	21
4	Instalaciones de Puerto Quetzal.....	25
5	Instalaciones portuarias de EMPORNAC.....	25

LISTA DE FIGURAS

Ilustración	Página
1 Carta Náutica - Bahía de Amatique.	2
2 Mapa de Guatemala.	6
3 Buque para dragado.....	12
4 Método LiDAR por medio aéreo.....	14
5 Comparación entre método multihaz y el método monohaz.....	15
6 Unidad de procesamiento EM 2040P.	21
7 Buque petrolero <i>Glenda Melissa</i>	22
8 Muelle de Puerto Barrios.	25
9 Ubicación del levantamiento hidrográfico.	30
10 Calibración del Seapath 130.	30
11 Medición de la velocidad del sonido en el agua.	31
12 Mareógrafo utilizado para el levantamiento	32
13 Calibración por medio de HYSWEEP.....	32
14 Función de texto delimitado.	33
15 Visualización previa del resultado final	35
16 Dársena Norte. a) Perfil topográfico; b) pendiente.....	36
17 Dársena Sur. a) Perfil topográfico; b) pendiente	37
18 Anexo 1 - Radar listo de Seapath.....	44
19 Anexo 2 - Planeamiento de líneas en HYPACK.	44
20 Anexo 3 - Estatus del levantamiento	45
21 Anexo 4 - Embarcación en Hypack. Obsérvese que la embarcación está fuera del rango del plan de líneas	45
22 Anexo 5 - Monitoreo de levantamiento	46
23 Anexo 6 - Lancha hidrográfica atracada	46
24 Anexo 7 - Dispositivo principal del DIGIBAR PRO	47
25 Anexo 8 - Sensor del mareógrafo. Ubicado en Puerto Santo Tomás de Castilla.....	47
26 Anexo 9 - Datasheet de multihaz EM 2040P	48
27 Anexo 10 - Datasheet de Seapath 130	48
28 Anexo 11 - TideGauge Valveport.....	49

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Acrónimo	Español	Inglés
EMPORNAC	Empresa Portuaria Nacional de Santo Tomás de Castilla	
GEE	Google Earth Engine	Google Earth Engine
GNSS	Sistema Satelital de Navegación Global	Global Navigation Satellite System
GPS	Sistema de Posicionamiento Global	Global Positioning System
GTM	Transversal de Mercator de Guatemala	Guatemala Transverse Mercator
INSIVUMEH	Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología	
LiDAR		Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
NGA	Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial	National Geospatial-Intelligence Agency
OHI	Organización Hidrográfica Internacional	International Hydrographic Organization
OMI	Organización Marítima Internacional	International Maritime Organization
QGIS	Quantum GIS	Quantum GIS
SIG	Sistemas de Información Geográfica	Geographic Information Systems
UTM	Universal Transversal de Mercator	Universal Transverse Mercator
WGS-84	Sistema Geodésico Mundial 1984	World Geodetic System 1984
ZEE	Zona económica exclusiva	Exclusive economic zone
ZMC	Zona marino-costera	

RESUMEN

La República de Guatemala, ubicada en la región norte de Centroamérica, se ve rodeado de dos océanos: el Pacífico y el Atlántico. En el caso del Atlántico, Guatemala posee dos puertos funcionales en la Bahía de Amatique, Izabal: Puerto Barrios y Puerto Santo Tomás de Castilla. No obstante, el bajo nivel de profundidad evita que entren los buques más grandes, por lo que la actividad comercial se ve limitada. Asimismo, la capacidad limitada de los puertos para albergar embarcaciones aumenta el tiempo de espera y descarga. Se tiene como objetivo realizar un estudio batimétrico en las costas caribeñas de Guatemala. Los puntos de mayor interés son los puertos ubicados en la Bahía de Amatique: Santo Tomás de Castilla y Puerto Barrios. La duración del estudio dependerá del tráfico aduanero, pues si se desean analizar los muelles entonces no debe de haber ninguna embarcación que este importando o exportando productos. La primera fase del trabajo consiste en identificación del área de estudio junto al análisis batimétrico in situ. La recolección de datos será por medio de una lancha hidrográfica, que posee un ecosonda multihaz para medir la profundidad. La lancha posee un sistema de navegación satelital para ubicar la posición geográfica. El sistema de coordenadas a utilizar es el UTM (Universal Transverse Mercator), específicamente en la zona UTM 16N, donde se encuentra la Bahía. Al obtener los datos, estos son procesados en dos programas distintos. Primero, se hacen correcciones en HYPACK, un programa especializado para levantamientos batimétricos. Estas correcciones están relacionadas con la velocidad del sonido y el cambio de la marea. El segundo programa es QGIS, un software que analiza información geoespacial. Aquí se importarán los datos para analizar las profundidades del suelo oceánico, la ubicación geográfica y las curvas de nivel. Los resultados se muestran en un mapa cartográfico, que contiene todas las características mencionadas.

Abstract

The Republic of Guatemala, located in the northern part of Central America, is surrounded by two oceans: Pacific Ocean and the Atlantic Ocean. In the case of the Atlantic Ocean, Guatemala possesses two functional maritime ports in Bahía de Amatique: Puerto Barrios and Puerto Santo Tomás de Castilla. However, the low depth level in the area prevents the entry to the biggest ships, causing the commercial activity to be limited. Moreover, the limited capacity to harbor ships increases the time for waiting and unloading the material. The present investigation has the main objective to realize bathymetric studies in the Caribbean coasts of Guatemala. Mainly, it focuses on areas not previously analyzed. These areas remain unstudied due to the lack of structures or points of interest, whether they are public or privately owned. This lack of interest is the main reason why a lot of the coastal areas of Guatemala remain neglected during the last years. One of the main obstacles during the investigation is to map areas without further knowledge. The first phase consists of the identification of the study area. The recollection of data will be through a hydrographic boat, where a multibeam echosounder is used to calculate the depth of the ocean floor. The hydrographic boat has a navigational system to locate the geographic position. The coordinate system used in the experiment is UTM (Universal Transverse Mercator); specifically, in the UTM 16N zone. After obtaining the data, these are processed through two *different* programs. First, the corrections are done in HYPACK, a software made for bathymetric studies. These corrections are based on the sound speed and the tide change. The second program is QGIS, a GIS software. The new data will be imported to analyze the water depth, the location and the contour lines. The result will be a cartographic map that shows all previously mentioned characteristics.

1. INTRODUCCIÓN

El puerto ha sido y sigue siendo un factor transcendental en el desarrollo de las civilizaciones. A partir de la necesidad, los ingenieros se han enfocado en la construcción y explotación de infraestructuras portuarias. Con los avances tecnológicos, se crean nuevos enfoques y actividades que mejoran y sirven de base para la economía de los países (Chapapría, 2014).

No obstante, la navegación siempre ha sido un proceso arduo y tedioso. Esto se debe a la falta de puntos de referencias en mar abierto y el cambio constante del oleaje cerca de las costas. Por lo que, a lo largo de la historia, se han desarrollado técnicas para conocer mejor el relieve marítimo y facilitar la navegación de los buques. A la disciplina encargada de medir y estudiar el suelo oceánico se le conoce como batimetría (National Geospatial-Intelligence Agency, 2018).

Los puertos marítimos en Guatemala se encargan de recibir una variedad de buques. Gracias a la ubicación geográfica, es capaz de recibir bienes por medio del Océano Pacífico y el Océano Atlántico, convirtiéndolo en un país atractivo para compañías extranjeras. Incluso se goza de un extenso territorio marítimo, por lo que existen muchas oportunidades para las actividades económicas.

Es importante que los puertos hagan levantamientos hidrográficos en la cercanía de sus costas, ya que los niveles de profundidad pueden cambiar en poco tiempo. De lo contrario, esto afectaría la logística de los puertos, y a largo plazo, la economía del país.

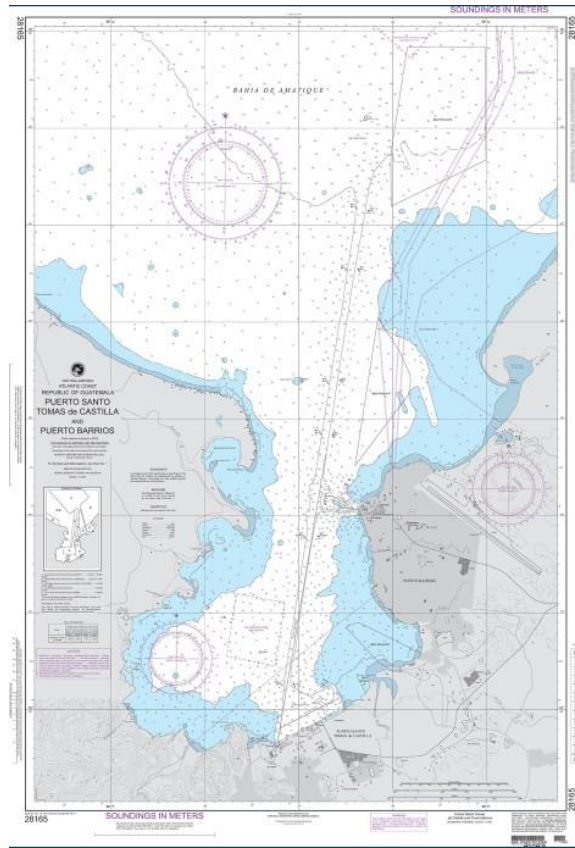
En la Bahía de Amatique se encuentran dos puertos: el Puerto Santo Tomás de Castilla y la Terminal Ferroviaria Puerto Barrios. Ambos puertos tienen la capacidad de recibir entre 4 a 5 buques. La Bahía de Amatique resalta por tener una profundidad de alrededor de 10 m, menor al calado de buques de gran tamaño. Un ejemplo son los buques Panamax, cuyo calado tiende ser de 12 m. Si se desea realizar un dragado, primero se tendría que organizar un levantamiento hidrográfico. Es ahí donde entra la batimetría.

Existen instituciones gubernamentales encargadas de hacer levantamientos batimétricos en conjunto a los puertos marítimos de cada país. Sin embargo, esta información no está disponible para el público. Si bien en algunos casos se puede obtener la información, el proceso para obtenerla no es tan sencillo. Asimismo, existen empresas privadas especializadas en este campo, pero estas y sus clientes suelen quedarse con los resultados, a menos que ellos mismos deseen que sean públicos.

Se desea que esta investigación forme un interés en los estudios hidrográficos en las costas. En Guatemala, las aplicaciones de la batimetría son casi nulas, especialmente en las costas. Esto puede solucionarse con un incremento de demanda e interés. Además, se aprovecharía el potencial de las zonas costeras que pertenecen al país, como es el caso de las costas caribeñas.

2. ANTECEDENTES

Figura 1. Carta Náutica - Bahía de Amatique



Nota: NGA, 2010.

Conocer sobre previos levantamientos es una tarea muy complicada. Existen varios mapas, cartas y planos que están disponibles al público de manera sencilla. La mayoría de esta información es respecto a lugares con un tráfico grande de comercio, lo cual no sucede con Guatemala. Al no ser una ubicación de alta importancia, no existe mucho incentivo para que individuos o entes deseen efectuar un levantamiento hidrográfico. Existen empresas que ejecutan levantamientos hidrográficos, ofreciendo servicios a clientes que desean conocer la topografía del suelo de un cuerpo de agua. Sin embargo, esta información suele ser privada, siendo los clientes y la propia empresa los únicos con acceso a dicha información.

La Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos de América público una carta náutica que muestra la zona abarcada por el Puerto Santo Tomás de Castilla y la Terminal Ferroviaria Puerto Barrios. En la carta, se puede visualizar la profundidad del suelo marítimo de cada uno de los puertos. En Puerto Barrios, la profundidad cerca del muelle es alrededor de 9 metros, mientras que en Santo Tomás de Castilla la profundidad es alrededor de 11 metros. En el caso del área de navegación, la profundidad suele llegar a 10 metros. Si bien es bastante amplio para permitir la navegación de los buques en la Bahía, sigue siendo menor a lo permisible para buques de mayor tamaño. Además de este estudio, no se ha realizado otro similar en los últimos años (NGA, 2010).

3. JUSTIFICACIÓN

La batimetría es necesaria para comprender como los cuerpos de agua interactúan entre ellos, mientras los mismo influyen en el flujo del agua oceánica. Además, la batimetría sirve de apoyo para entender la propagación de eventos sísmicos submarinos. Estos eventos pueden afectar las actividades humanas y la vida marina. Las áreas más afectadas suelen ser las zonas costeras gracias a varios factores humanos (Traganos et al., 2018).

A pesar de que el océano cubre 71 % de la Tierra, la profundidad del océano que ha sido determinada por observación directa es menor al 18 %. Pero en los últimos años se ha reconocido la importancia de mapear el suelo oceánico, hasta el punto de haber iniciativas internacionales en desarrollo. Las mayores partes están afuera de la jurisdicción nacional, donde autoridades internacionales controlan las actividades económicas y de investigación.

La mayoría de los países poseen mucha información respecto a la batimetría de los cuerpos de agua que poseen, pero es muy difícil acceder a esta información. Existen países que permiten el acceso sin restricción, pero estos son la excepción y no la norma. Incluso la información que es accesible no está disponible de una manera sencilla, sino que se debe solicitar para obtenerla. Todas estas restricciones limitan el potencial que los estudios de batimetría podrían brindar a diferentes áreas (Wolfl et al., 2019).

Uno de los aspectos más importantes son las líneas costeras. Estas son investigadas por varias razones: erosión e inundaciones, manejo de desastres, desarrollo sostenible, entre otros. La información de las costas y el cambio que sufren es esencial para la gestión ambiental de las zonas costeras. Conforme surgieron avances tecnológicos, también se crearon nuevos métodos para generar mapas de las costas. Muchas de estas no consideran los datos batimétricos, pero los que sí toman en cuenta los datos proveen un mejor entendimiento de la evolución geomórfica (Yeu et al., 2018).

Los puertos poseen varios puntos de interés, tales como canales, atracaderos y fondeaderos. Estos suelen sufrir de sedimentación, lo que reduce la cantidad de agua disponible para que los barcos se trasladen. Esto es de suma importancia, ya que los puertos operan con un espacio mínimo que un barco debe mantener mientras transita el puerto. Para realizar una rutina de mantenimiento de dragado, se debe realizar estudios batimétricos para estimar los volúmenes de sedimentaciones acumulados en los canales de navegación (El-Hattab, 2014).

La investigación se llevará a cabo en el litoral del Caribe, en las costas del departamento de Izabal. El análisis batimétrico permite conocer el relieve oceánico de la zona. Si bien ya existen algunos mapas o cartas náuticas, las que están disponibles al público son consideradas obsoletas por su antigüedad, datando a los años ochenta. Se ha considerado el uso de imágenes satelitales. Sin embargo, la tecnología disponible solo puede describir la profundidad del suelo oceánico en grandes rangos, por lo que no es útil para aguas someras.

Guatemala forma parte de la Organización Hidrográfica Internacional, cuyo objetivo es asegurarse que los cuerpos de agua sean seguros y navegables. Por lo tanto, es de suma importancia que Guatemala cumpla con estos objetivos. Primero demostraría que cumple con los estándares internacionales y asegura a los puertos y embarcaciones la seguridad de sus cuerpos de agua. Segundo, las instituciones gubernamentales y las empresas portuarias pueden utilizar esta información para mejorar aspectos de infraestructura, logística o legales.

4. IMPORTANCIA

El resultado será un mapa batimétrico que describa las características del relieve oceánico, principalmente las profundidades de las costas del Caribe. Esto puede resultar de mucha ayuda para varios grupos interesados en esta zona. Los centros de investigación pueden beneficiarse de esta información. Para aquellos que desean realizar estudios sobre la flora y fauna de la zona, las rutas trazadas les facilitarían localizar que ubicaciones más accesibles para su objeto de estudio. Otros se enfocan en la contaminación de los cuerpos de agua, por lo que pueden ubicar donde se descargan los desechos hacia el mar. Existen varios enfoques, pero estos son algunos de los que se pueden apoyar de este estudio.

En otros países, las ciudades portuarias se caracterizan por ser de las más importantes en sus propios países. Después de todo, la mayor parte de los bienes económicos se trasladan por medio de buques. Esto ocasiona que se invierta bastante en estas regiones, e incluso gozan de beneficios especiales. Guatemala tiene bastante potencial para transformar sus ciudades portuarias en ubicaciones que atraigan a grandes empresas y ayude a crecer la economía del país. Si bien algunas de ellas no están en mal estado, no están aprovechando su potencial al máximo. El reconocimiento de las costas oceánicas es una pequeña parte de todo un proceso logístico, pero es uno de los puntos por los cuales se puede empezar para realizar cambios y mejoras.

La ingeniería civil abarca bastantes especialidades, como estructuras, geotecnia, planificación urbana e hidrología, entre muchas otras. Sin embargo, los enfoques en Guatemala se ven limitados al territorio nacional. Con los frutos de esta investigación, se espera que se cree un interés en el ámbito marino, pues este ofrece grandes y nuevas oportunidades para el país. Incluso puede abrir el camino para la existencia de una especialización e ingeniería marítima en Guatemala.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

- Desarrollar un estudio batimétrico en el área interna de la Bahía de Amatique, en el departamento de Izabal.

5.2. Objetivos específicos

- Definir los requisitos para la realización de un levantamiento batimétrico en la Bahía de Amatique, Izabal para obtener datos precisos respecto al suelo oceánico.
- Procesar los datos obtenidos del levantamiento para la producción de un mapa que detalle el área estudiada.
- Generar un mapa cartográfico de las curvas de nivel marítimas y perfiles del suelo marítimo.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Zona de estudio

La república de Guatemala se encuentra en la región norte de América Central. Los países que limitan a la república son: México al norte y oeste, Belice al noreste, Honduras y El Salvador al sureste. También se ve delimitado por el Océano Pacífico al sur y el Océano Atlántico (Mar Caribe) al noreste (Dendinger, 2004).

Figura 2. Mapa de Guatemala



La extensión territorial marítima de Guatemala es aproximadamente de 120,229 km², lo que representa 53 % de extensión total del país. Se estima que la litoral del Pacífica abarca 254 km, mientras que la del Caribe abarca 148 km. La zona marino-costera (ZMC) está comprendida entre los límites de la zona económica exclusiva (ZEE) y una línea base definida arbitrariamente. La zona abarca los ecosistemas de agua dulce influidos por mareas y alrededor de 19 municipios y siete departamentos (Ramírez & Ortiz, 2019).

6.1.1. Hidrología. En la vertiente del Mar Caribe, los ríos que desembocan en el Golfo de México son descritos como extensos y profundos. En esta vertiente, las cuencas son caracterizadas por tener pendientes profundas en las partes altas, las cuales disminuyen conforme al gradiente topográfico. La vertiente del Caribe se conforma por 10 cuencas que aportan diferentes porcentajes de descarga al Atlántico. La misma vertiente posee los ríos más caudalosos del país, entre los cuales destaca el Río Motagua, con 486.55 km de recorrido (López, 2015).

6.1.2. Clima. El clima en esta región es lluvioso – cálido, con dos temporadas climáticas. El período lluvioso abarca de junio a septiembre, mientras que el periodo seco abarca de octubre a mayo. Los vientos dominantes son los vientos alisios con dirección noreste. El aire suele ser húmedo. Durante las temporadas, el aire suele ser húmedo. Se registran temperaturas entre 21-27°C (Yáñez et al., 1999).

Uno de los grandes problemas en esta región es la presencia de huracanes. Estos poseen fuertes lluvias, tormentas eléctricas y vientos con velocidades que sobrepasan los 199 km/h. Los huracanes se forman en el este del océano Atlántico y suelen ocurrir entre los meses de junio y noviembre (Prevost, 2010).

6.1.3. Fisiografía. El lecho marino se ve marcado por la Fosa de las Islas Caimán, que se extiende desde el ángulo interior del golfo, la Bahía de Amatique, hasta el sur de la isla de Cuba, alcanzando una profundidad máxima de 7.686 metros. En el resto del golfo, la profundidad máxima es de unos 30 metros (Terrasa, 2022).

6.2. SIG

Un sistema de información geográfico (SIG) es un sistema informático que puede organizar interrelaciones complejas entre diferentes niveles de información por medio de la obtención, análisis, procesamiento, almacenaje y presentación de datos espaciales e imágenes disponibles por diferentes medios. Integra hardware, software y datos para capturar, manejar, analizar y presentar todo tipo de información geográfica. A partir del programa, se pueden crear mapas desde base de datos y la información puede ser referenciada en estos mapas. La operación de cualquier SIG consiste en cinco fases centrales:

- **Adquisición de datos:** recopilación de información relevante, tanto espacial como no espacial, de diferentes fuentes. Los datos de información geográfica pueden ser obtenidos de manera análoga o de forma digital.
- **Preprocesamiento:** la conversión de información recopilada en un formato adecuado para introducción. Esta parte se enfoca en la digitalización de mapas, la grabación de información de atributos en una base de datos y conversión de datos.
- **Manejo de la información:** las bases de datos manejan la información geográfica de manera tabular, lo que permite modificar fácilmente el contenido de estas bases en futuras ocasiones.
- **Manipulación y análisis:** las interfaces gráficas dan la oportunidad de manipular la información de acuerdo con los requisitos de análisis. Gracias a las previas operaciones, es posible obtener una visualización de los patrones espaciales de cualquier manera.
- **Generación del producto:** la última fase que consiste en la generación del producto deseado. El producto variará de acuerdo con las necesidades del usuario (Pandey & Pathak, 2014).

6.2.1. Tipos de información en SIG. Al igual que la Cartografía, los datos de SIG se pueden resumir en dos tipos de componentes:

- **Componente espacial:** describe la ubicación geográfica de objetos o fenómenos, la cual debe ser descrita de una única manera. Para realizar esto, se usan los sistemas de coordenadas o los sistemas georreferenciados.
- **Componente de atributo:** también referido como no espacial, se refiere a las propiedades de los entes espaciales. En vez de indicar información relacionada con la ubicación, estos describen las características de los componentes espaciales. Estas características pueden ser cuantitativas o cualitativas.

Para medir estos datos y compararlos entre ellos, se utilizan ciertos niveles de medición. Los niveles para la medición de datos geográficos se usan de acuerdo con la información clasificada, el objetivo de esta información y la escala de observación. Estos niveles son:

- Nominal: medición de datos que se representa por medio de nombres o descripciones. El sistema puede realizar declaraciones para nombrar un objeto, pero no permite comparaciones directas entre dos o más objetos.
- Ordinal: escala que permite comparar objetos, ocasionando que el nivel de medición sea más preciso. Sin embargo, la comparación se basa solamente en un conjunto único de circunstancias.
- Por intervalos: medición en la cual se asignan números a los objetos medidos. Al igual que el nivel ordinal, los datos se pueden comparar e incluso se puede estimar las diferencias de manera más precisa.
- Por relación: es la única medición de datos que permite realizar una comparación directa entre dos variables espaciales. Este incluye un punto de partida absoluto y producir relaciones entre valores.

(DeMers, 2008).

6.2.2. Tipo de capas. En SIG, se define a una capa como la colección o representación visual de datos geográficos. Las capas pueden ser puntos, líneas o polígonos. Existen diferentes tipos de capas.

Cuadro 1. Tipo de capas en sistemas GIS

Tipo de capa	Función
Vectorial	Representa características geográficas por medio de puntos, líneas y polígonos.
Ráster	La información es presentada en un modelo cuadrícula de celdas. Se usa para información de datos continuos.
Texto delimitado	Se genera a partir de información de texto organizada en columnas y separadas por delimitadores.
XYZ	Conecta a servicios de mapa web. Son pre-renderizados; no se pueden editar.

Nota: Graser, 2016.

El avance de las tecnologías de la información se ha enfocado en ciertos aspectos:

6.2.3. Posicionamiento. El Sistema Satelital de Navegación Global (GNSS, por sus siglas en inglés) es uno de los sistemas más importantes para la Geodesia Espacial. Este engloba todos los sistemas de navegación existentes, tales como el GPS, GLONASS y GALILEO. Existen otros más, pero estos son los más utilizados en la actualidad. Estos sistemas proporcionan un posicionamiento geoespacial según la distancia medida con al menos cuatro satélites simultáneamente por medio de un oscilador. Este genera ondas portadoras, las cuales llevan información binaria que se desea transmitir (Gracia & Santos, 2021).

Previamente, la capacidad de detectar y establecer el posicionamiento de un objeto solo era admisible para ciertos dispositivos. Conforme la tecnología ha avanzado, estos sistemas han podido ser

integrados dentro de diferentes dispositivos, tales como teléfonos celulares o vehículos. Esto abre la oportunidad de que cualquiera pueda obtener información geográfica en tiempo real (Goodchild, 2009).

6.2.3.1. Disrupción de GNSS. Los GNSS operan en ciertas frecuencias de radio para realizar su propósito. Sin embargo, como cualquier señal, puede haber ciertas disrupciones que deterioran el rendimiento del receptor. A continuación, se describen las cuatro clases de disrupciones que pueden ocurrir.

La primera clase es la interferencia. Esta ocurre por señales de radiofrecuencia de cualquier fuente no deseada que no sea rechazada por el receptor. Esta puede ser intencional o no intencional. La interferencia usualmente es clasificada como banda ancha o banda estrecha, dependiendo del ancho de banda de la interferencia en relación al ancho de banda de la señal deseada.

La segunda clase es el centelleo ionosférico. Esto sucede por las irregularidades en la capa ionosférica de la atmósfera terrestre, lo que ocasiona el desvanecimiento rápido de los niveles de potencia de las señales recibidas. Entonces, el receptor es incapaz de ubicar satélites visibles por cortos períodos de tiempo.

La tercera clase es el bloqueo de señales. Esto ocurre cuando las ondas electromagnéticas encuentran un objeto físico en la vía directa entre la antena transmisora y la antena receptora. La vegetación, el terreno y las estructuras hechas por el hombre ocasionan este tipo de disrupción.

La última clase es el multipath o ruta múltiple. Esta es la recepción de múltiples réplicas reflejadas o difractadas de la señal deseada. Ya que la trayectoria viajada por la ruta múltiple es más larga que la trayectoria directa, las llegadas son retrasadas con relación a la trayectoria directa (Kaplan & Hegarty, 2017).

6.2.4. Generación del contenido por el usuario. Uno de los desarrollos más significativos ha sido la generación de contenido por el usuario. Este proceso consiste en permitir a los usuarios crear y subir información por medio del Internet. A diferencia de otros avances, las personas pueden producir grandes cantidades de información sin tomar en cuenta de su habilidad o experiencia. Todo este contenido está disponible al público, el cual varía desde datos de redes sociales hasta información sobre ubicación por medio de varias aplicaciones especializadas (Goodchild, 2009).

6.2.5. Difusión de datos. Anteriormente, se utilizaban mapas de papel, globos terráqueos y Atlas para la difusión de información geográfica recompilada a través de los años. No obstante, estos medios tradicionales resultaban demasiado caros para su producción y traslado. Además, eran difíciles de catalogar y almacenar. Si bien surgieron soluciones, tales como librerías especializadas, la introducción de otros medios solo dificultó los problemas ya existentes. Sin embargo, la introducción de medios compactos, como los CDs o DVDs, facilitaron el almacenamiento de información. Pero fue el nacimiento de la Internet lo que atrajo el interés para la difusión de información (Goodchild, 2009).

Los avances tecnológicos en computadoras y la reducción de costos de programas especializados causaron que incrementara el interés por programas de indicadores. Sin embargo, el interés del público para participar en programas comunitarios de sistemas de información geográfica no incremento y se vio limitado a usuarios sofisticados.

En cambio, la expansión de la Internet provee soluciones para mayor parte de los problemas.

- **Costos:** en los últimos años, el bajo costo de mantener información en un servidor ha permitido que los dominios y los sitios webs sean accesibles al público. Además, la capacidad de almacenamiento ha aumentado debido a la fuerte demanda. Hoy en día, el acceso a un proveedor de servicio de Internet se ha vuelto accesible al público, lo que permite al ciudadano común y corriente la capacidad de acceder a grandes fuentes de información.
- **Suministro y provisión de datos:** el Internet supera a otros medios de comunicación gracias a su habilidad de transmitir grandes cantidades de información en tan poco tiempo. Es capaz de proveer textos, cartas, mapas, gráficas, audio y vídeos. Una vez la información se encuentre disponible en un servidor, múltiples usuarios pueden acceder a estudiar esta información. Incluso existe la oportunidad de ver los cambios de información en tiempo real. Su accesibilidad es tan grande que permite obtener la información a cualquier hora del día, exceptuando durante tiempos de mantenimiento.
- **Interactividad:** existen varias tecnologías que fomentan la interactividad del usuario. Los usuarios pueden personalizar lo que han hecho sin la necesidad de la ayuda de un experto. A pesar de eso, se requiere que los usuarios tengan un básico entrenamiento y conocimiento en el uso de computadoras, estadísticas y mapeo.
- **Conectividad:** un sitio web puede expandir el almacenamiento de su información al simplemente insertar enlaces a sitios externos. Esto permite que los proveedores, tanto SIG como aquellos ajenos a estos sistemas, puedan difundir información relevante a la planeación y desarrollo de programas (Chua & Wong, 2002).

6.2.6. Análisis e interacción. Los SIGs poseen varias formas de manipulación y análisis. Algunos se enfocan en aplicaciones particulares, mientras que otros enfatizan ciertos tipos de información geográfica. Incluso hay algunos que están adaptados a la simulación dinámica de los procesos terrestres. No obstante, uno de los mayores enfoques generales ha sido sobre la interfaz del usuario. Muchas herramientas ayudan a examinar los datos obtenidos desde múltiples perspectivas. Una de las grandes dificultades aún presentes es la representación espacial en 3D y la captura de fenómenos continuos en la superficie terrestre (Goodchild, 2009).

6.3. Topografía

La topografía es la disciplina encargada de estudiar las formas del relieve de la superficie terrestre. Abarca las características de la superficie de la Tierra, imágenes 2D y 3D del terreno, identificación de ciertas formas de relieve, la medición y orientación terrestre (Markoski, 2018).

6.3.1. Batimetría. Si bien la topografía se encarga de mapear la superficie terrestre, existe un campo especializado para el reconocimiento del relieve en cuerpos de agua. A este campo se le conoce como batimetría. Este campo abarca desde levantamientos en ríos hasta mediciones en mar abierto. Junto a la topografía, la batimetría del océano tiene influencia en los procesos geofísicos, químicos e incluso biológicos de la Tierra. Aunque las velocidades en las que ocurren los procesos de sedimentación y erosión son menores en el agua, los levantamientos batimétricos muestran la historia morfológica y geológica del suelo oceánico. Además, se ha demostrado que el relieve oceánico funciona como una conexión entre la litosfera y la hidrosfera (Chakraborty & Fernandes, 2012).

6.3.1.1. Orígenes. El interés por conocer las profundidades de los cuerpos acuáticos remota al Antiguo Egipto. Durante esa época, los egipcios ataban una piedra a una cuerda, para luego ser arrojada al agua. Entonces, determinaban la profundidad según el largo de la cuerda sumergida. Este método fue adoptado por varias civilizaciones. No obstante, existían varias desventajas. Primero, no se tomaba en cuenta las corrientes de agua que podrían jalar la cuerda, así como el barco. Segundo, solo se podía determinar la profundidad en un solo punto. (Gracia & Santos, 2021).

Esta técnica fue usada hasta el siglo XIX. Sir William Thomson inventó la máquina de sondeo de Kelvite. En vez de utilizar una cuerda corriente, esta utilizaba una cuerda de acero terminando en un plomo, lo que permitía bajarla más rápido al suelo oceánico. Además, podía ser utilizada mientras el barco estaba en movimiento, lo que ahorra tiempo y esfuerzo. A pesar de eso, siempre presentaba la dificultad que solo podría medirse un solo punto a la vez (Mayer, 2016).

6.3.1.2. Fuentes de información. El conocimiento de la forma del suelo oceánico es crucial para los humanos. En una era de degradación ambiental a escala mundial, los datos batimétricos juegan un rol crucial en el uso y manejo de los océanos. Existen varias fuentes de datos batimétricos, pero una de las mayores de gran calidad es proveída por instituciones gubernamentales y de investigación. Sin embargo, esta información no es accesible para el público por distintas razones. En ocasiones, esta información se vuelve pública por tiempo limitado debido a acuerdos entre instituciones.

Existe otra fuente de información que no ha sido aprovechada del todo, la cual es recolectada por empresas especializadas en levantamientos topográficos e hidrográficos. A diferencia de la información recolectada por entidades gubernamentales, los datos recolectados por estas empresas pertenecen a los clientes que lo solicitan. Esta información queda bajo el uso estricto del cliente, por lo que no es pública a menos que él mismo lo desee así. Las compañías o los clientes tienden a guardar esta información ya que refleja el lado financiero de la recolección, considerándola como propiedad intelectual. También existen el problema de la seguridad y confidencialidad, por lo que compartir la información es un tema bastante sensible (Wolfl et al., 2019).

6.3.2. Aplicaciones de la Batimetría

6.3.2.1. Mantenimiento portuario. Los puertos son vistos como zonas de amortiguamiento y protección para los barcos, ya que el movimiento de las olas puede afectar las operaciones de carga y descarga. Las acciones de estas también mueven los sedimentos en las zonas portuarias, lo cual ocasiona que la profundidad conocida ya no sea la misma. El conocimiento del calado libre de los puertos es esencial para un adecuado mantenimiento. Para resolver esta situación, se deben de realizar estudios batimétricos del área para cumplir con el mantenimiento adecuado y las operaciones continuas del puerto.

Si bien los estudios batimétricos pueden ser costosos, las repercusiones económicas por la falta de información pueden ser muy severas. Esto se debe a que los barcos tienen una profundidad máxima, por lo que su movimiento puede ser obstruido por los sedimentos del suelo oceánico. Incluso si no existe mayor peligro, el conocimiento de la variación de datos es necesario para que la información este actualizada. Los estudios son conducidos por medio de diferentes técnicas, entre las que resulta los sonares multihaz y el sistema LiDAR. Ambos métodos tienen la ventaja de aprovechar las áreas pequeñas de los puertos, así como proveer resultados de alta resolución en aguas someras (Mateo-Pérez et al., 2020).

6.3.2.2. Operaciones de dragado. En los puertos, existen diferentes infraestructuras como los canales, los atracaderos o fondeaderos. Estos suelen sufrir de colmatación, lo que reduce la profundidad del agua para que los barcos puedan navegar seguramente. Cuando el nivel de profundidad no cumple con las mínimas expectativas, los puertos están obligados a realizar un dragado de los sedimentos. Para comprender la gravedad y la extensión de la situación, se debe proceder con estudios de batimetría. Además de medir la profundidad del agua, los datos batimétricos también reportan un estimado del volumen depositado en las áreas a trabajar. Si bien se podría realizar el dragado sin la necesidad de determinar o modelar el suelo oceánico, puede suceder que las operaciones de dragado excaven de más. Esto presentaría un costo mayor al de un estudio batimétrico, en especial si solo se desea los sedimentos que están contaminados (El-Hattab, 2014).

Figura 3. Buque para dragado.



Nota: Dexter Offshore.

6.3.2.3. Tendido de oleoductos y cables. Los oleoductos submarinos son mecanismos de tuberías importantes para proveer suministros entre la tierra y el océano. Estos son usados principalmente para transportar petróleo, gas o agua. Estos suelen estar enterrados en el suelo oceánico a cierta profundidad con el objetivo de reducir daños directos a los mecanismos. No obstante, estos siguen siendo susceptibles a la corrosión y deformación. Anteriormente, se han usado varios equipos de detección para inspeccionar los oleoductos y asegurar que estos se encuentren en óptimas condiciones para su operación (Guan et al., 2019).

Las inspecciones se han realizado por medio de varias técnicas disponibles, como buceo profesional, vehículos operados remotamente (ROVs) y equipo acústico. Los primeros dos son los más usados para evaluar las condiciones de los oleoductos. No obstante, estos presentan ciertas dificultades. La transmisión de luz por medio de agua se ve reducida en tan pocos metros, por lo los buceadores deben usar otras fuentes de luz para la inspección, que a su vez también sufren del mismo principio. En el caso de los ROVs, estos se encuentran conectados a una nave promedio de un cable. Este puede ser fácilmente influenciado por la velocidad de las corrientes.

La alternativa a estos problemas son los sistemas de batimetría multihaz. Estos sistemas logran proveer un mapa batimétrico y una imagen retrospectiva del área estudiada (Xiong et al., 2016).

6.3.2.4. Energía renovable. En los últimos años, ha incrementado la demanda de electricidad a nivel global. El consumo de combustibles fósiles comprende el 75 % de la emisión anual de gases de efecto invernadero. Debido a eso, se ha buscado alternativas con energías renovables, dando a lugar el interés para aprovechar el potencial energético de los océanos (Li et al., 2023).

Una de las fuentes de energía renovable es la energía eólica. En comparación a recursos eólicos en zonas terrestres, la presencia de vientos en ambientes marinos resulta ser más abundante. Estos son más fuertes y consistentes, además de ser menos turbulentos. Además, el transporte de turbinas de vientos hacia localidades en la costa suele ser más fácil (Nagababu et al., 2017).

Además de la energía eólica, unas de las alternativas que ha sido de interés es la energía a partir del movimiento de las olas del mar. Las olas pueden proveer energía sostenible y ampliamente disponible para los habitantes de las costas y operaciones marítimas. Los dispositivos encargados de estos se les conoce como Convertidores de Energía de Olas (WEC, por sus siglas en ingles). Para su instalación en las costas, se deben realizar estudios batimétricos que verifiquen que la fisiografía del lugar no tenga un impacto en su desempeño y que estos no sean perjudiciales (Alexandros et al., 2020).

6.3.2.5. Evaluaciones de impacto ambiental. Los ecosistemas costeros han visto cambios climáticos que el planeta ha sufrido durante las últimas décadas. El nivel del mar ha aumentado, los patrones de las tormentas cambian y la erosión costera se ha intensificado. Todos estos factores alteran y la composición y distribución del hábitat marinos, afectando actividades como la pesca y la acuicultura, las cuales dependen de información batimétrica precisa. Junto a datos recolectados sobre los efectos del cambio climático, los estudios batimétricos ayudarían a comprender las condiciones cambiantes de las áreas de estudio, así como la toma de decisiones sobre el manejo y utilización de los recursos disponibles (Mokhtar et al., 2023).

6.3.2.6. Seguridad de navegación. Existen muchas áreas costales que no han sido supervisadas por décadas y las incertidumbres de la profundidad pueden ser severas. Existen muchas operaciones que requieren de que las profundidades medidas sean certeras. Conocer sobre estas incertidumbres previene incidentes y ayuda a la hora de tomar decisiones (Hare et al., 2011).

Antes de obtener datos hidrográficos, se debe tomar en cuenta los estándares pronunciados por las organizaciones hidrográficas. Según estas, los estudios cambian de acuerdo a varios factores, por lo que se debe elegir el más adecuado para que la información recopilada sea confiable para todas las embarcaciones destinadas a traficar por el área de estudio, así como cualquier puerto cercano (Mavraeidopoulos et al., 2017).

6.3.3. Métodos Batimétricos. Los levantamientos batimétricos son métodos y procesos para medir la profundidad de los fondos acuáticos. Los diferentes levantamientos varían según los requisitos, presupuesto disponible y los recursos que están a la mano (Castro, 2021).

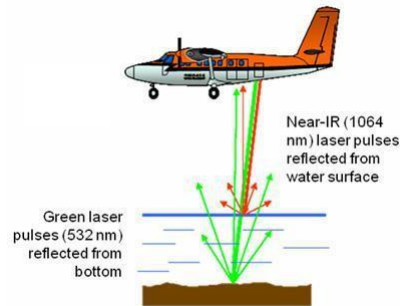
6.3.3.1. LiDAR. LiDAR es un método que utiliza la luz en forma de láseres pulsados para medir el rango de distancias hacia la tierra. Estos pulsos generan información precisa de la forma y características de la Tierra. La instrumentación consiste en un láser, un escáner y un receptor GPS. Usualmente se utilizan aviones y helicópteros para adquirir la información en áreas extensas. Se aplica tanto en la topografía como en la batimetría (Administration, 2021).

Este método fue introducido debido a una brecha de datos entre aquellos obtenidos el sonar a bordo y cámaras en zonas costeras intermareales. El sistema LiDAR es capaz de detectar hasta sesenta metros de profundidad en aguas claras, incluso pueden proveer datos batimétricos resueltos en el espectro azul y verde (Yeu et al., 2018).

Originalmente, los sistemas solían emitir longitudes de onda cerca de infrarroja. No obstante, los cuerpos de agua suelen absorber estas, por lo que se necesitaba otra alternativa. Ya que los cuerpos de agua dificultan el paso de luz, la alternativa quedo limitada entre la región espectral de

luces azules y luces verdes. En el campo, la mayoría de los sistemas utilizan un pulso verde de 532 nm (Doneus et al., 2015).

Figura 4. Método LiDAR por medio aéreo



6.3.3.2. Fotogrametría. Un dron es un vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés). Este posee una fuente de poder propia y puede volar por su cuenta o ser pilotado por una persona a distancias. La principal característica de un dron es que poseen computadoras integradas que les permite ajustar su vuelo. Además de volar, pueden cargar variedad de objetos, tales como armas o cámaras. Su versatilidad les permite ser usados para distintas aplicaciones, como es el caso de la batimetría (Spilsbury & Spilsbury, 2016),

En los últimos años, el rápido desarrollo de los UAVs ha permitido que sean usados como sistema de monitoreo en zonas terrestres y costeras, teniendo uno de los sistemas más veloces. Gracias a su tamaño, los drones pueden acceder a áreas completamente remotas o peligrosas para el usuario. Además, pueden procesar imágenes de alta resolución en un corto período de tiempo. Esto le permite al usuario ahorrar tiempo y dinero a comparación de otros métodos.

Conforme el uso de los UAVs se ha estandarizado, muchos de los investigadores han aplicado diferentes tecnologías. Algunas de estas son: perfiladores láser, fotogrametría, imágenes RGB, tecnología de lentes fluidos, recopilación de data hiperspectral y sensores multispectrales, entre otros (Rossi et al., 2020).

6.3.3.3. Imágenes satelitales. Uno de los métodos más recientes, el uso de imágenes satelitales en el campo de la batimetría sirve como alternativa a los anteriores métodos. La tecnología satelital ahora provee imágenes de alta resolución, por lo que su uso se ve más factible. Esto se debe a que este sistema no requiere de gran inversión de dinero, tiempo y energía en las regiones costeras (Mahmud & Tang, 2021).

Se ha podido crear mapas batimétricos a partir de pocas imágenes satelitales. En otros casos, es posible crear un mapa a partir de una sola imagen. No obstante, la presencia constante de nubes y olas no permite que las imágenes obtenidas sean factibles para la representación del área estudiada. Además, la profundidad obtenida de una imagen satelital puede variar de otras.

Google LCC ha proveído Google Earth Engine (GEE), un sistema de información geográfica que permite análisis de áreas específicas al usar múltiples imágenes en un corto periodo de tiempo. Otro sistema de utilidad es Amazon Web Services, lanzado por Amazon.com Inc, el cual provee análisis de imágenes satelitales en un sistema de computación en la nube. Aún así, el nivel de la marea sigue siendo un problema, aunque puede ser mitigado al obtener el nivel medio de las múltiples imágenes obtenidas (Tatsuyuki et al., 2019).

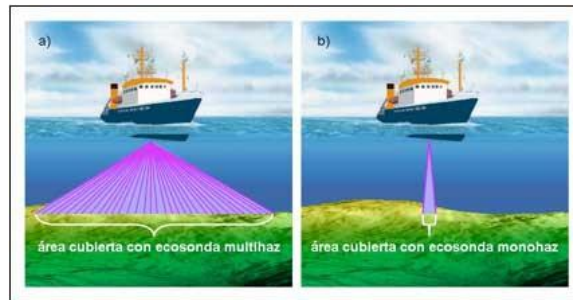
De ambos, GEE es el que más ha atraído la atención debido a sus componentes únicos. El software ofrece archivos a escala de petabyte de imágenes satelitales ópticas, siendo su acceso totalmente gratuito. Entre otras características, poseen acceso a todos los archivos de Landsat, las primeras tres misiones de Sentinel y datos de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, por sus siglas en inglés) (Traganos et al., 2018).

6.3.3.4. Sistema Monohaz. La técnica consiste en emitir un solo pulso de sonido y medir el tiempo en que viaja al suelo y es reflejado para ser detectado por el hidrófono de la embarcación. La profundidad es determinada por la mitad de tiempo del viaje multiplicada por la velocidad del sonido en agua salada (Dierssen & Theberge Jr, 2020).

Si bien este sistema es menos costoso que su contraparte multihaz, su baja densidad de muestreo requiere técnicas avanzadas de interpolación para estimar la topografía submarina. Por lo tanto, el método monohaz es usado como una medida provisional en grandes áreas (Monteys et al., 2015).

La resolución espacial de los datos batimétricos recolectados depende de tres factores: características del sensor, la profundidad del agua y el diseño de ruta de estudio. El transductor de sonda puede variar de acuerdo con las plataformas disponibles, como es el caso del ancho del haz del pulso (Arseni et al., 2016).

Figura 5. Comparación entre método multihaz y el método monohaz



6.3.3.5. Sistema Multihaz. Este sistema emite ondas en forma de abanico y reciben los ecos de las señales emitidas en sectores estrechos perpendiculares al abanico. De esta manera, se obtiene una franja del suelo oceánico en vez de solo una línea. Estos poseen la ventaja de mapear las áreas de una manera más eficiente en comparación a los sistemas monohaz. (Wolfl et al., 2019).

Los sistemas multihaz surgieron a partir de la ineficacia del sistema monohaz. El Servicio de Investigación Naval de los Estados Unidos empezó a estudiar esta tecnología durante la década de 1960. En 1976, con el desarrollo de los sistemas de computación y hardware, el primer sistema de batimetría multihaz salió a la luz: el SeaBeam, el cual tenía un rango de medición de 0.8 veces la profundidad del agua y podía procesar simultáneamente la información desde un solo punto por medio de 16 rayos a la vez.

A partir del primer sistema, los sistemas batimétricos multihaz han sido desarrollados rápidamente, desde una sola adquisición de procesamiento en tierra hasta desarrollar un conjunto de adquisición síntesis, procesamiento y visualización de datos en un solo sistema. Para adaptarse a diferentes profundidades, el ángulo y el ancho de alcance del sistema ha sido incrementado bastante, mientras que la velocidad del procesamiento de datos ha sido mejorada. Por cada pulso emitido por el transductor, docenas de valores pueden ser obtenidos.

Algunas de las ventajas son:

- Alta precisión y eficiencia: la tecnología usa una combinación de métodos de amplitud y fase y así evitar errores al usar un solo método de detección. Para los haces se centrales se aplica una detección de amplitud, mientras que se usan métodos de detección de fase para los haces del borde, Incluso algunos sistemas logran transmitir alrededor de 1000 haces, incrementando la cobertura.
- Integración y fusión de múltiples tecnologías: hoy en día, los sistemas multihaz no solo se enfocan en los dispositivos de transmisión y recepción de ondas, sino que también en la adición de un localizador de alta precisión. Esto permite obtener información clara de la posición y forma del suelo oceánico (Shi et al., 2023).

Algunos factores degradan la precisión de los resultados, tales como: la velocidad del sonido, el comportamiento del buque o la desalineación del ángulo del transductor. Si bien estos factores pueden ser corregidos durante el procesamiento de datos, el resultado final aún se ve afectado por los errores residuales. Esto afecta especialmente cuando se hacen estudios en aguas de mayor profundidad. (Zhao et al., 2017)

6.3.3.6. Función de las ecosondas. Al utilizar transductores de las ecosondas para la formación de haces, las direcciones de los haces dependen de la longitud de onda acústica utilizada. La longitud de onda es representada por la siguiente ecuación:

$$\lambda = c/f$$

Donde λ es la longitud de onda medida en metros, f es la frecuencia en hertzios y c es la velocidad del sonido en el medio en que se propaga, medido en m/s. La velocidad del sonido en un medio es influenciada por el mismo medio. Los parámetros fisicoquímicos y las condiciones del fondo marítimo afectan la velocidad. En el caso del agua de mar, el sonido es dependiente de la compresibilidad isotérmica, la relación de calores específicos a una presión y volumen constantes; y la densidad del agua. El valor promedio de la velocidad del agua es 1500 m/s, el cual es tomado en condiciones normales de agua a una temperatura de 0°C, una salinidad de 35 ppt y una presión de 76 mmHg. A pesar de eso, se estima que el valor puede estar en un intervalo de 1387 m/s y 1529 m/s (Amoroso & Parente, 2021).

Conforme la profundidad aumenta, el cambio de la velocidad del agua tiene un mayor impacto. En el caso de aguas de poca profundidad, la discrepancia entre la distribución estimada y la verdadera distribución no causa tantos problemas. Aun así, la ecosonda siempre se debe calibrar durante levantamientos hidrográficos. Para medir la velocidad del agua, se usan dos dispositivos. El primero es un perfilador de velocidad; un dispositivo de ultrasonido que funciona de manera similar a una ecosonda. La velocidad se determina a una distancia constante entre el transductor y una placa reflectante. El segundo dispositivo es una sonda de conductividad/salinidad. Este mide los parámetros del agua, y en base a eso, se obtiene la velocidad del sonido (Makar, 2022).

6.4. Sistema de referencia de coordenadas

Es un sistema de coordenadas vinculado a un objeto cualquiera por medio de datos que indican su origen, escala y orientación. También es conocido como sistema de referencia espacial. Este objeto suele ser la Tierra, ya sea como un plano de proyección o un espacio tridimensional. En GIS, existen varios tipos de sistemas de referencia de coordenadas (Koubarakis et al., 2012).

6.4.1. Sistema de coordenadas geográficas. También definido como coordenadas geodésicas, es uno de los sistemas de coordenadas más usados, tomando a la Tierra como una malla o rejilla que gira sobre su propio eje. Este sistema determina la ubicación de un punto por medio de dos conceptos: longitud y latitud. No obstante, ambos de estos dependen de la definición de otros conceptos. A las partes opuestas donde pasa el eje de rotación se le denomina polos; el superior es llamado Polo Norte y el inferior es denominado Polo Sur. Perpendicular al eje de rotación pasa una circunferencia máxima denominada ecuador. Paralelo al ecuador salen otras circunferencias de menor tamaño llamadas paralelos. Similar a estar circunferencia salen semicírculos, denominados meridianos, que pasan por ambos polos y son perpendiculares al ecuador. (Ros, 2005).

La latitud mide el arco de meridiano entre el ecuador y un punto determinado, tomando el valor más pequeño. El valor de este es medido desde 0-90° Norte y 0-90° Sur desde el ecuador. La longitud mide el arco paralelo entre el meridiano de Greenwich y el meridiano de la ubicación. El valor de este es medido desde 0-180° Este desde el meridiano de Greenwich y 0-180° Oeste. Ambas coordenadas geográficas pueden ser expresadas en dos notaciones: grados decimales o grados sexagesimales. Los valores decimales de sur y oeste son expresados en números negativos, mientras que los valores de norte y este son expresados en números positivos. En cambio, los valores en el sistema sexagesimal siempre utilizarán números positivos (Neteler & Mitasova, 2013).

6.4.2. Sistema de coordenadas proyectadas. También definido como coordenadas cartográficas, este sistema reproduce la esfera terrestre en una superficie plana. En otras palabras, representa los paralelos y meridianos de una superficie 3D a una en 2D. A pesar de ello, es imposible ajustar una superficie plana a una esfera sin causar distorsiones.

Las proyecciones analizan diferentes transformaciones que representan la superficie esférica en una superficie plana para reducir las distorsiones ocurridas durante el proceso. Si bien las diferentes proyecciones poseen deformaciones en más de algún aspecto, todas buscan mantener la exactitud del posicionamiento. Las proyecciones se pueden clasificar en dos grupos

6.4.2.1. *Proyecciones según propiedades geométricas.*

- Las proyecciones conformes mantienen la forma de la superficie que es mostrada en mapa al no distorsionar las relaciones angulares. Para conformar estas áreas, los meridianos y paralelos son cortados en un ángulo recto. No obstante, distorsionan el tamaño de las superficies, por lo que la escala no es constante entre regiones del mapa.
- A diferencia de las anteriores, las proyecciones equivalentes muestran las áreas proyectadas con sus proporciones verdaderas. Esto se consigue al deformar los ángulos originales, sacrificando la conformidad por equivalencia.
- Las proyecciones equidistantes son las que conservan las distancias desde el centro de proyección o a lo largo de los meridianos. No todas las distancias son presentadas

correctamente, pero los mapas poseen una o más líneas que representan las distancias verdaderas.

- Las proyecciones acimutales obtienen su nombre ya que estas conservan los acimuts y las direcciones de todos los puntos del mapa respecto al centro de este. Eso permite que las relaciones angulares sean representadas correctamente (Pérez Navarro et al., 2011).

6.4.2.2. Proyecciones según figura geométrica.

- Proyección cilíndrica: la Tierra es proyectada en un cilindro tangente o secante, el cual es cortado longitudinalmente. En esta proyección, los paralelos y meridianos son mostrados como líneas rectas horizontales y verticales, respectivamente. Estos son distribuidos uniformemente y se cruzan en un ángulo recto.
- Proyección cónica: un cono imaginario envuelva el globo terráqueo y entra en contacto en una sola latitud (tangente) o intersección en dos círculos (secantes). El cono es cortado alrededor de un meridiano y desplegado en el plano. Ambos círculos en intersección son proyectados equidistantemente en el plano. El meridiano opuesto a la línea de corte es definido como el meridiano central. Las distorsiones crecen en ambos lados.
- Proyección Acimutal: un plano tangencial entra en contacto con el globo en cierto punto, el cual determina la posición. Estas posiciones pueden ser polar, ecuatorial u oblicua. Como indica su nombre, el Acimut es reproducido correctamente desde su punto de contacto hasta cualquier otro (de Lange, 2023).

6.4.3. UTM. El sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*, por sus siglas en inglés), es un sistema basado en la proyección transversa de Mercator, una proyección con desde norte a sur en vez de este a oeste como es en la proyección Mercator estándar. El UTM divide el globo en sesenta (60) zonas con un ancho de 6° longitud, numerados de 1 a 60, empezando a partir de 180° longitud. Cada una de estas zonas forman la base de una proyección de mapa separada para evitar distorsiones y variaciones de escala. Asimismo, cada zona está dividida en bandas de 8° de latitud, iniciando desde 80° Sur.

El punto original de cada zona se le es asignado un este 500,000 m, siendo el este falso. Mientras tanto, el norte cambiará según el hemisferio. Si se encuentra en el hemisferio norte, este tendrá un valor de cero. En cambio, si está en el hemisferio sur, este poseerá un valor de 10,000,000 m, siendo el norte falso. Para disminuir la distorsión presente, el valor de la escala a lo largo del meridiano central es reducido a 0.9996. Esto ocasiona que se produzcan dos líneas paralelas sin distorsión alguna (Neteler & Mitsova, 2013).

6.4.4. GTM. GTM (*Guatemala Transverse Mercator*), como su nombre lo indica, es un sistema de proyección cartográfico, creado específicamente para Guatemala. Surge a partir de la ubicación del país entre las zonas 15 y 16 del sistema UTM, ocasionando problemas al tener que tomar en cuenta dos sistemas de coordenadas distintos. La zona GTM también se apoya del WGS-84. Las especificaciones técnicas son las siguientes:

- Proyección: Transversa de Mercator
- Esferoide: WGS-84

- Longitud de origen: 90°30'
- Latitud de origen: 0°
- Unidades: metros
- Falso Norte: 0 metros
- Falso Este: 500,000 metros

(Tercero, 2007)

6.5. Cartografía

Se define cartografía como es una disciplina que tiene como objeto el estudio de los mapas como representación de la superficie terrestre. Esto incluye el análisis de la Tierra, el proceso de elaboración y su uso en diversas aplicaciones. Hoy en día, incluye modelos dinámicos para tomar en cuenta las interrelaciones de diversos fenómenos. La cartografía utiliza otras ciencias como apoyo. Algunas de estas son: geodesia, matemática, topografía y estadística (Maas & Váldez, 2003)

6.5.1. Elementos en un mapa. Una carta náutica está compuesta por varios elementos con diferentes funciones, pero con el mismo objetivo de proporcionar al lector información comprensible y suficiente para una navegación segura.

- Profundidad del agua: muestra el nivel de la profundidad del agua en distintos lugares. Esto es especialmente útil en zonas de poca profundidad para evitar que el barco encalle.
- Peligros: muestra la ubicación de todo tipo de obstáculos potenciales para la navegación, tales como rocas, arrecifes, escombros, entre otros.
- Ayudas a la navegación: indica la ubicación de elementos físicos que ayudan durante la navegación, como es el caso de las boyas, las balizas y los faros.
- Composición del suelo oceánico: algunas cartas indican el tipo de composición del fondo, ya que este puede afectar la sujeción y estabilidad de la embarcación.
- Mareas y corrientes: proporciona información sobre las mareas y corrientes en la zona.
- Información del litoral: características pertenecientes al litoral para identificar la ubicación, tales como playas o acantilados.
- Variación magnética: proporciona el ángulo entre el norte verdadero y el norte magnético para una navegación más precisa.
- Datum: indica el nivel de referencia vertical utilizando las mediciones de la profundidad del agua (Postma, 2023).

6.6. Programas y herramientas

6.6.1. QGIS. Quantum GIS, mejor conocido como QGIS, es un sistema de información geográfica. Este permite al usuario correr, estudiar, compartir y modificar todo tipo de

información. El software puede ser instalado en todo tipo de plataformas. La interfaz del programa se puede dividir en cuatro: Menu Bar, Toolbars, Panel y Map Canvas. El menú provee la mayoría de las funciones de QGIS. Toolbars y el Panel muestran otro tipo de funciones, y estos pueden ser trasladados a otras partes del programa según la preferencia del usuario. El Canvas del Mapa muestra gráficamente los datos que hemos transportado y configurado en el programa.

La especialidad de QGIS es su habilidad para componer cualquier tipo de mapa. Cuando empiezas la creación de uno, el programa te presenta con una "hoja en blanco". Del lado izquierdo de la interfaz, una barra de herramientas provee opciones para añadir elementos en el mapa, como imágenes, figuras determinadas, textos y el cuerpo del mapa en sí. La porción superior de la barra de herramientas contiene opciones para planear el mapa, mover contenido gráfico y realizar zoom en la composición.

Una de las grandes ventajas es su función y adaptabilidad con plugins. Estos son elementos adicionales por QGIS para proveer funciones en casos específicos. Si bien hay algunos desarrollados por el equipo interno, existen varios generados por otros usuarios que han sido aprobados para su importación e instalación. QGIS permite buscar todo tipo de plugins, incluso promoviendo aquellos que son muy recientes. Incluso permite actualizar estos si el creador ha hecho una nueva versión. Aunque ya estén instalados, estos pueden ser deshabilitados, así como rehabilitados, en cualquier momento (Islam et al., 2019).

6.6.2. HYPACK y HYSWEEP. HYPACK es un paquete de softwares diseñado para operaciones hidrográficas. Este provee las herramientas necesarias para diseñar, adquirir y procesar la información de los estudios realizados. Gracias a esto, es posible recrear entornos, mosaicos de los escaneos laterales y hasta cartas electrónicas. Los archivos pueden ser exportados en formatos XYZ, CAD, DXF y muchos más.

HYSWEEP es un módulo adicional a HYPACK. Este ayuda a recolectar y procesar los datos obtenidos por sonares multihaz y sistemas LiDAR. Este permite obtener la información en tiempo real, lo que facilita la detección y control de datos. Además, la información del multihaz es corregida y geo-referenciada. Este exporta a formatos ASCII XYZ, LAS y Matrix.

6.6.3. SEAPATH 130. El Seapath 130 es un sistema de navegación inercial (INS, por sus siglas en inglés) asistido por GNSS. Diseñado por Kongsber Discovery, el sistema es usado para levantamientos hidrográficos donde se requiere alta precisión. Los componentes son los siguientes.

Cuadro 2. Componentes del sistema Seapath 130 para navegación

Unidad	Descripción
Unidad de Referencia de Movimiento (MRU)	Registra las aceleraciones en diferentes direcciones, así como la velocidad y posición relativa.
Unidad de sensor	Determina la posición, rumbo y orientación por medio de señal GNSS y mediciones inerciales.
Software en Monitor	Programa utilizado para configurar el sistema, verificar el estado de la señal y realizar todo tipo de diagnósticos.

6.6.4. EM 2040P. La EM 2040P es una ecosonda multihaz diseñada para aguas de poca profundidad, basada en la tecnología EM 2040. Es ideal para mapeo de alta resolución y aplicaciones de inspección. El receptor y transmisor están integrados en la cabeza de sonar. Se divide en las siguientes unidades.

Cuadro 3. Componentes de ecosonda multihaz EM 2040P

Unidad	Descripción
Cabeza de transductor	Esta unidad se encuentra sumergida en el agua. Emite y recibo pulsos acústicos.
Unidad de procesamiento	Procesa los datos recibidos y se conecta a los sensores auxiliares como sensores de movimiento o sistemas de posicionamiento. Puede ser una unidad estándar o una unidad portable 24 VDC.
Estación de trabajo	Equipo donde se visualizan y almacenan los datos. Se usa en conjunto a software de KONGSBERG o terceros como HYPACK.

Figura 6. Unidad de procesamiento EM 2040P



Nota: elaboración propia

6.7. Comercio marítimo

El comercio marítimo conforma el transporte de mercancías por medios acuáticos de un lugar a otros por medio de rutas marítimas. Esto es un factor clave del crecimiento económico, ya que es considerado la columna vertebral del comercio internacional y de la economía global. Actualmente, el 80 % del comercio por volumen y el 70 % por valor mundial se transporta por medio de los océanos y se gestiona en los puertos, haciéndolo efectivamente un monopolio (Alvarado, 2022).

El transporte marítimo juega un papel relevante en la economía del mercado. Es más, la globalización económica se ha sustentado en el desarrollo del transporte marítimo internacional. Esto ha logrado la disposición de buques para mercados ocasionales o específicos. Pero gracias a la globalización, surgen fuertes competidores contra el transporte marítimo. Debido a eso, la industria marítima tuvo que adaptarse al especializar las embarcaciones en diferentes aspectos (Romero & Esteve, 2017).

6.7.1. Embarcaciones por carga. Inicialmente, no había mucha necesidad de clasificar los buques por sus cargas. Pero conforme el comercio marítimo fue creciendo y el cargamento se diversificó, las embarcaciones tuvieron que especializarse para cumplir estas demandas. A continuación, se describen los principales tipos que conforman la flota mercante global (Xiao &

Li, 2023).

6.7.1.1. Buques graneleros. Los buques graneleros se encargan de transportar carga de graneles sin empacar en bodegas. La materia prima suele ser granos, carbón, minerales, acero y cemento. Los buques graneleros son especialmente diseñados para maximizar capacidad, seguridad, eficiencia y durabilidad. En la actualidad, este grupo conforma el 21 % de la flota mercante mundial y varían en tamaño; desde pequeños graneleros con una sola bodega hasta grandes embarcaciones con la capacidad de 400,000 toneladas métricas. Estas embarcaciones pueden ser categorizadas por su tamaño, siendo: Handysize pequeño, Handymax, Panamax, Capesize y Very Large (Olsen, 2023).

6.7.1.2. Buques portacontenedores. Los portacontenedores son embarcaciones que usan el proceso de contenedorización: la carga es llevada en contenedores intermodales. Este es uno de los medios más comunes de transporte de mercancías y llevan todo aquello que no sea considerado graneles.

6.7.1.3. Buques gaseros. Los buques gaseros son embarcaciones diseñadas para trasladar gases licuados en grandes volúmenes. Estos transportan una gran selección de productos, como butadieno, etileno, GLP, GNL, GNC, propileno y otros gases químicos.

6.7.1.4. Buques petroleros. Los buques petroleros son embarcaciones que llevan cargamento líquido; principalmente petróleo. Los buques petroleros se clasifican de acuerdo con el estado del cargamento: crudo o producto refinado. Los primeros mueven grandes cantidades de petróleo crudo no refinado desde el punto de extracción hasta las refinerías. En cambio, los segundos continúan el trabajo desde donde se dejó, llevando el producto refinado hasta su objetivo. Estos barcos se clasifican de acuerdo con su tamaño y ocupación. Los buques petroleros poseen desde ocho hasta doce tanques. Las operaciones de estos son gobernadas por un cuerpo de leyes internacionales (Olsen, 2023).

Figura 7. Buque petrolero Glenda Melissa



Nota: propia

6.7.2. Embarcaciones por tamaño. Los buques cargueros son usualmente categorizados de acuerdo con su capacidad, peso y uso. Se consideran tanto dimensiones mínimas como máximas para verificar en que vías marítimas y puertos es posible navegar. Para la descripción de los buques, se consideran tres dimensiones importantes son: eslora, manga y calado. (Xiao & Li, 2023).

6.7.2.1. Aframax. Se refieren a los buques petroleros de tamaño mediano con un peso muerto de 120,000 dwt. Estas embarcaciones pueden ser cargadas sobre siete millones barriles de petróleo crudo. Estos transitan en áreas donde las instalaciones portuarias son limitadas o puertos que no poseen la capacidad para albergar buques más grandes (Olsen, 2023).

6.7.2.2. Capesize. Son los buques graneleros más largos que existen, siendo incapaces de transitar el Canal de Suez o el Canal de Panamá. En cambio, deben transitar por el Cabo de Hornos o el Cabo de las Agujas. La capacidad de estos buques está entre 110,000 y 199,000 dwt (Xiao & Li, 2023).

6.7.2.3. Panamax y Neopanamax. Reciben su nombre por el Canal de Panamá. Los Panamax fueron diseñados para la versión original del canal. Su capacidad es de 52,500 dwt. Sus dimensiones máximas son: la eslora es de 294.13 m, la eslora es de 32.31 m y el calado es de 12.04 m. Los Neopanamax surgen a partir de la expansión del Canal de Panamá en 2009. Su capacidad es mayor, siendo de 120,000 dwt. Sus dimensiones máximas son: la eslora es de 366 m, la eslora es de 49 m y el calado es de 15.2 m. Tanto los barcos Panamax como los Neopanamax tienen una altura límite de 57.91 m, aunque hay excepciones que permiten una altura máxima de 62.5m (Xiao & Li, 2023).

6.7.2.4. Suezmax. Se refieren a las embarcaciones que pasan por el Canal de Suez. Estos barcos varían en tamaño; algunos son medianos mientras otros son largos. Su capacidad es de 160,000 dwt. Sus dimensiones máximas: la eslora es de 400 m, la eslora es de 77.5 m y el calado es de 20.1 m. También posee una altura límite de 68 m, debido al puente ubicado en el canal. La capacidad de estas embarcaciones se encuentra entre 120,000 dwt y 200,000 dwt (Xiao & Li, 2023).

6.7.3. Contaminación de buques. En términos de energía, el transporte por medio de buques es el medio más eficiente que hay. No obstante, la gran escala del comercio marítimo, que comprende entre el 80 % y 90 % del comercio mundial, señala a que existe un impacto notable en el medio ambiente. Al año se trasladan millones de toneladas al año que contribuyen un 3 % de la emisión de gases de efecto invernadero. Consiguientemente, el transporte marítimo contribuye un 13 % de las emisiones de óxido de nitrógeno y 12 % de óxido de azufre. Ya que se espera que para 2,050 la demanda mundial crezca un 40 %, esto implicaría que el aporte a la contaminación mundial crecería (Mueller, 2023).

Con relación a las emisiones total por tipo de barco, los portacontenedores son los que más contaminan, con un total de 212 millones de toneladas métricas al año. Esto es seguido de buques graneleros (175M toneladas de CO₂) y los buques petroleros (113M toneladas de CO₂). No obstante, los barcos con la mayor media de contaminación son los cruceros, que aportan alrededor de 50.32 toneladas de CO₂, seguidos de 40.54 ton por parte de los portacontenedores y 27.63 ton por parte de los barcos metaneros (Merino, 2021).

6.8. Navegación marítima

El negocio de la navegación marítima es similar a las otras actividades económicas, donde se busca el mayor beneficio junto al menor coste posible. Los barcos deben ser eficientes, deben de realizar las rutas óptimas para aprovechar el tiempo. Las condiciones meteorológicas pueden afectar al barco, la carga o incluso el aumento del combustible. La climatología puede afectar negativamente entre un 50 % y 80 % el rendimiento del barco (Moreno, 2022).

Las rutas marítimas superan los traslados por rutas terrestres. Los cambios observados en las rutas marítimas se deben a varios factores. Entre estos destaca la viabilidad y riesgo de las rutas utilizadas antes de llegar a las costas, así como la impermeabilidad relativa de las rutas marítimas. Incluso se toma en cuenta la probabilidad de interceptación, los riesgos y precios del trayecto, las condiciones de llegada y acogida, así como la posibilidad de un traslado extra luego de haber llega-

do al destino final. Las fronteras no se pueden concebir como límites fijos, sino como instituciones socialmente construidas que reflejan relaciones y pueden cambiar con el tiempo. Es importante comprender las dinámicas de las fronteras por medio de su función simbólica y como se contribuye al fortalecimiento y mantenimiento de estas (Godenau & Buraschi, 2019).

Las rutas marítimas más importantes son:

- Canal de la Mancha: esta es la ruta marítima más transitada en el mundo. Más de 500 embarcaciones pasan por el canal cada día para ir desde el Mar del Norte al Océano Atlántico y desde el Reino Unido hasta el continente de Europa.
- Estrecho de Malaca: el estrecho conecta el Océano Índico y el Océano Pacífico. Se extiende desde el Mar de Burma por el Estrecho de Singapur hacia el Mar de la China Meridional. Las embarcaciones cargan alrededor del 30 % de los bienes globales.
- Estrecho de Ormuz: se encuentra entre Irán y Omán, uniendo el Golfo Pérsico con el Golfo de Omán y el Mar Árabe. Es la principal ruta para el traslado de petróleo del Medio Oriente. También se traslada el 20 % del gas natural licuado global cada año.
- Canal de Suez: ubicado en Egipto, el canal conecta el Mediterráneo con el Mar Rojo y es la línea divisoria entre África y Asia. Tiene la característica de ser la ruta marítima más corta desde Europa hacia Asia y evita que las embarcaciones pasen por viajes más largos por el Cabo de Buena Esperanza.
- Canal de Panamá: conecta el Océano Atlántico y el Océano Pacífico, siendo una de las rutas más significativas para el comercio global. El canal conecta con casi 2,000 puertos en 170 países y facilita la transición de más de 14,000 barcos anuales (Feingold & Willige, 2024).

6.9. Puertos marítimos

La ingeniería civil marítima se basa en gran medida en otras disciplinas y usualmente utiliza más la aplicación de principios de ingeniería que los códigos de construcción. Los avances tecnológicos han afectado la ingeniería portuaria en los varios aspectos, como: diseño y construcción de barcos, sistemas de transportación, equipamiento de construcción y dragado, oceanografía aplicada y estudios de medición.

Las instalaciones de hoy en día están altamente especializadas en sus operaciones, enfocándose en el tipo de cargo que se está manejando. Incluso existen instalaciones de múltiples fines, basándose en los tipos de embarcaciones según su carga. Además de los puertos, existen otros tipos de estructuras como las instalaciones de atraque y los astilleros, los cuales ven menos actividad y cuyos barcos están embargados durante largos periodos (Gaythwaite, 2016).

Sin importar el tipo de instalación, todas tienen requisitos de diseño particulares. A diferencia de las estructuras basadas en tierra, las cuales están diseñadas para criterios de cargas y tensiones permitidas establecidas por códigos de construcción, las estructuras marinas están diseñadas por los criterios indicados por el diseñador junto a los requisitos de los propietarios. El criterio de diseño también debe considerar los efectos a largo plazo, como socavación y erosión, deterioro general, fatiga y desgaste, técnicas constructivas, la climatología del lugar, y posibilidad de futura ampliación (Gaythwaite, 2016).

6.9.1. Puertos de Guatemala.

6.9.1.1. Puerto Quetzal. Es el puerto marítimo más grande de Guatemala, ubicado en la costa del océano Pacífico. Se encuentra en el municipio de San José, departamento de Escuintla. Posee las siguientes terminales

Cuadro 4. Instalaciones de Puerto Quetzal

Descripción: muelle tipo marginal, con longitud de 914 m y capacidad para 4 buques	
Terminales	Función y capacidad
Terminal de carbón y combustible	1 atracadero para la descarga de carbón mineral y combustibles.
Terminal de cruceros	1 atracadero para los buques de pasajeros.
Muelle comercial	2 atracaderos para manipular carga general y otros 2 para carga general que sea sólida o líquida.
Muelle auxiliar	1 atracadero para manipular carga general, pero de buques de poco calado.
Terminal de gas	1 atracadero que posee conexiones especializadas para la descarga de gas licuado de petróleo.

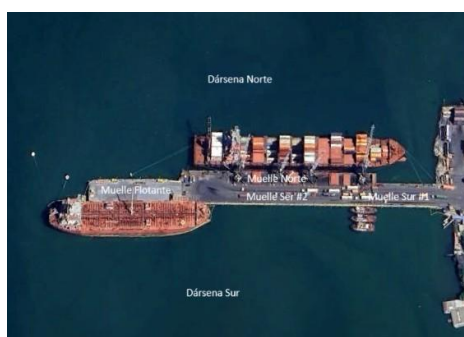
6.9.1.2. Puerto de Puerto Barrios. Oficialmente conocido como la Terminal Ferroviaria de Puerto Barrios, es el segundo de los dos puertos en la Bahía de Amatique. Posee un total de 3 atracaderos en su muelle. A diferencia de los dos primeros puertos, que sirven al Estado, Puerto Barrios es dirigido por una entidad privada.

6.9.1.3. Puerto Santo Tomás de Castilla. Es uno de los dos puertos marítimos ubicados en la Bahía de Amatique. Se encuentra en la costa caribeña, en el departamento de Izabal. Las instalaciones son las siguientes:

Cuadro 5. Instalaciones Portuarias de EMPORNAC

Descripción: Muelle tipo marginal, con longitud de 914 m y capacidad para 4 buques			
Atracadero No. 1	Atracadero No.2	Atracadero No. 3	Atracadero No. 4
Capacidad máxima permisible: 4.9 Ton/m2	Capacidad máxima permisible: 4.9 Ton/m2	Capacidad máxima permisible: 2.9 Ton/m2	Capacidad máxima permisible: 2.9 Ton/m2
Calado: 10.36 m	Calado: 9.50 m	Calado: 9.80 m	Calado: 9.80 m

Figura 8. Muelle de Puerto Barrios



Nota: Google Earth

6.10. Marco legal

6.10.1. Ordenamiento jurídico en Guatemala. En Guatemala la fuente del Derecho es la ley, jurisprudencia y costumbre, lo cual establece la Ley del Organismo Judicial en el artículo 2. El ordenamiento superior es la Constitución Política de la República de Guatemala emitida por la Asamblea Nacional Constituyente, seguido por los Convenios Internacionales; en cuanto a la legislación ordinaria conocida como Decretos, estos son aprobados por el Congreso de la República. Los ordenamientos reglamentarios aprobados mediante acuerdos del presidente de la República, ministros de Estado o autoridades superiores de entes con esa atribución.

6.10.2. Las normas superiores del Estado. La constitución Política de la República de Guatemala, entrada en vigor el 14 de enero de 1986, es el ordenamiento legal más importante del Estado. Por lo tanto, toda legislación emitida está subordinada a la jerarquía constitucional; es decir, ninguna ley o reglamento pueden contradecir las normas constitucionales. La Constitución Política establece los aspectos y extensión del territorio de Guatemala:

6.10.2.1. Artículo 142 - De la soberanía y el territorio. El Estado ejerce plena soberanía sobre:

- El territorio nacional integrado por su suelo, subsuelo, aguas interiores, el mar territorial en la extensión que fija la ley y el espacio aéreo que se extiende sobre los mismos;
- La zona contigua del mar adyacente al mar territorial, para el ejercicio de determinadas actividades reconocidas por el derecho internacional; y
- Los recursos naturales y vivos del lecho y subsuelo marinos y los existentes en las aguas adyacentes a las costas fuera del mar territorial, que constituyen la zona económica exclusiva, en la extensión que fija la ley, conforme la práctica internacional (Constitución de la República de Guatemala, 1986).

La norma constitucional describe los aspectos terrestres como suelo y subsuelo, el área o espacios acuáticos como aguas interiores, mar territorial, zona contigua del mar adyacente al mar territorial, zona económica exclusiva y lecho y subsuelo marinos. También describe un espacio del territorio donde se unen espacio terrestre y marítimo como lo son las costas.

En base a las normas constitucionales es importante dejar claro que las aguas de la zona marítima son bienes del Estado, de acuerdo con el artículo 121 de la Constitución:

6.10.2.2. Artículo 121 - Bienes del Estado. Son bienes del Estado:

- Los de dominio público;
- Las aguas de la zona marítima que ciñe las costas de su territorio, los lagos, ríos navegables y sus riberas, los ríos vertientes y arroyos que sirven de límite internacional de la República, las caídas y nacimientos de agua de aprovechamiento hidroeléctrico, las aguas subterráneas y otras que sean susceptibles de regulación por la ley y las aguas no aprovechadas por particulares en la extensión y término que fije la ley;
- Los que constituyen el patrimonio del Estado, incluyendo los del municipio y de las entidades descentralizadas o autónomas;

- La zona marítimo terrestre, la plataforma continental y el espacio aéreo, en la extensión y forma que determinen las leyes o los tratados internacionales ratificados por Guatemala; (...)

Con relación a las zonas costeras es necesario considerar lo establecido por la Constitución:

6.10.2.3. Artículo 122 - Reservas territoriales del Estado. El Estado se reserva el dominio de una faja terrestre de tres kilómetros a lo largo de los océanos, contados a partir de la línea superior de las mareas; de doscientos metros alrededor de las orillas de los lagos; de cien metros a cada lado de las riberas de los ríos navegables; de cincuenta metros alrededor de las fuentes y manantiales donde nazcan las aguas que surtan a las poblaciones. Se exceptúan las expresadas reservas:

- Los inmuebles situados en zonas urbanas; y
- Los bienes sobre los que existen derechos inscritos en el Registro de la Propiedad, con anterioridad al primero de marzo de mil novecientos cincuenta y seis.

La Constitución Política también establece el tema de los puertos y terminales marítimas y el transporte marítimo; se explica que:

6.10.2.4. Artículo 131 - Servicio de transporte comercial. Por su importancia económica en el desarrollo del país, se reconoce de utilidad pública, y por lo tanto, gozan de la protección del Estado, todos los servicios de transporte comercial y turístico sean terrestres, marítimos o aéreos, dentro de los cuales quedan comprendidas las naves, vehículos, instalaciones y servicios.

Las terminales terrestres, aeropuertos y puertos marítimos comerciales, se consideran bienes de uso público común y así como los servicios del transporte, quedan sujetos únicamente a la jurisdicción de autoridades civiles. Queda prohibida la utilización de naves, vehículos y terminales, propiedad de entidades gubernamentales y del Ejército Nacional, para fines comerciales; esta disposición no es aplicable a las entidades estatales descentralizadas que presten servicio de transporte.

Para la instalación y explotación de cualquier servicio de transporte nacional o internacional, es necesaria la autorización gubernamental. Para este propósito, una vez llenados los requisitos legales correspondientes por el solicitante, la autoridad gubernativa deberá extender la autorización inmediatamente (Constitución de la República de Guatemala, 1986).

6.10.3. Convenios internacionales. El país está sujeto a tratados y convenios internacionales que ratificó e incorporó a la legislación de Guatemala, siendo los más relevantes para el tema:

- Convención de las Naciones Unidas Sobre el Derecho del Mar -Convemar- (1982) de la Organización de Naciones Unidas; se conoce comúnmente como la “Constitución de los Océanos”, entró en vigor en 1994.
- Convenio Constitutivo de la Organización Marítima Internacional -OMI- (1948). En 1982 cambia a Organización Marítima Internacional (OMI)
- Convención relativa a la Organización Hidrográfica Internacional -OHI-, 1967.

6.10.4. Legislación ordinaria. El Código Civil establece con relación a los bienes del Estado:

6.10.4.1. Artículo 458 - Bienes nacionales de uso común. Son bienes nacionales de uso público común:

- Las calles, parques, plazas, caminos y puentes que no sean de propiedad privada,
- Los puertos, muelles, embarcaderos, pontones y demás obras de aprovechamiento general, construidos o adquiridos por el Estado o las municipalidades;
- Las aguas de la zona marítima territorial en la extensión y términos que fije la ley respectiva; los lagos y ríos navegables y flotables y sus riberas, los ríos, vertientes y arroyos que sirven de límite al territorio nacional; las caídas y nacimientos de agua de aprovechamiento industrial, en la forma que establece la ley de la materia; y las aguas no aprovechadas por particulares; y
- La zona marítimo-terrestre de la República, la plataforma continental, el espacio aéreo y la estratosfera en la extensión y forma que determina la ley (Código Civil, 1963).

El Decreto No. 20-76 del Congreso de la República tiene por objeto delimitar las zonas marítimas del Estado de Guatemala. La Ley del Organismo Ejecutivo establece al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda como autoridad aeroportuaria y portuaria.

El Registro de Información Catastral (RIC) creado por Decreto No. 41-2005 del Congreso de la República y que en sus funciones se encuentra administrar el catastro nacional, lo cual incluye las zonas costeras.

Con relación a las empresas portuarias del Estado se rigen por la Ley Orgánica de la Empresa Portuaria Nacional de Champerico, Ley Orgánica de la Empresa Portuaria Quetzal y Ley Orgánica de la Empresa Portuaria Nacional Santo Tomás de Castilla.

En materia de medio ambiente se consideran importantes la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente y la Ley de Áreas Protegidas.

6.10.5. Normas reglamentarias. El tema de hidrología y de medición en espacios y fenómenos marítimos lo realiza el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. Fue creado por Acuerdo Gubernativo del 26 de marzo de 1976.

En 1985 se emite el Acuerdo Gubernativo 254-85 que crea la Comisión Interinstitucional de Investigación Hidro-oceanográfica, la cual tiene como atribuciones “planificar, coordinar, supervisar y ejecutar cualquier tipo de investigación trabajo hidro-oceanográfico a fin de obtener información reciente y actualizada de las características y propiedades físicas, químicas, geológicas, biológicas, morfológicas en las aguas interiores, costas, litorales, mar territorial y zona exclusiva, su espacio aéreo, suelo y subsuelo de sus fondos.”

El Instituto Geográfico Nacional, Ingeniero Alfredo Obiols Gómez -IGN-, se crea de naturaleza civil mediante Acuerdo Gubernativo No. 861-97 y actualmente es una dependencia del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

En materia de cuencas hidrográficas el Acuerdo Gubernativo No. 195-89 crea la Comisión Nacional para el Manejo de Cuencas Hidrográficas -CONAMCUEN- y el Acuerdo Gubernativo No. 19-2021 Disposiciones para Promover la Protección y Conservación de Cuencas Hidrográficas de La República de Guatemala.

6.10.6. Otras fuentes. El ordenamiento jurídico de Guatemala carece de leyes o reglamentos especializadas en materia de Batimetría, por lo que se integra con otras fuentes de información internacional de naturaleza pública y privada, así como de normas técnicas.

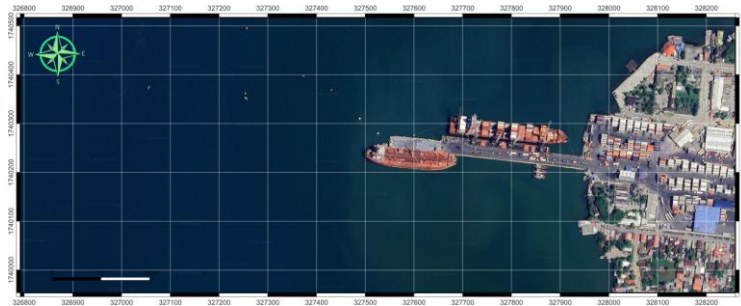
Por lo anterior el conocida grupo internacional que genera datos relevantes Carta Batimétrica General de los Océanos -GEBCO por sus siglas en inglés- es la reunión de expertos que investiga y elabora conjuntos de datos batimétricos con datos de los océanos del mundo. Dos de las grandes organizaciones auspiciadoras de GEBCO es la Organización Hidrográfica Internacional -OHI- y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental -COI- de la Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación -UNESCO-.

7. METODOLOGÍA

7.1. Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio fue en las costas de Izabal, cerca de uno de los puertos marítimos. Antes de realizar el levantamiento, se identificó el área a levantar por medio de tramos que la embarcación debe seguir. Estos tramos son los mismos para todas las iteraciones de los levantamientos realizados. Además, evitan el gasto innecesario de combustible.

Figura 9. Ubicación del levantamiento hidrográfico



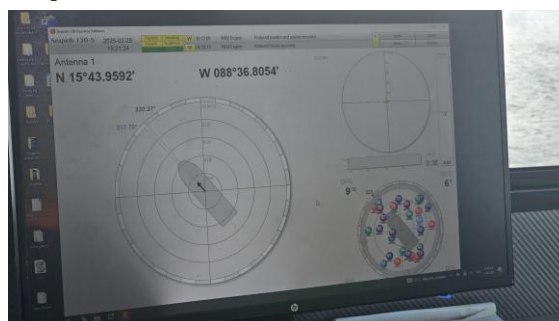
Nota: Google Earth.

7.2. Levantamiento

7.2.1. Equipo. El barco 3011-CTC, denominado *Lugudi Barana* es una embarcación especializada en levantamientos hidrográficos. Es una lancha relativamente pequeña, lo que le permite realizar maniobras donde otras embarcaciones tendrían problemas. Posee una cabina lo suficientemente amplia para permitir a cuatro personas y el equipo necesario para el estudio de los levantamientos hidrográficos. Está diseñada para realizar estudios cerca de las costas, por lo que no se recomienda utilizarla en alta mar.

El sistema Seapath 130 fue el primer equipo en encenderse. Primero, se confirma que se esté recibiendo la señal por medio de satélites. Luego, se inicia el sensor de movimiento y verificar que los parámetros estén estables. Estos parámetros son: rumbo; posición y velocidad; bandeo y cabeceo; y cabeceo vertical. Se verificaron estos de acuerdo con un código de colores. El color rojo indica que existen problemas, el color amarillo indica que el desempeño se ve reducido; y el color verde indica que está en óptimas condiciones. Cuando todos los parámetros se encuentren en verde, se procedió a verificar que se muestren los satélites disponibles para ubicar la embarcación correctamente.

Figura 10. Calibración del Seapath 130



El DIGIBAR-Pro es un velocímetro de Teledyne Odom Hydrographic, el cual puede medir la velocidad del sonido en el agua, presentando distintos valores según la profundidad específica. El instrumento se compone por un controlador manual, un cable reforzado de Kevlar y un sensor de acero inoxidable para el mar. Los valores son almacenados y presentados en la pantalla del controlador manual. El principio se basa en la emisión de pulsos, donde un transductor emite una señal que se propaga por un medio. Luego de que la señal atraviese el medio y sea detectada por otro transductor, este último dispara otra señal que será detectada por el transductor original. Esto crea un ciclo continuo. La frecuencia resultante es determinada por la distancia recorrida (de ida y de regreso), siendo directamente proporcional a la velocidad de propagación del pulso. Para su operación, el sensor es bajado a una velocidad constante por la borda mientras el barco está detenido. Cuando se llegue a la profundidad deseada, se obtienen los datos y se retira la unidad con mucho cuidado. En la pantalla, se muestra las velocidades junto a su respectiva profundidad. Las unidades son configuradas antes de hundir el aparato. En este caso, se usó el sistema métrico; m/s para velocidad y metros para profundidad.

Figura 11. Medición de la velocidad del sonido en el agua



El TideMaster de Valeport es un mareógrafo; un instrumento que mide y registra el nivel del mar y las variaciones de marea. Este modelo fue diseñado para proveer información precisa, buscando que su función sea versátil y de fácil implementación para operaciones a corto o largo plazo. El principal componente es la Unidad de Registro, la cual contiene una pantalla que muestra la información, botones de control, almacenamiento de memoria y conexión para un dispositivo externo que contenga el software TideMaster Express. Esta unidad se instala en una zona costera, dentro de una caja resistente al agua (IP67). El transductor de presión tiene como función convertir la presión de un fluido en una señal para ser registrada; en este caso se emplea para medir la profundidad del agua. Este debe colocarse en el nivel del agua más bajo posible para que siempre esté sumergido. Por último, se encuentra el sensor de nivel por radar VRS-20, el cual usa ondas electromagnéticas para medir la distancia entre el sensor y la superficie del agua. El sensor está instalado en una superficie estable y robusta para evitar un movimiento significativo. Se basa en el mismo principio que la ecosonda.

Figura 12. Mareógrafo utilizado para el levantamiento



Se enciende la ecosonda multihaz EM 2040P. Al igual que los otros equipos, debe ser calibrada antes de usarse. Primero se calibran los sensores desde la orilla del mar. Se verificó el rumbo, cabeceo y el balanceo. Luego que estén dentro del intervalo de tolerancia, se procede a realizar la calibración en agua. Esto se realizó mientras el barco está en movimiento, preferiblemente en un área conocida que no sea tan plana ni posea grandes pendientes. Luego de haber verificado que los parámetros sean aceptables, se procede a navegar hacia el área de estudio.

Figura 13. Calibración por medio de HYSWEEP



7.2.2. Recorrido. Antes de empezar el recorrido, se debe crear el proyecto de líneas. El objetivo de este proyecto es asegurar que la recolección de datos sea eficiente y logre abarcar la cobertura necesaria. Principalmente, este depende de la escala del proyecto y las indicaciones especificadas por el cliente. Otros aspectos dependen del tipo de ecosonda que se utilice. En el caso de la ecosonda multihaz, el espaciamiento entre líneas dependerá del ángulo del transductor y la profundidad del suelo oceánico.

Luego de tomar en cuenta todos los factores, se procedió a dibujar el plan de líneas en alguno de los softwares especializados en GIS, como el caso de AutoCAD. Como el proyecto se realizó en conjunto a una operación de dragado, el plan de líneas fue proveído por la empresa Dutch Dredging. Por lo mismo, cualquier cambio estuvo sujeto a decisión de la empresa. Luego de obtener el plan de líneas, se navega el barco de acuerdo con la guía mostrada en pantalla. Para facilitar la toma de datos, tanto el hidrógrafo como el piloto tiene pantallas a su disposición para verificar la ruta que deben tomar.

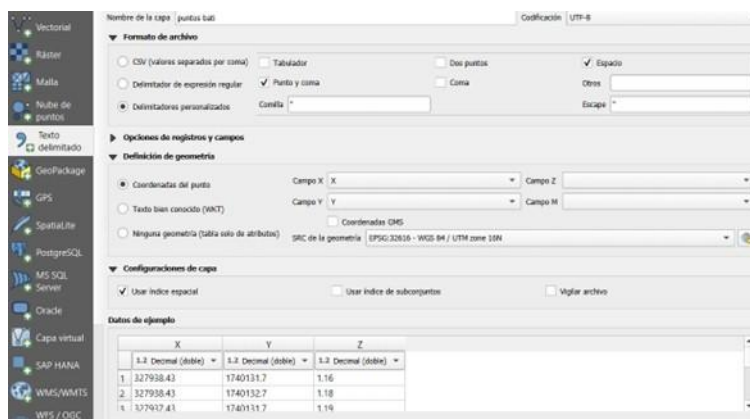
7.3. Procesamiento de datos

7.3.1. HYPACK y HYSWEEP. El editor HYSWEEP puede leer archivos que contengan información en bruto o editada de los transductores. En el caso de la información en bruto, se aplican varias correcciones a los sondeos, tomando en cuenta el calado, la velocidad del sonido y la marea. El producto final fue exportado como un archivo xyz.

7.3.2. QGIS. El programa QGIS 3.34 permite al usuario leer, procesar y representar la información geográfica obtenida en los levantamientos. Para iniciar, se crea un nuevo proyecto y se especifica el sistema de coordenadas a utilizar. Todo nuevo proyecto tiene el sistema WGS-84 como la opción determinada. El levantamiento fue hecho en la Bahía de Amatique, correspondiente a la zona UTM 16N. Por lo tanto, se debe de cambiar de WGS-84 a UTM 16N en las propiedades del proyecto.

Para insertar los datos del levantamiento, se sube el archivo como un texto delimitado. En las opciones se aclararon que datos representan el tipo de información: campo X para coordenadas en X, campo Y para coordenadas en Y y campo Z para la profundidad. También se estableció el sistema de coordenadas de acuerdo al proyecto. Al concluir se puede observar los puntos del levantamiento batimétrico. Para facilidad y seguridad, esta capa se guarda como un archivo shapefile.

Figura 14. Función de texto delimitado



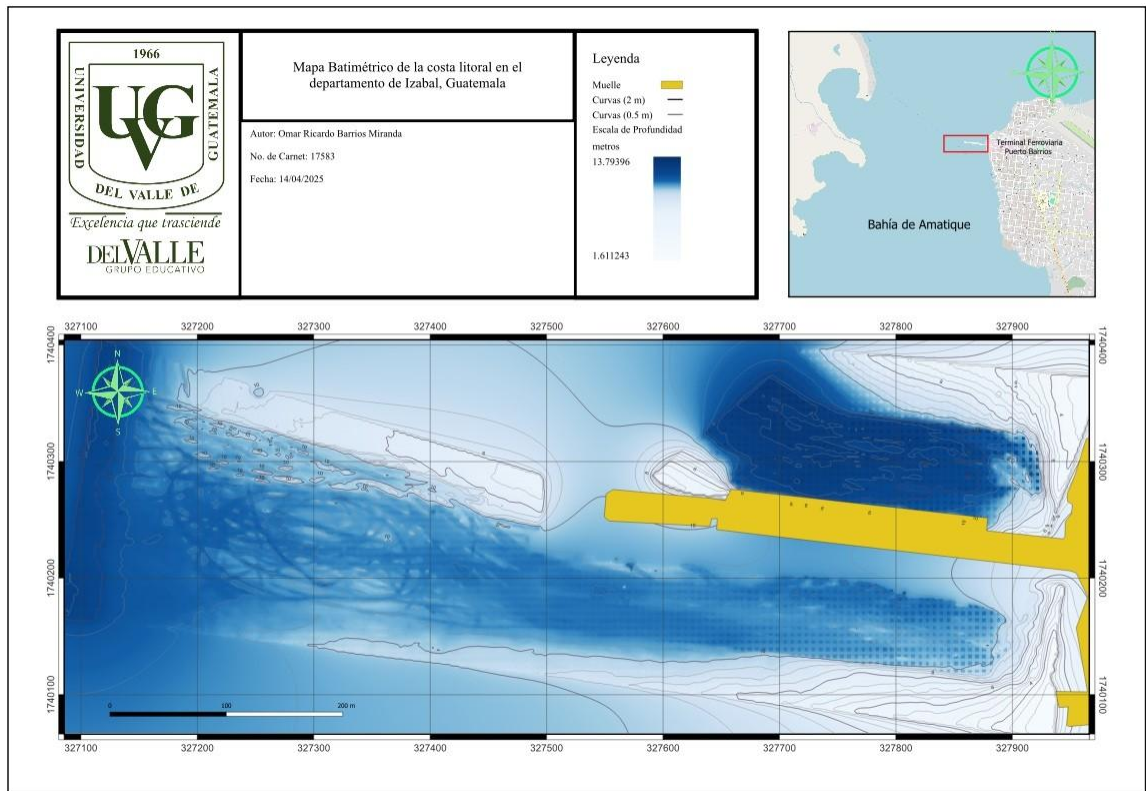
Existen ciertas áreas que no fueron cubiertas durante el levantamiento. La profundidad de estas áreas se calculó por medio de una interpolación. QGIS permite el análisis de interpolaciones por

medio de diferentes funciones, entre las cual está la interpolación ponderada por distancia inversa. Se selecciona esta opción, indicando el área que se desea abarcar y la precisión de los datos, tomando en cuenta el tiempo de procesamiento. Al terminar, se puede observar la profundidad del suelo oceánico en una degradación de colores.

Después de haber procesado la interpolación, se procedió a dibujar las curvas de nivel. La opción "Polígonos de contorno" fue seleccionada; la capa de interpolación como la capa de entrada. Tomando en cuenta que el estudio se realizó en aguas someras, la separación entre curvas de nivel principales será de dos metros, mientras que la separación de curvas de nivel secundarias será de un metro. Para verificar las pendientes, se utilizó el complemento *Terrain Profile*, que permite trazar una línea en la zona deseada. Las dos áreas de interés son la dársena norte y la dársena sur, pues los buques atracan en esas zonas.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Figura 15. Visualización previa del resultado final



El levantamiento batimétrico fue efectuado en conjunto a una operación de dragado en la Bahía de Amatique, Izabal. El dragado fue solicitado por los puertos de la zona. El objetivo principal es el área del muelle, donde atracan los buques para importar o exportar materiales y otros productos. Anteriormente se tenía conocimiento que la profundidad del área era alrededor de 10 metros. Sin embargo, los puertos de Guatemala han comentado la necesidad de recibir a los buques Post-Panamax, cuyo calado es al menos de 12 metros de profundidad. Al cumplir este objetivo, es posible que los puertos puedan recibir a estos buques que poseen mayor capacidad de carga. La duración del levantamiento dependió bastante del avance de la draga.

Uno de los problemas que se suscitaron para ejecutar la batimetría es el conflicto que surge entre el plan batimétrico y la programación de atraques y zarpes de buques. Si bien la batimetría de la zona es muy importante para las empresas portuarias, su prioridad está por debajo de la carga y descarga de los contenedores en el muelle. Por lo tanto, se debe esperar a que no haya ningún buque dentro de la zona. A eso se le sumó la repentina revisión de dos contenedores que no pasaron la prueba de revisión. Para evitar el gasto de recursos, se suspendió el levantamiento temporalmente hasta nuevo aviso. Unas horas después se confirmó la hora de salida del buque, por lo que media hora antes se recalibran los sistemas conforme al proceso debido. Aunque existan atrasos, la información debe estar lista lo más pronto posible ya que la empresa de dragado necesita tener una idea del avance que se ha realizado. De lo contrario, la draga puede retirar más tierra de lo necesario u omitir una zona que requiera de más excavación.

A pesar de todos los atrasos, los datos fueron recolectados correctamente y a tiempo para ser procesados y corregidos. Gran parte de eso se debe al personal capacitado. Cada integrante del equipo batimétricos cumplió con su rol debidamente. El equipo consistía en tres integrantes dentro de la lancha hidrográfica y un integrante estacionado en el puerto. La corrección fue realizada por un teniente de la Marina; el hidrógrafo empleado para esta operación. Por temas de seguridad y confidencialidad, no todos los levantamientos fueron aportados a mi persona. Esto incluye los estudios batimétricos previos al dragado, algunas zonas y el levantamiento batimétrico final. Sin embargo, se considera que la información proveída fue lo suficiente para continuar con el proceso de investigación.

Se recibieron dos archivos xyz, que representan el norte y el sur del muelle. Inicialmente hubo problemas al trasladarlos debido a que QGIS tenía problemas para reconocer este tipo de archivos. Esto se solucionó trasladando los datos de ambos archivos a uno solo y convirtiendo este mismo en formato csv. Inicialmente se planeaba trabajar con el sistema de coordenadas GTM, respectivo para el país. Sin embargo, los datos estaban en UTM 16, por lo que se configuró el proyecto para evitar complicaciones. Luego de indicar los parámetros adecuados, el programa leyó y procesó los datos adecuadamente. Alrededor de 172970 puntos fueron obtenidos.

Para obtener una vista clara del área levantada y llenar los espacios vacíos, QGIS permite realizar interpolaciones, con una variedad de opciones como interpolación TIN e interpolación IDW. Se realizaron ambas para verificar el resultado, optando por la interpolación IDW ya que representa mejor el área estudiada. Esto se debe a que no presenta irregularidades y el suelo oceánico tiende a ser relativamente uniforme cerca de las costas. QGIS tardó varios minutos en poder procesar la interpolación debido a la enorme cantidad de información que se estaba manejando, así como la obtención de la profundidad de las zonas que no fueron parte del levantamiento original.

Figura 16. Dársena Norte. a) Perfil topográfico; b) pendiente

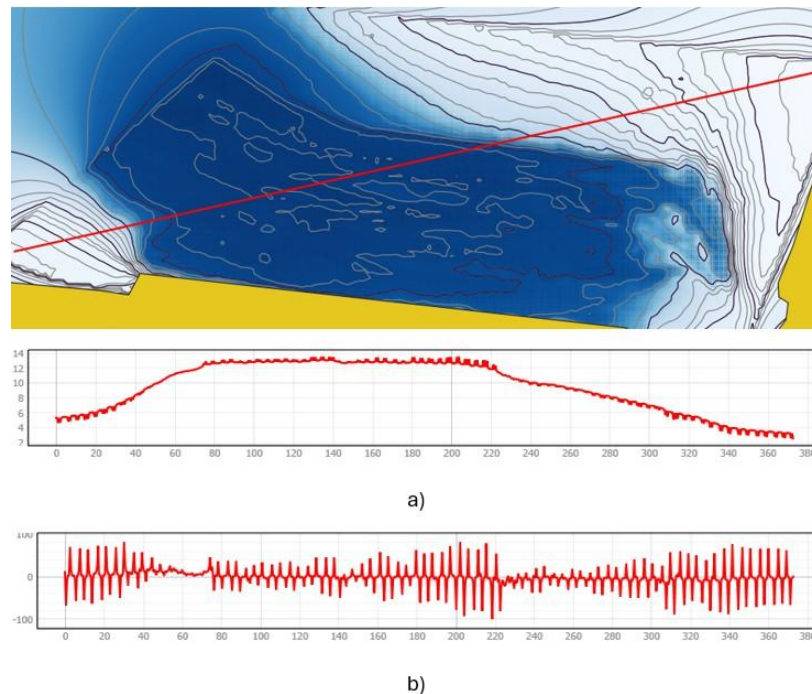
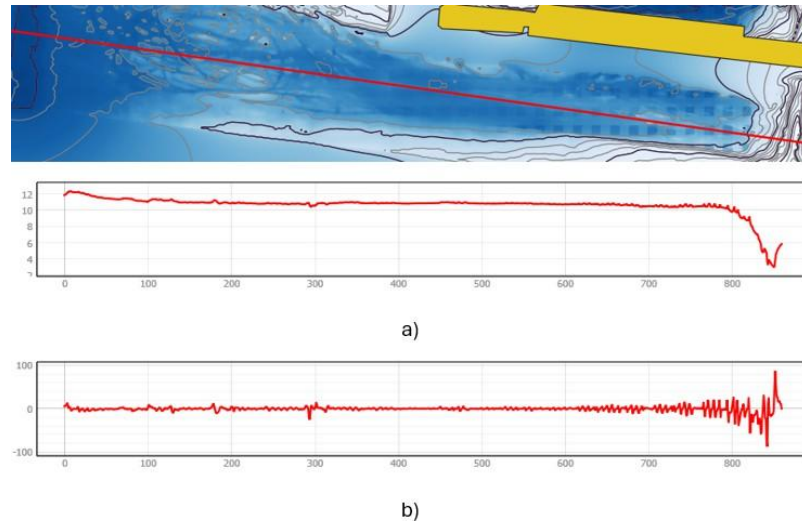


Figura 17. Dársena Sur. a) Perfil topográfico; b) pendiente



Como se puede observar en el gráfico, se obtuvieron las pendientes de la dársena sur y la dársena norte. Las pendientes se midieron paralelas al área de atracadero; iniciando desde el muelle flotante hasta la parte más interna, cerca de donde inicia el recinto fiscal. La distancia de la Dársena Sur es mayor a la distancia de la Dársena Norte gracias a que la estructura portuaria es más cercana del lado de esa Dársena. Al ver la pendiente de la Dársena Sur en la gráfica, se puede apreciar que no existe mucha variación en la profundidad durante los primeros 300 metros, estando en un rango de 11.15 m y 10.85 m. Alrededor de los 340 metros, la profundidad disminuye repentinamente en dos ocasiones; en la primera, la profundidad registrada es de 8.90 m y la segunda es de 5 m. En el caso de la Dársena Norte, la profundidad inicia alrededor de 6.75 m, para luego continuar ascendiendo durante los primeros 60 metros de distancia. A partir de este punto, la profundidad se estabiliza un poco. Cerca de los 280 metros la profundidad disminuye, indicando un registro de 4.50 m de profundidad. La disminución de profundidad al final de cada gráfica representa el hecho de estar cerca del recinto fiscal. Esto suele suceder por la sedimentación de partículas. En ocasiones suele ser intencional, pues funciona para estabilizar el área de la estructura. En la mayoría de los casos, es por un proceso natural. Ya que se encuentra con un obstáculo físico, el mar ya no puede seguir arrastrando partículas sedimentarias, ocasionando que permanezcan ahí. No obstante, llama la atención el inicio en la gráfica de la Dársena Norte. Ese fragmento es paralelo al muelle flotante, donde la profundidad tendría que ser mayor. La razón a esta cuestión puede ser el proceso de dragado. Durante el proceso, se remueven grandes cantidades de tierra, pero se puede observar que cierta cantidad de partículas de sedimentación suelen escapar o no ser adquiridas correctamente. Por lo tanto, la disminución de profundidad en esa área puede ser debida a la acumulación de sedimentos ocasionados indirectamente por la draga.

9. CONCLUSIONES

- Durante el estudio, se identificaron varios factores claves para la realización de los levantamientos batimétricos: el personal capacitado para este tipo de estudios, incluyendo a un experto en hidrografía; los dispositivos correctos para el levantamiento como el sistema GNSS, la ecosonda multihaz y un vehículo adecuado para el estudio; así también hay factores que no están al alcance del investigador como fenómenos naturales o intervención de terceros. Esto se puede verificar en las figuras 10 a 13, así como los anexos del 1 al 4.
- Los datos fueron procesados para su corrección, buscando que sean lo más preciso posible al tomar en cuenta factores como la velocidad del sonido, el calado y la marea; por lo que los datos puedan ser interpretados correctamente por el usuario a través de programas de sistemas de información geográfica. Esto se puede observar en las figuras 16 y 17, las cuales muestran los perfiles topográficos y las pendientes cuyos datos fueron procesados a través de HYPACK y QGIS.
- Como se puede observar en la Figura 15, el mapa generado a partir del estudio cerca de los puertos en la Bahía de Amatique detalla correctamente el relieve del suelo marítimo en la zona, tomando en cuenta las profundidades, las pendientes y las curvas de nivel; así como la inclusión de cualquier característica relevante que ayude a la comprensión de este.

10. RECOMENDACIONES

- Para cualquiera que esté interesado en realizar estudios en cuerpos marítimos, verificar la batimetría de la zona ya que puede el previo conocimiento del relieve puede facilitar los estudios.
- Verificar la programación e itinerario de los buques que atracaran o zarparan de los muelles para evitar cualquier inconveniente.
- En ocasiones, algunos levantamientos duraran varios días o incluso semanas, por lo que se requiere de ciertos gastos en estadía u otras comodidades básicas.
- A las instituciones gubernamentales se le solicita facilitar la obtención de la información relacionada con levantamientos hidrográficos pasados, en especial en aguas de poca profundidad.
- Se le recomienda a los puertos marítimos del país tener el personal adecuado para sus respectivas actividades con el objetivo de evitar cualquier inconveniente.
- A la Universidad del Valle de Guatemala se le solicita que considere las aplicaciones y ventajas que los cuerpos de agua marítimo puedan brindar al conocimiento de alumnos y profesores.
- Algunos estudios duran pocas horas, pero otros pueden duran casi un día entero, por lo que se le recomienda a todo interesado en el tema estar preparado por si el tiempo en la embarcación se extiende.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Administration, N.O.A. (2021). What is lidar? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>
- Alexandros, M., Bonovas, M., & Belibassakis, K. (2020). Hydronamic analysis of Surge-Type Wave Energy Devices in variable bathymetry by means of BEM. *Fluids*, 5(2), 99.
- Alvarado, L. (2022). ¿Qué es el comercio marítimo y cuál es su importancia? <https://www.udelistmo.edu/blogs/comercio-maritimo>
- Amoroso, P., & Parente, C. (2021). The importance of sound velocity determination for bathymetric survey. *Acta IMEKO*, 46-47.
- Arseni, M., Rosu, A., Puiu, L., & Murariu, G. (2016). Single Beam acoustic depth measurement techniques and bathymetric mapping for Catusa Lakegalati. *Annals of the University Dunarea de Jos of Galati*, 281-288.
- Castro, E. (2021). Estudio Espacial de Datos Batimétricos obtenidos con ecosonda entre Huatajata y Bahía Cohana, Sector Lago menor del Titicaca.
- Chakraborty, B., & Fernandes, W. (2012). Bathymetric Techniques and Indian Ocean Applications. *Bathymetry and its Applications*, 03-30.
- Chapapría, V. (2014). Obras Marítimas.
- Chua, Y., & Wong, S. (2002). Data intermediation and beyond: How the Web modifies the dissemination of GIS information. *Proceedings of the First Annual Conference on PPGIS*, 21-23 July, New Brunswick, NJ, 161-171.
- Código Civil, Ley Número 106 (1963).
- Constitución de la República de Guatemala (1986).
- de Lange, N. (2023). Geoinformatics in Theory and Practice: An Integrated Approach to Geoinformation Systems, Remote Sensing and Digital Image Processing.
- DeMers, M. (2008). Fundamentals of Geographic Information Systems.
- Dendinger, R. (2004). Guatemala (Modern World Nations).
- Dierssen, H., & Theberge Jr, A. (2020). Bathymetry: Assessing Methods. *Coastal and Marine Environments*, 175-184.
- Doneus, M., Miholjek, M., Mandlbürger, M., Doneus, N., Verhoeven, N., Briese, N., & Pregeßbauer, M. (2015). Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water.
- El-Hattab, A. (2014). Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 189-195.
- Feingold, S., & Willige, A. (2024). These are the world's most vital waterways for global trade. <https://www.weforum.org/agenda/2024/02/worlds-busiest-ocean-shipping-routes-trade/>
- Gaythwaite, J. (2016). Design of Marine Facilities.
- Godenau, D., & Buraschi, D. (2019). Las migraciones marítimas irregulares: las islas en la red de rutas.
- Goodchild, M. (2009). Geographic information system. *Annals of GIS*, vol. 15, no 1, 3-9.
- Gracia, M., & Santos, F. (2021). Estudio de la técnica de batimetría, errores asociados a la metodología e instrumental empleado y generación de un modelo digital del fondo de un cuerpo de agua.

- Graser, A. (2016). *Learning QGIS*. Packt.
- Guan, M., et al. (2019). An Effective Method for Submarine Buried Pipeline Detection via Multi-Sensor Data Fusion. *IEEE Access 2019 Vol. 7*, 125300-125309.
- Hare, R., Eakins, B., & Amante, C. (2011). Modelling Bathymetric Uncertainty. *The International Hydrographic Review*, 31-42.
- Islam, S., Miles, S., Menke, K., Smith Jr, R., Pirelli, L., & Van Hoesen, J. (2019). Mastering Geospatial Development with QGIS 3.x Third Edition.
- Kaplan, E., & Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Artech House.
- Koubarakis, M., Karpathiotakis, M., Kyzirakos, K., Nikolaou, C., & Sioutis, M. (2012). Data Models and Query Languages for Linked Geospatial Data. *Reasoning Web - Semantic Technologies for Advanced Query Answering*, 290-328.
- Li, M., et al. (2023). Potential of Offshore Wind Energy in Malaysia: An Investigation into Wind and Bathymetry Conditions and Site Selection. *Remote Sensing*, 17(1), 65.
- López, H. (2015). Calibración de estaciones hidrométricas para la vertiente del Mar Caribe en la República de Guatemala.
- Maas, S. F., & Váldez, M. E. (2003). Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada.
- Mahmud, M. R., & Tang, K. K. (2021). The Accuracy of Satellite Derived Bathymetry in Coastal and Shallow Water Zone. *International Journal of Built Environment and Sustainability Vol. 8(3)*, 01-08.
- Makar, A. (2022). Simplified Method of Determination of the Sound Speed in Water on the Basis of Temperature Measurements and Salinity Prediction for Shallow Water Bathymetry. *Remote Sensing*, 636.
- Markoski, B. (2018). *Basic Principles of Topography*. Springer Geography.
- Mateo-Pérez, V., Corral-Bobadilla, M., Ortega-Fernández & Vergara-González, E. (2020). Port bathymetry mapping using support Vector machine technique and Sentinel-2 satellite imagery. *Remote sensing*, 12(13), 2069.
- Mavraeidopoulos, A., Pallikaris, A., & Oikonomou, E. (2017). Satellite derived Bathymetry (SDB) and safety of navigation. *The International Hydrographic Review*, 7-20.
- Mayer, L. (2016). History of Bathymetry: Early Methods. <https://medium.com/@larrymayerunh/history-of-bathymetry-early-methods-3ba759fbcf6c>
- Merino, Á. (2021). ¿Cuánto contamina cada tipo de barco? <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/contaminacion-barcos/>
- Mokhtar, K., Chua, L. F., Abdullah, M. A., Oloruntobi, O., Ruslan, S. M., Albasher, G., Ali, A., & Akhtar, M. S. (2023). Assessing coastal bathymetry and climate change impacts on coastal ecosystems using Landsat 8 and Sentinel-2 satellite imagery. *Environmental Research*, 239, 117314.
- Monteys, X., Harris, P., Caloca, S., & Cahalane, C. (2015). Spatial Prediction of Coastal Bathymetry Based on Multispectral Satellite Imagery and Multibeam Data. *remote sensing*, 13782-13806.
- Moreno, J. M. A. (2022). Diseño e implementación de una aplicación de usuario para la optimización de rutas de navegación.

- Mueller, N. (2023). Transporte marítimo: la contaminación olvidada. <https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/transporte-maritimo-la-contaminacion-olvidada>
- Nagababu, G., et al. (2017). Feasibility study for offshore wind power development in India based on bathymetry and reanalysis data. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- National Geospatial-Intelligence Agency. (2018). The American Practical Navigator 'Bowditch' 2017 Edition - Volume 1.
- Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). Open Source GIS: A GRASS GIS Approach.
- NGA. (2010). *Nautical Chart 28165 Puerto Santo Tomas de Castilla y Puerto Barrios*. Recuperado el 10 de abril del 2025.
- Olsen, A. A. (2023). Merchant Ship Types.
- Pandey, J., & Pathak, D. (2014). Geographic Information System.
- Pérez Navarro, A., Botella Plana, A., Muñoz Bollas, A., González, R. O., Olmedillas Hernández, J. C., & Rodríguez Lloret, J. (2011). Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática.
- Postma, H. (2023). What is a Nautical Chart? Everything you need to know. <https://es.savvy-navvy.com/blog/what-is-a-nautical-chart>
- Prevost, J. (2010). Caribbean Sea.
- Ramírez, S., & Ortiz, J. R. (2019). Océanos y ecosistemas marino-costeros. *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala*, 170-191.
- Romero, R., & Esteve, A. (2017). Transporte marítimo de mercancías.
- Ros, R. M. (2005). El Planisferio Y 40 Actividades Más.
- Rossi, L., Mammi, I., & Pelliccia, F. (2020). UAV-Derived Multispectral Bathymetry. *Remote Sensing*, 01-20.
- Shi, W., Xie, C., & Huang, Z. (2023). Multibeam bathymetry optimization problem based on geometric modeling and simulated annealing. *Journal of Electrotechnology, Electrical Engineering and Management*, 6(5), 115-124.
- Spilsbury, L., & Spilsbury, R. (2016). Drones.
- Tatsuyuki, S., Yamashita, Y., Okumura, T., & Yamanokuchi, T. (2019). Satellite Derived Bathymetry Using Machine Learning and Multi-Temporal Satellite Images. *Remote Sensing*, 01-19.
- Tercero, H. (2007). *El catastro y la tecnología moderna [Tesis en Licenciatura en Ingeniería Civil]*. Universidad del Valle de Guatemala.
- Terrasa, D. (2022). Golfo de Honduras. <https://geografia.laguia2000.com/geografia-regional/america/golfo-de-honduras>
- Traganos, D., et al. (2018). Estimating Satellite-Derived Bathymetry (SDB) with the Google Earth Engine and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 10(6), 859.
- Wolfl, A., et al. (2019). Seafloor Mapping – The Challenge of a Truly Global Ocean Bathymetry. *Frontiers in Marine Science*.
- Xiao, Y., & Li, T. (2023). Smart Ships.
- Xiong, C.-B., et al. (2016). New method for inspecting the status of submarine pipelines based on a multi-beam bathymetric system. *Journal of Marine Science and Technology*, 24(4), 876-887.

- Yáñez, A., Zárate, D., M, G., R, G., & V, S. (1999). The ecosystem framework for planning and managment the Atlantic coast of Guatemala. *Ocean I& Costal Managmente* 42, 283-317.
- Yeu, Y., Yee, J.-J., Yun, H. S., & Kim, K. B. (2018). Evaluation of the Accuracy of Bathymetry on the Nearshore Coastlines of Western Korea from Satellite Altimetry, Multi-Beam, and Airborne Bathymetric LiDAR. *Sensors*, 2926.
- Zhao, J., et al. (2017). A new method for weakening the combined *effect* of residual errors on multibeam bathymetric data. *Marine Geophysical Research Vol. 35*, 379-394.

12. APÉNDICES

Figura 18. Anexo 1 - Radar listo de Seapath

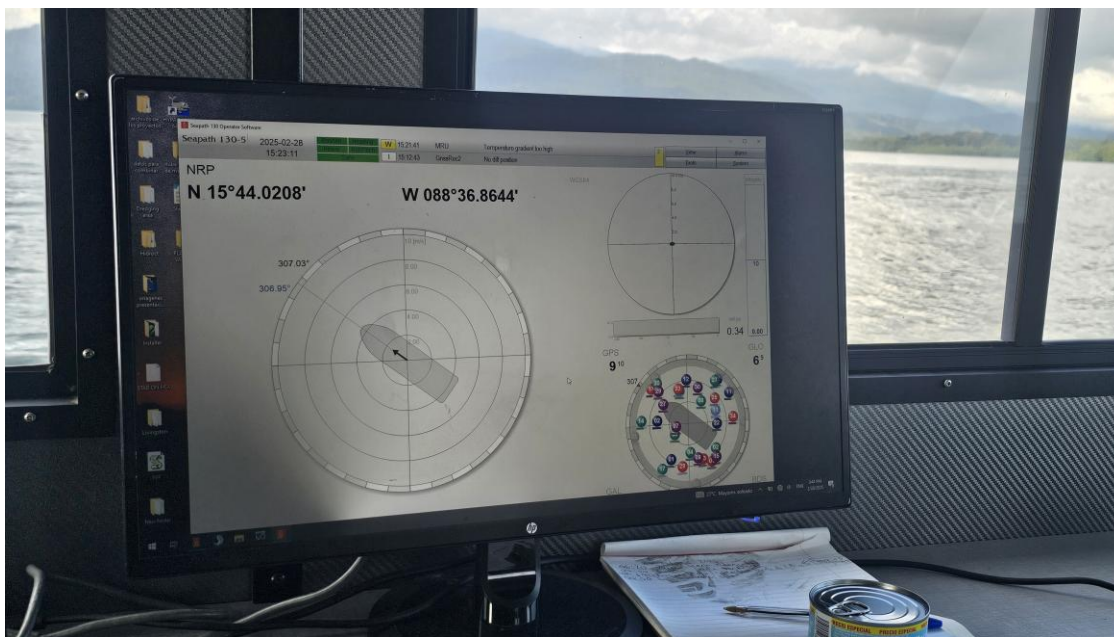


Figura 19. Anexo 2 - Planeamiento de líneas en HYPACK

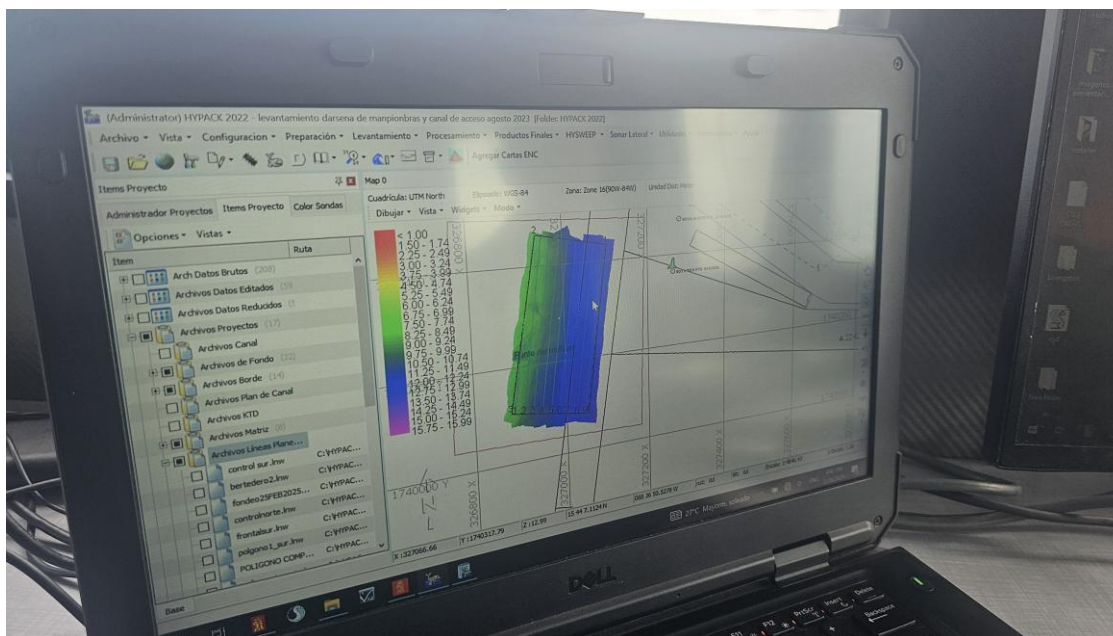


Figura 20. Anexo 3 - Estatus del levantamiento

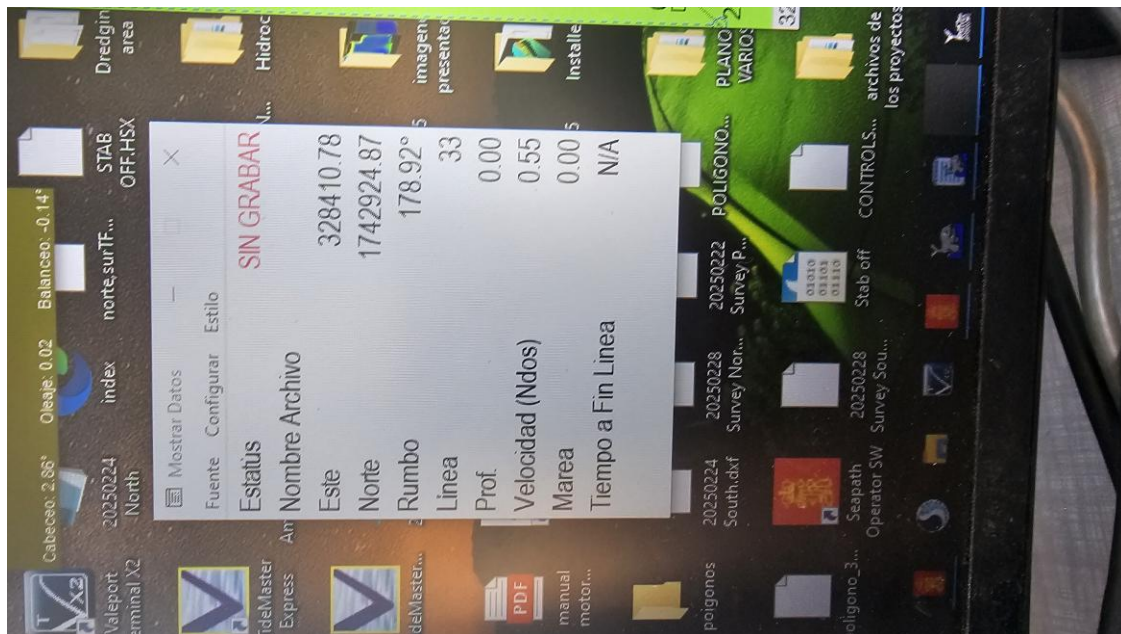


Figura 21. Anexo 4 - Embarcación en Hypack. Observe que la embarcación está fuera del rango del plan de líneas

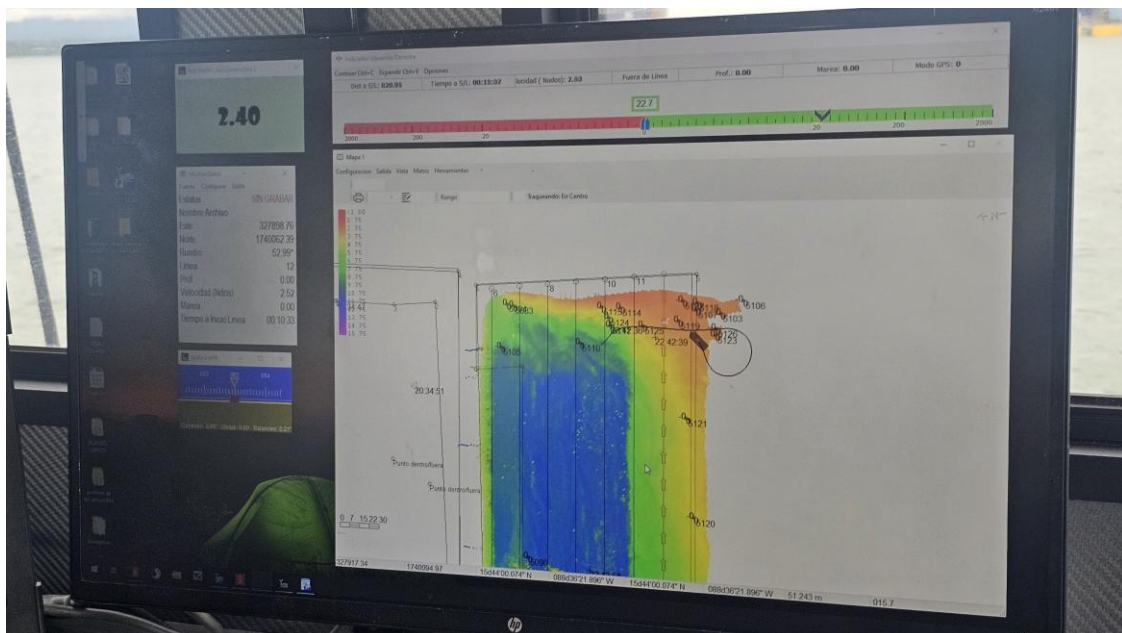


Figura 22. Anexo 5 - Monitoreo del Levantamiento



Figura 23. Anexo 6 - Lancha hidrográfica atracada



Figura 24. Anexo 7 - Dispositivo principal del DIGIBAR PRO



Figura 25. Anexo 8 - Sensor del mareógrafo. Ubicado en Puerto Santo Tomás de Castilla

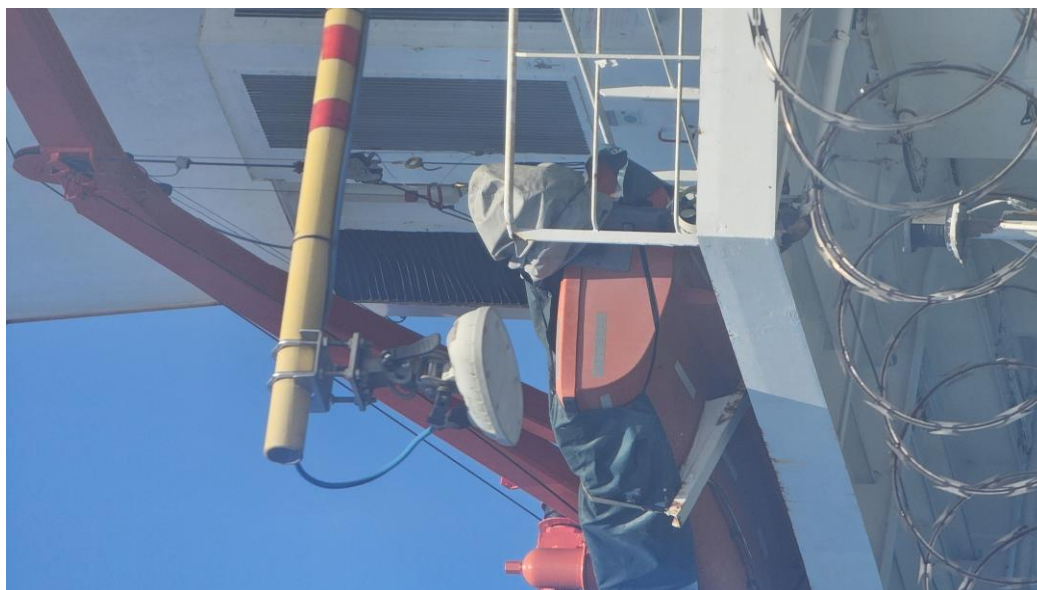


Figura 26. Anexo 9 - Datasheet de multihaz EM 2040P

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Frequency range:	200 to 400 kHz
Beam width:	1 * 1 degree at 400 kHz
Max ping rate:	50 Hz
Swath coverage sector:	Up to 140 degrees
Sounding patterns:	Equiangular, equidistant and high density
No. of soundings per ping:	400 (single swath) 800 (dual swath)
Roll stabilised beams:	+/-15 degrees
Pitch stabilised beams:	+/-10 degrees
Yaw stabilised beams:	+/-10 degrees

Coverage example for EM 2040P with bottom type rock (BS = - 10 dB), NL = 45 dB, FM mode				
	Coald ocean		Cold fresh water	
Operating mode	Max depth	Max coverage	Max depth	Max coverage
200 kHz	600 m	830 m	600 m	1770 m
300 kHz	450 m	610 m	600 m	1000 m
400 kHz	270 m	360 m	380 m	500 m

Pulse lengths	200 kHz mode		300 kHz mode		400 kHz mode	
	CW	FM	CW	FM	CW	FM
Normal mode	38, 108 and 324 µs	3 and 12 ms	38, 108 and 324 µs	2 and 6 ms	27, 54 and 108 µs	N/A
Single sector mode	19, 38 and 81 µs	1.5 ms	19, 38 and 81 µs	1.5 ms	14, 27 and 54 µs	N/A

Physical dimensions (excluding connectors and mounting arrangements)			
Sonar head	482 x 298 x 166 mm (LxWxH)	19.5 kg (1.7 kg in water)	Depth rating 30 m
Processing unit (2U 19" rack)	482.5 x 424 x 88.6 mm (WxDxH)	10.5 kg	NA
Processing unit - Splash proof	370 x 390 x 101 mm (WxDxH)	10.5 kg	IP67

Laptop, HWS and monitor can be delivered on request.

Figura 27. Anexo 10 - Datasheet de Seapath 130

Technical specifications

Seapath® 130 series

Interfaces

Communication ports	3 serial RS-232/RS-422 lines and 8 Ethernet UDP/IP ports
Data output interval	Programmable in 0.01-second steps and 1PPS pulse
Data output rate	Up to 100 Hz

GNSS signal tracking

GPS	L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5
GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3, L5
Galileo	E1, E5 AltBOC, E5a, E5b, E6
BeiDou	B1I, B1C, B2I, B2a, B2b, B3I
QZSS	L1 C/A, L1C, L1S, L2C, L5, L6

Power specifications

Sensor Unit	24 VDC, 10 W
IMU	24 VDC, 12 W

Weights and dimensions

Sensor Unit	7.7 kg, 1210 × 210 × 94 mm
MRU in light-weight bottle	3.7 kg, Ø 120 × 241 mm
miniMRU	0.5 kg, 100 × 80 × 48 mm
MGC	8.1 kg, 188 × 189 × 189 mm

Environmental specifications

Operating temperature range

Sensor Unit	-40 - 70 °C
MRU/miniMRU	-5 - 55 °C
MGC	-15 - 55 °C

Humidity

Sensor Unit	Hermetically sealed
IMU subsea housing	Hermetically sealed

Specifications are valid without multipath, without shadowing of antenna and for typical survey operations.

Figura 28. Anexo 11 - TideGauge Valveport

Pressure Transducer Option											
Type:	Vented strain gauge, with stainless steel mounting bracket.										
Range:	Standard 10 dBar (~10m) with 20m cable Other ranges and lengths available.										
Accuracy:	±0.1% Full Scale.										
Calibration:	Held within logging unit.										
Dimensions:	18mm diameter x 80mm.										
Radar Level Sensor Option (see VRS-20 data sheet for full details)											
Minimum Range:	0.8 m										
Maximum Range:	20 m										
Beam Angle:	±6°										
Frequency:	25 GHz										
Accuracy:	±10 mm										
Precision:	1 mm										
Footprint:	Radius at different ranges:										
	<table> <tr> <th>Range (m)</th><th>Radius (m)</th></tr> <tr> <td>2</td><td>0.21</td></tr> <tr> <td>5</td><td>0.53</td></tr> <tr> <td>10</td><td>1.05</td></tr> <tr> <td>20</td><td>2.10</td></tr> </table>	Range (m)	Radius (m)	2	0.21	5	0.53	10	1.05	20	2.10
Range (m)	Radius (m)										
2	0.21										
5	0.53										
10	1.05										
20	2.10										
Weather Sensor Options											
Windsonic Ultrasonic Anemometer											
Wind Speed:	0-60m/s										
Wind Direction:	0-359°										
Calibration:	Held within sensor.										
Dimensions:	142mm x 160mm.										
MetPak II TM Weather Station											
Wind Speed:	0-60m/s										
Wind Direction:	0-359°										
Air Temperature:	-35°C to +70°C										
Relative Humidity:	0 – 100% RH										
Barometric Press:	600 – 1100 hPa/mbar										
Dew Point:	As per temperature range										
Calibration:	Held within sensor.										
Dimensions:	142mm x 274mm.										
Logging Unit											
Housing:	Injection moulded housing rated to IP67, with injection moulded mounting bracket.										
Display:	128x64 OLED panel for system configuration and data display.										
Power:	4 "C" cells within separate sealed compartment. - Tool-less battery change. - Alkaline cells provide power for up to a year of autonomous sampling										