



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de la altimetría láser por satélite al mapeado
topobatimétrico de la costa*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Luis Delgado Solano

DIRECTOR: Iván Puente Luna

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Aplicación de la altimetría láser por satélite al mapeado
topobatimétrico de la costa*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Las batimetrías en zonas costeras juegan un papel esencial para la navegación. De su análisis durante un cierto periodo de tiempo se pueden llegar a determinar cambios topobatimétricos bajo la acción del oleaje, las corrientes y el viento, que generan variaciones en la morfodinámica de las playas. En el ámbito de la Defensa y Seguridad, esta situación cambiante obliga a los Infantes de Marina a realizar constantes tareas manuales de reconocimiento de los fondos marinos durante sus desembarcos en playas desde las unidades a flote. En este sentido, la altimetría láser de alta resolución mediante el satélite ICESat-2 (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite), lanzado en 2018 por la NASA, ofrece una nueva fuente de datos de acceso libre dedicada al estudio de la superficie terrestre.

Con este trabajo se busca tanto el acceso como el procesado de los datos altimétricos que permitan un posterior análisis de la topografía de las playas para facilitar al desembarco. Para comprobar la aplicabilidad de esta técnica, se seleccionarán dos zonas de interés, estudiando su morfología y su evolución temporal, apoyados en herramientas SIG.

PALABRAS CLAVE

Altimetría láser, ICESat-2, Open Altimetry, topobatimetría, operaciones anfibias

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi madre por haberme apoyado siempre en todas mis decisiones y enseñarme que las cosas en la vida se consiguen con esfuerzo.

A mi padre por ser un ejemplo como persona y a enseñarme esa tranquilidad en los momentos de mayor exigencia.

A mis hermanos, por haber sido siempre un pilar fundamental en los que apoyarme.

A mis abuelos, especialmente a mi abuelo Carlos, por enseñarme a sacar ese lado positivo en la vida incluso en las peores situaciones.

A todo el personal docente de la Escuela Naval Militar, civiles y militares, por su formación en valores que nos han permitido forjarnos como oficiales de la Armada. Especialmente al Sr. Puente por su gran ayuda y dedicación en este trabajo.

A mis amigos por haber estado siempre ahí en los momentos más difíciles.

Quiero dejar para el final a todos mis compañeros de la promoción 424-154 (ST) especialmente a la Porsi y Superpiv@s, esas personas que empezaron siendo unos desconocidos y que sin duda se han convertido en amigos para toda la vida. Gracias por haber sacado siempre una sonrisa en los peores momentos, sin duda que estos 5 años sin vosotros no hubiesen sido lo mismo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Objetivos	8
2 Estado del arte	9
2.1 Introducción a la altimetría satelital.....	9
2.1.1 Altimetría láser satelital	10
2.1.2 Satélite ICESat-2	11
2.1.3 Láser ATLAS.....	12
2.2 Otros tipos de altimetría láser	15
2.2.1 Altimetría láser aerotransportada (ALS)	15
2.2.2 Altimetría láser terrestre (TLS)	16
2.3 Batimetría.....	17
2.3.1 Historia y batimetría en la Armada.....	18
2.3.2 Batimetría por teledetección	20
2.3.3 Batimetría por haz acústico	20
2.3.4 Batimetría mediante tecnología LiDAR	21
3 Desarrollo del TFG.....	23
3.1 Introducción	23
3.1.1 Material y métodos	23
3.1.2 Zonas de estudio	24
3.2 Obtención de los datos	25
3.2.1 Open Altimetry	26
3.3 Importación de datos en QGIS.....	33
3.4 Código Python para obtener la batimetría.....	39
4 Resultados	44
4.1 Resultados de la Ría de Corcubión	44
4.1.1 Resultados del producto ATL13.....	44
4.1.2 Resultados del producto ATL08.....	46
4.2 Resultados de la playa del Retín	49

4.2.1 Resultados del producto ATL03	49
4.2.2 Estudio multitemporal	54
4.3 Comparación del código (ATL03) con QGIS (ATL13)	58
5 Conclusiones y líneas futuras	60
5.1 Conclusiones	60
5.2 Líneas futuras	61
6 Bibliografía.....	62
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	65
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	66
Anexo III: Código para la obtención de la batimetría	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Sección de reconocimiento desembarcando en playa.....	8
Figura 2-1 Satélite Cryosat-2 orbitando sobre la Tierra.....	10
Figura 2-2 ICESat-2 lanzado en un cohete Delta II el 15 de septiembre de 2018	11
Figura 2-3 Láser ATLAS integrado en el satélite ICESat-2	12
Figura 2-4 Productos ATLAS	14
Figura 2-5 Organización de los haces del ICESat-2.....	15
Figura 2-6 Componentes sistema LiDAR YellowScan.....	16
Figura 2-7 Altimetro láser móvil acoplado a un vehículo.....	16
Figura 2-8 Carta Pisana	18
Figura 2-9 Buque hidrográfico de la Armada A-31 Malaspina.....	19
Figura 2-10 Levantamiento batimétrico a través de ecosonda por multihaz.....	21
Figura 2-11 Principio de funcionamiento de un sistema LIDAR aerotransportado	22
Figura 3-1 Localización de la Ría de Corcubión.....	24
Figura 3-2 Playa de estudio de la zona del Retín	25
Figura 3-3 Explore Data NSIDC	25
Figura 3-4 Acceso de datos a Open Altimetry	26
Figura 3-5 Interfaz del ICESat-2 en Open Altimetry	27
Figura 3-6 Interfaz del Open Altimetry en el Ártico.....	27
Figura 3-7 Ejemplo trayectoria ICESat-2 con sus fechas.....	28
Figura 3-8 Menú de iconos de Open Altimetry.....	29
Figura 3-9 Capa de nubes Open Altimetry.....	30
Figura 3-10 Ejemplo de selección de datos de un área determinada.....	30
Figura 3-11 Ejemplo de datos del ATL08 obtenidos de un área determinada	31
Figura 3-12 Ejemplo para importar un archivo CSV en la herramienta Power Query de Excel	32
Figura 3-13 Importación de un archivo CSV en un libro de Excel	32
Figura 3-14 Tabla de datos del ATL13 en Excel	33
Figura 3-15 Selección de la zona de estudio	34
Figura 3-16 Ejemplo de datos en formato CSV	34
Figura 3-17 Ejemplo para la importación de los datos de un archivo CSV a QGIS	35
Figura 3-18 Nube de puntos del ATL13 obtenidos del satélite ICESat-2.....	36
Figura 3-19 Área seleccionada para la descarga del PNOA.....	36
Figura 3-20 Estudio topobatimétrico integrando datos del PNOA y del ICESat-2.....	37
Figura 3-21 Interpolación TIN	38
Figura 3-22 Parámetros interpolación TIN.....	38

Figura 3-23 Perfil de elevación	39
Figura 3-24 Playa del CASR a estudiar.....	39
Figura 3-25 Fotonos de la playa de estudio en Open Altimetry	40
Figura 3-26 Bloque 3 y 4 del código	40
Figura 3-27 Bloque 5 del código, dibujar el área de interés.....	41
Figura 3-28 Bloque 6 y 7 del código	41
Figura 3-29 Confirmación de que los datos introducidos son los correctos.....	42
Figura 3-30 Bloque 11 y 12 del código	42
Figura 4-1 Modelo MDT de la ría de Corcubión	44
Figura 4-2 Carta náutica de la ría de Corcubión	45
Figura 4-3 Perfil de elevación ampliado de la Ría de Corcubión	45
Figura 4-4 Datos importados del ATL08 en la Ría de Corcubión	46
Figura 4-5 Parámetros en Excel del ATL08.....	47
Figura 4-6 Perfil topográfico ATL08 en la Ría de Corcubión	47
Figura 4-7 Interfaz programa CDN para conversor de alturas	48
Figura 4-8 Perfil topográfico del ATL08 ampliado	48
Figura 4-9 Cota del ICESat-2 a 522,8 metros	49
Figura 4-10 Cota del PNOA a 467,7 metros	49
Figura 4-11 Tabla de parámetros del ATL03 en Excel	50
Figura 4-12 Perfil topográfico de los fotonos del ATL03 en QGIS	50
Figura 4-13 Perfil topográfico ampliado de los fotonos del ATL03 en QGIS	51
Figura 4-14 Batimetría de la playa del Retín del 23/08/2023	51
Figura 4-15 Bloque 27 del código	52
Figura 4-16 Gráfica de la batimetría en los primeros 100 metros.....	53
Figura 4-17 Estimación varada de las LCM.....	53
Figura 4-18 Carta náutica de la playa del Retín	54
Figura 4-19 Fotonos recibidos en la fecha del 23 de febrero de 2023.....	55
Figura 4-20 Batimetría estimada el 23 de febrero de 2023	55
Figura 4-21 Fotonos recibidos en la fecha del 27 de agosto de 2021.....	56
Figura 4-22 Batimetría estimada del 27 de agosto de 2021	56
Figura 4-23 Estimación primeros 100 metros de playa en 2021	57
Figura 4-24 Fotonos recibidos del 1 de junio de 2019	57
Figura 4-25 Batimetría estimada del 1 de junio de 2019	58
Figura 4-26 Haz para comparar la batimetría.....	58
Figura 4-27 Perfil topográfico del haz 809 el 13 de mayo de 2023	59
Figura 4-28 Batimetría haz 809 del 13 de mayo de 2023 en la ría de Corcubión.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Productos disponibles de ATLAS para ICESat-2	14
--	----

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En el ámbito de las operaciones anfibias tiene una gran relevancia el estudio del terreno y, sobre todo, el de las playas y zonas próximas a la línea de costa, donde las distintas embarcaciones y lanchas van a varar en una operación anfibia en las distintas misiones de la Infantería de Marina. Es por ello, que es de suma importancia disponer de sistemas que permitan reconocer el terreno y obtener datos batimétricos fiables cuando se va a realizar una operación anfibia.

El empleo de sistemas de mapeado batimétricos de una zona de desembarco posibilita una mayor rapidez de acción además de una mejora en la seguridad al no tener que exponer al personal en una zona de costa potencialmente hostil y desconocida.

Además, permite establecer con exactitud los canales de entrada a playa, así como los distintos puestos de escucha en costa e itinerarios a seguir en una operación.

Actualmente los encargados de realizar este reconocimiento son las secciones de Reconocimiento de los batallones de desembarco (SERECO), la Compañía de reconocimiento del Batallón de Cuartel General y la Fuerza de Guerra Naval Especial (FGNE). Estos equipos disponen de equipos, cartas y todo tipo de material para realizar este trabajo, siendo unas fuerzas de gran importancia.

Existe en órbita un satélite de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio), el ICESat-2 (Ice Cloud and Land Elevation) [1], que mediante un potente láser proporciona una serie de datos topográficos de manera gratuita y accesibles a todo el público. Éstos se irán analizando a lo largo del trabajo y se van a tomar como herramienta fundamental para intentar conseguir modelos topobatimétricos de determinadas zonas de estudio.

Este trabajo consta de dos partes: una primera, de familiarización con el manejo de los datos del satélite ICESat-2 de la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio), donde se detallan los pasos necesarios para su descarga, mediante la aplicación de Open Altimetry del NSIDC (Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo) [2]. Y una segunda parte, donde se estudia la morfología de dos zonas costeras diferentes, integrando los datos satelitales con otros derivados del PNOA (Plan Nacional de Ortografía Aérea), y apoyando ambos estudios en la herramienta de software SIG QGIS. De esta manera, se podrán obtener resultados topobatimétricos en el ámbito militar que faciliten a la Infantería de Marina poder disponer de esta herramienta en su planeamiento del estudio del terreno.

Además, este proyecto ofrecerá una solución al mapeo topobatimétrico de la costa, en consonancia con la línea estratégica de la ETID-2020 [3] sobre desarrollo de sistemas de apoyo al conocimiento del entorno marino.

1.2 Planteamiento del problema

El planteamiento de este trabajo se concibe dentro del ámbito de las operaciones anfibia, y es por ello por lo que será necesario en primer lugar definir lo que es una operación anfibia, concebida como:

“Operación militar lanzada desde la mar por una fuerza naval y una fuerza de desembarco, embarcadas en buques o embarcaciones, con el propósito principal de proyectar tácticamente la LF en tierra en un ambiente que puede ir de lo permisivo a hostil” [4].

Dentro de las fases de una operación anfibia está la de “Preparación”, donde se realizan todas las acciones necesarias para la conformación de la zona previa a un desembarco anfibia. Con este trabajo se persigue modernizar este procedimiento de reconocimiento de playas de tal forma que se facilite desde un primer instante el planeamiento de una operación anfibia y con la mayor seguridad posible sin tener que exponer a personal militar en una playa hostil o potencialmente hostil.

Una de las decisiones básicas del planeamiento anfibia es la selección de las playas de desembarco, donde el motivo principal de estos reconocimientos es poder recoger toda la información posible acerca de la topografía, del enemigo y de otros factores como los meteorológicos. En función del gradiente, la viabilidad de varada es normalmente uno de los principales criterios decisionales de selección en una playa de desembarco.

El origen de esta actividad tiene lugar durante la Segunda Guerra Mundial y el primer país en ponerlo en práctica fue Estados Unidos. Al principio, eran unidades independientes de voluntarios llamados Naval Combat Demolition Units (NCDU), que estaban constituidos por un oficial al mando y cinco soldados; la misión de estas unidades era abrir, por medio de explosivos llevados a nado hasta la playa, una serie de canales libres de obstáculos entre las defensas de playas, de tal manera que permitiera el acceso a playa a las primeras olas de desembarco.

Una vez establecida una cabeza de playa (es el área segura y controlada por las fuerzas invasoras en la costa, desde donde pueden expandir sus operaciones y asegurar la entrada de tropas y suministros), los NCDU limpiaban completamente de obstáculos la playa y posteriormente, abrían canales más profundos para facilitar el acceso a la playa de las grandes embarcaciones que transportaban el material destinado al apoyo logístico. Este personal sufría más del 60% de bajas. Estas unidades, al principio independientes, se reagruparon más tarde para formar las unidades Underwater Demolition Teams, UDT (Unidades de Demolición Submarina). Más tarde y como consecuencia de las necesidades originadas por las características fluviales de diversas zonas de combate en Vietnam, nacieron los "SEAL-TEAM", a los que se le asignaba esta misión de Reconocimiento.

En España, esta misión se le encargó a la UEBC (Unidad Especial de Buceadores de Combate), unidad que se fusionó en 2009 con la Unidad de Operaciones Especiales (UOE) constituyendo la actual Fuerza de Guerra Naval Especial (FGNE). Esta unidad, junto a las compañías de reconocimiento de los batallones (Figura 1-1) y la Compañía de Reconocimiento y Adquisición de Blancos (TAR) del Batallón de Cuartel General, son los encargados de llevar a cabo estas operaciones [5].

Hoy en día estas técnicas de reconocimiento en playas de manera táctica siguen siendo muy rudimentarias, lentas y tediosas. Es por ello por lo que surge la necesidad de estudiar un nuevo método dónde no se exponga personal en las playas, donde la selección de las playas de desembarco sea un sistema fácil, rápido y, sobre todo, efectivo. Por eso las nuevas tecnologías de teledetección satelital, como es el caso del sistema ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) que incorpora el satélite ICESat-2, brindarían una mejora en la gestión del tiempo y la seguridad, que servirían asimismo de apoyo en el planeamiento eficiente de las operaciones anfibia a la hora de estudiar las playas de desembarco.



Figura 1-1 Sección de reconocimiento desembarcando en playa [5]

1.3 Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado consiste en obtener e interpretar los productos de datos del satélite de la NASA ICESat-2 a nivel usuario para poder realizar estudios topobatimétricos de la costa, pudiendo igualmente integrar estos datos satelitales con otros datos del PNOA, mejorando así las necesidades identificadas en la actualidad en las misiones de reconocimiento de fondos que realizan las unidades de Infantería de Marina en las playas de desembarco, en el marco de las operaciones anfibias.

Para poder alcanzar este objetivo final, hace falta alcanzar una serie de objetivos intermedios:

- Obtener los datos del satélite ICESat-2 procesados en diferentes productos ATL y adquirir las habilidades necesarias para interpretarlos, con el fin de llevar a cabo un estudio detallado de la morfología costera. Para ello, será necesario aprender a acceder a los datos del ICESat-2 a través de los repositorios adecuados, comprender los formatos de datos utilizados y familiarizarse con las técnicas de análisis batimétrico.
- Adquirir competencias en el uso de software SIG (Sistemas de Información Geográfica), y en particular del QGIS, como la importación de datos, la creación de mapas, la realización de análisis espaciales y la generación de informes para visualizar y analizar los datos recopilados del ICESat-2.
- Adquirir habilidades de programación en Python para manipular y analizar eficientemente los datos del ICESat-2, lo que permite realizar procesamientos personalizados y automatizados.
- Desarrollar un enfoque innovador para analizar las características de las playas utilizando datos del ICESat-2, con el fin de mejorar la planificación y ejecución de operaciones anfibias.
- Fortalecer la comprensión de los principios de la topografía informática, incluyendo sistemas de coordenadas, representación de datos en forma de nubes de puntos y modelos digitales del terreno (MDT).

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se introduce, en primer lugar, la altimetría satelital, explicando los distintos tipos que existen. A continuación, se profundiza en el satélite ICESat-2 como ejemplo de altimetría láser por satélite y que será la principal fuente de obtención de datos en este Trabajo de Fin de Grado. También se mencionarán otros tipos de altimetría láser. Finalmente, se hará hincapié en la batimetría, aportando una breve reseña histórica, su papel en la Armada Española y revisando las distintas tecnologías existentes en la actualidad para conseguir ésta.

2.1 Introducción a la altimetría satelital

La altimetría consiste en una ciencia que pertenece a la topografía que se encarga de la realización de mediciones estudios de la elevación y profundidad de la Tierra, con respecto al nivel del mar o con respecto a un plano de referencia.

El principio de la altimetría satelital implica el uso de un radar altímetro instalado en un satélite en órbita. Este radar emite pulsos de microondas de alta frecuencia (aproximadamente 1 Hz) hacia la superficie terrestre y detecta el eco reflejado por una superficie terrestre. Al analizar este eco, se puede determinar con gran precisión el tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite, reflejarse en la superficie de la Tierra y regresar. Este tiempo se convierte en una distancia multiplicando su valor por la velocidad de la luz, lo que se conoce como medida altimétrica. Esta distancia representa la altura entre el satélite y la superficie. De esta manera, conociendo con precisión la posición del satélite en relación con un punto de referencia terrestre conocido (como el elipsoide terrestre WGS84) es posible estimar la altitud reflejada en la superficie con respecto a este elipsoide [6].

Destacan los satélites JASON-3, Sentinel-3A y Cryosat-2 el cual se muestra en la Figura 2-1 que utilizan esta tecnología para la investigación de la atmósfera, estudio de la batimetría y estudio del cambio climático entre otras aplicaciones.

Además, existe la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) espacial que es utilizada por múltiples agencias espaciales, como la NASA, para la realización de estudios tanto de la atmósfera como de la superficie terrestre. Así se pueden obtener modelados digitales de Mercurio, Marte y la Luna. Su funcionamiento es muy similar al anterior. Sin embargo, esta tecnología emite pulsos de luz láser hacia la superficie terrestre y mide el tiempo que tarda en regresar la señal reflejada. Uno de los satélites que emplean esta tecnología es el ICESat-2, que se detallará en el apartado 2.1.2 Satélite ICESat-2.

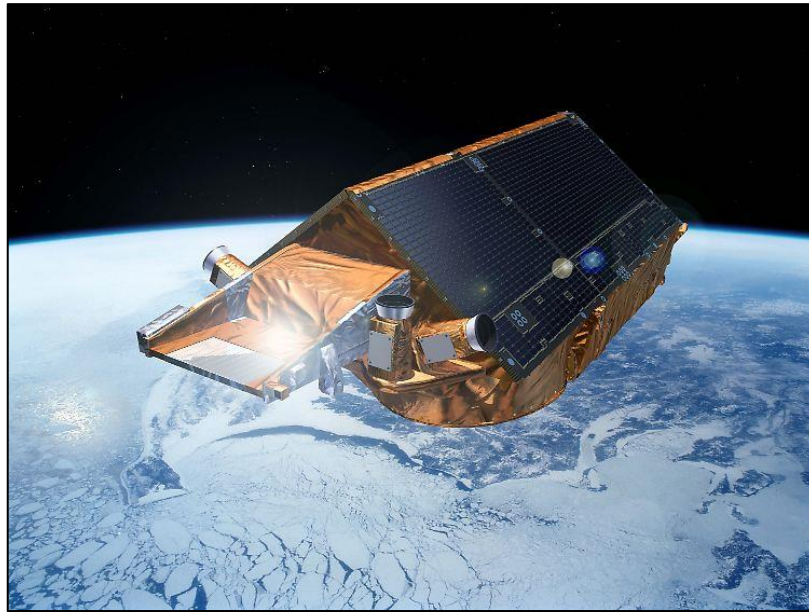


Figura 2-1 Satélite Cryosat-2 orbitando sobre la Tierra [7]

2.1.1 Altimetría láser satelital

La tecnología láser satelital se basa en la tecnología LiDAR (detección y localización por luz, en español), que es un sistema de medición geoespacial integrada a un sistema de teledetección activa por altimetría láser. Utiliza los pulsos de la luz de un láser para reproducir un espacio u objeto, aporta datos muy precisos midiendo distancias y movimientos en tiempo real.

Entre las aplicaciones de la altimetría láser, destacan la cartografía, que se emplea para crear mapas detallados y precisos. Además, en agricultura se utiliza esta técnica para optimizar la planificación del sembrado, riegos y cosechas. También es empleada para la gestión sostenible de los bosques y la planificación de la tala. Por último, adopta un papel concienciador ya que ayuda a la comprensión del cambio climático y la predicción del aumento del nivel del mar al estudiar los cambios de masas de glaciares y casquetes polares, así como la medición del nivel del mar en distintas épocas del año [8].

La información que se recoge de los sistemas LiDAR, es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional que representa y define una geometría concreta, denominada nube de puntos. Ésta se debe convertir en un mapa 3D para poder tener una visual del terreno que queremos estudiar. Para ello, los datos pasan por varias etapas de procesamiento. En primer lugar, existe una comprobación interna para eliminar cualquier ruido extraño comprobar que todos los datos sean precisos. Una vez corregido todos los datos, se produce una clasificación de la superficie de estudio por medio de algoritmos. La nube de puntos se convierte a LAS, que es un formato de archivo estándar para intercambiar datos tridimensionales x, y, z.

A partir de la nube de puntos, se obtienen modelos digitales diferentes. El DSM (Digital Surface Model), se representa la superficie del terreno, incluyendo tanto la vegetación como las edificaciones y otras estructuras que no constituyen la superficie del terreno propiamente dicha. A partir de éste, se calcula el DTM (Digital Terrain Model) donde solo se representa la superficie del terreno. Por medio de unos algoritmos automáticos de análisis basados en el cálculo de gradientes de altitud, se elimina la vegetación, edificios, puentes, etc., y se sustituyen por las cotas del terreno existentes bajo los mismos.

La altimetría láser por satélite ofrece varias mejoras con respecto a la altimetría radar en términos de resolución vertical, precisión en mediciones terrestres, robustez frente a condiciones atmosféricas y rendimiento en entornos urbanos y costeros. Además, se emplea para el estudio de la batimetría que se hablará más adelante en el apartado 2.3.1. Batimetría por teledetección.

2.1.2 Satélite ICESat-2

El ICESat-2 es un satélite de la NASA, en la Figura 2-2 se puede ver una imagen de su lanzamiento el día 15 de septiembre de 2018. Se encarga de medir la elevación de la Tierra a través de un láser que rebota en la superficie calculando el tiempo de llegada. Se trata de un láser de conteo de fotones, por lo que envía fotones individuales, hasta 20 trillones por pulso y 10.000 pulsos por segundo.

Este satélite permite conocer de manera exponencial la cantidad de datos que tenemos en zonas de la Tierra que están constantemente cambiando, en particular la criosfera (la criosfera incluye el hielo marino, las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, los glaciares, el permafrost y mucho más). Esto permite a los científicos a estudiar por qué y cómo está cambiando la criosfera debido al calentamiento global. Además, mide la altitud a través de todo el globo estudiando la situación de vegetación y bosque en cualquier lugar del planeta.



Figura 2-2 ICESat-2 lanzado en un cohete Delta II el 15 de septiembre de 2018 [1]

Los principales objetivos de la misión del satélite ICESat-2 son 4:

1. Medir el deshielo de las capas de hielo y ver cómo afecta ésto al aumento del nivel del mar.
2. Medir e investigar los distintos cambios que puedan sufrir las masas de hielo como glaciares y capas de hielo.
3. Estimar y estudiar el grosor del hielo marino.
4. Medir la altura de bosques y vegetación, así como la de los distintos ecosistemas a través de todo el globo terrestre.

Por lo tanto, la misión del ICESat-2, tiene una importancia sustancial para el estudio del calentamiento global y derretimiento de las capas de hielo. Para ello, el satélite medirá constantemente la altitud de la capa de hielo tanto del Polo Norte como del Polo Sur haciendo un paso cada 91 días. Además, por el paso de polos el satélite también medirá las alturas en las regiones templadas y tropicales de la Tierra y hará un inventario de la vegetación en los bosques de todo el mundo. Gracias a las precisas mediciones se podrá crear un retrato global de la tercera dimensión de la Tierra, con todos aquellos cambios que haya habido en el terreno, incluidos los glaciares, el hielo marino y los bosques.

Las nuevas tecnologías de observación de ICESat-2 están mejorando el conocimiento de cómo las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida contribuyen al aumento del nivel del mar y a su vez ayudan a entender la conexión de la pérdida de hielo marino con el sistema global.

El objetivo de la NASA es que los datos de ICESat-2 ayuden a los investigadores a reducir el rango de incertidumbre en las predicciones del aumento futuro del nivel del mar y conectar esos cambios a los factores climáticos debido a que en los últimos años el derretimiento de las capas de hielo tanto en Groenlandia como en la Antártida ha causado el aumento del nivel del mar más de un milímetro al año.

2.1.3 Láser ATLAS

ICESat-2 cuenta con tecnología puntera para este estudio de la altimetría. Dispone de un láser ATLAS que mide los tiempos de viaje de los fotones de cada pulso para calcular así la distancia entre el satélite y la superficie terrestre. En la Figura 2-3 se puede apreciar más en detalle donde se localiza este láser del ICESat-2.

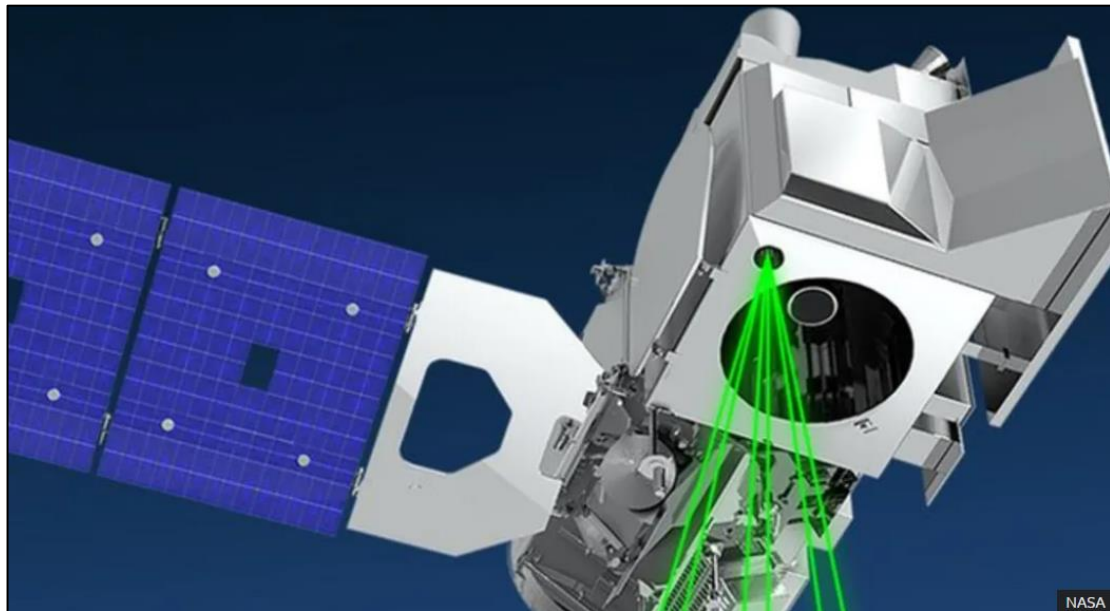


Figura 2-3 Láser ATLAS integrado en el satélite ICESat-2 [1]

ATLAS tiene tres tareas principales para poder obtener una imagen detallada y precisa de las alturas del hielo, el agua, la superficie terrestre, la vegetación y las nubes del planeta Tierra. En primer lugar, enviar pulsos de luz láser al suelo, a continuación, recolectar los fotones que regresan al satélite para finalmente calcular el tiempo de viaje de los fotones [1].

Entrando más en detalle, ATLAS posee dos láseres, uno primario y otro de reserva. La luz del láser es de 532 nm y por lo tanto de color verde brillante en el espectro visible. Se trata de un disparo rápido: envía 10.000 pulsos por segundo, en comparación con el láser del primer ICESat, que enviaba únicamente 40 pulsos por segundo. Con esta increíble velocidad de impulsos, ATLAS puede realizar mediciones cada 70 centímetros a lo largo de la superficie terrestre, de esta manera es capaz de cumplir sus objetivos de poder investigar los distintos cambios en la criosfera.

El ICESat-2 presenta una serie de mejoras con respecto al ICESat (lanzado en 2003). Entre estas mejoras destacan una mejor tecnología de medición. El ICESat utilizaba un solo láser para medir la altitud, lo que limitaba su capacidad para obtener mediciones detalladas y densas de la topografía del hielo y otros objetos en la Tierra. El ICESat-2 utiliza el ATLAS que permite una mayor densidad de mediciones y una mejor resolución vertical en comparación con su predecesor. Además, el nuevo satélite tiene una mayor resolución y precisión gracias a su tecnología avanzada. Por último,

proporciona una cobertura temporal más actualizada y continua de la elevación de la superficie terrestre y la topografía del hielo. En resumen, ICESat-2 representa una mejora significativa en la tecnología y la capacidad de medición en comparación con su predecesor, ICESat. Esta mejora se refleja en una mayor resolución y precisión, una cobertura temporal y espacial mejorada, y una capacidad mejorada para abordar los objetivos científicos de la misión.

En el instrumento ATLAS, además de los láseres, el telescopio y el detector, los ingenieros también han incorporado un equipo llamado sistema de referencia láser. Este sistema controla hacia dónde apunta el láser, asegurándose de que está alineado con el telescopio. El sistema de referencia láser también indica a la nave espacial hacia dónde apunta el telescopio, para que se puedan realizar los ajustes necesarios.

La nave lleva a bordo un GPS y un conocimiento muy específico del centro de gravedad, que permiten al satélite calcular su posición en el espacio con una precisión de 5 metros. Los científicos han realizado estudios y análisis de calibración en tierra para afinar aún más el posicionamiento. Conocer la altitud de la nave espacial es clave, ya que el instrumento mide la distancia de sí mismo al suelo; si ATLAS está más alto o bajo de lo esperado, las mediciones de la elevación de la Tierra serán erróneas.

En cuanto a los datos más significativos, el satélite se encuentra a una órbita de 500 kilómetros de altitud, 92 grados de inclinación y se repite la misma trayectoria cada 91 días. El satélite por lo tanto se mueve a una velocidad de 6,92 kilómetros por segundo. Posee 4 paneles solares que proporcionan una potencia media de 1320 Watios. El registrador de a bordo almacena 580 gigabits al día, el enlace descendente de banda X envía 220 megabits por segundo.

Aunque el instrumento ATLAS está optimizado para medir los cambios en el hielo marino polar y el hielo terrestre, como misión global, ICESat-2 recopila datos de elevación en todas las superficies, de polo a polo. Tabla 2-1, resume los productos de datos estándar de la misión, que están disponibles a través del NSIDC. Los productos de datos de bajo nivel se elaboran a través de la oficina científica del proyecto ICESat-2. Estos productos incluyen ATL01 y 02 (donde se calculan los tiempos de vuelo de los fotones y se corrigen los efectos de la temperatura y el voltaje) y terminan con ATL03, que proporciona una latitud, longitud y elevación para cada fotón. Más allá de eso, los productos de datos específicos de la superficie son desarrollados por expertos en esas disciplinas, e incluyen productos para el hielo terrestre, el hielo marino, la atmósfera, la vegetación y la tierra, los océanos y las aguas continentales.

PRODUCTOS DE ATLAS	DATOS DE TELEMETRÍA
ATL01	Telemetría reformateada
ATL02	Telemetría convertida de la unidad científica
ATL03	Datos globales de fotones geolocalizados
ATL04	Perfiles de retrodispersión no calibrados
ATL06	Elevación del hielo terrestre
ATL07	Elevación del hielo marino del Ártico/Antártico
ATL08	Elevación de la vegetación terrestre y del terreno
ATL09	Retrodispersión calibrada y características de las nubes

ATL10	Francobordo de hielo marino ártico/antártico
ATL11	Serie H(t) de la capa de hielo de la Antártida y Groenlandia
ATL12	Elevación del océano
ATL13	Altura del agua interior
ATL14	Capa de hielo de la Antártida / Groenlandia H(t) cuadriculada
ATL15	Capa de hielo de la Antártida / Groenlandia dh/dt Cuadriculado
ATL16	ATLAS Atmósfera Semanal
ATL17	ATLAS Atmósfera Mensual
ATL18	Terreno/Dosel Cuadriculado
ATL19	Superficie media del mar (MSS)
ATL20	Francobordo de hielo marino cuadriculado ártico / antártico
ATL21	Altura de la superficie del mar cuadriculado ártico / antártico con hielo marino
ATL22	Aguas superficiales continentales medias
ATL23	Altura cuadriculada del océano

Tabla 2-1 Productos disponibles de ATLAS para ICESat-2 [9]

En la Figura 2-4, se puede observar de una manera más gráfica los distintos productos obtenidos del ATLAS, que aparecen en la Tabla 2-1. Se pueden distinguir varios niveles de procesamiento, siendo los primeros datos los más crudos y con una mayor cantidad de fotones. En contraste, los niveles más avanzados, como el 3B, involucran datos más refinados que revelan características más específicas.

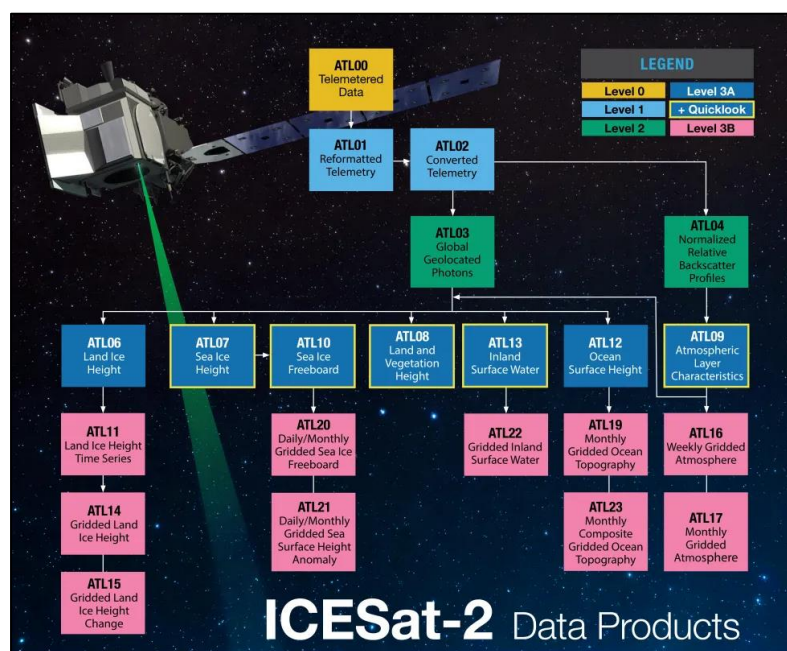


Figura 2-4 Productos ATLAS [10]

Tal y como muestra la Figura 2-5, el láser ATLAS del satélite ICESat-2 consta de 6 haces organizados en 3 pares, a diferencia de la primera versión que lanzaba un único haz. Esto permite al satélite poder recoger una mayor información de datos a lo largo de toda la superficie terrestre. Cada par de haz consta de un haz principal y un haz de reserva, separados entre sí 90 metros. Entre cada par de haz hay una distancia de aproximadamente 3 kilómetros.

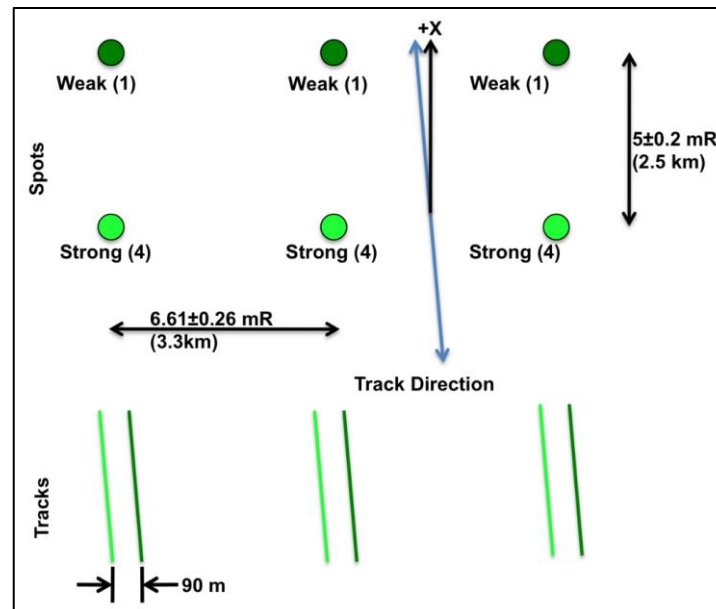


Figura 2-5 Organización de los haces del ICESat-2 [11]

2.2 Otros tipos de altimetría láser

Existen además otros dos tipos de altimetría láser, que varían en función de sus aplicaciones e intereses. La altimetría láser aerotransportada (ALS) y la altimetría láser terrestre (TLS). La primera es mucho más compleja, sin embargo, esta la terrestre es necesaria para estudios complejos en interiores como edificios o canteras.

2.2.1 Altimetría láser aerotransportada (ALS)

Un sistema LiDAR aerotransportado cuenta generalmente de 3 componentes fundamentales. En primer lugar, dispone de un láser que emite pulsos de luz generados con gran precisión. Estos pulsos de luz están pensados para reflejarse cuando se encuentran con algún material. Además, utiliza un sensor para detectar y recoger los pulsos de luz de retorno que ha producido el láser. Por último, lleva integrado un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global) que calcula exactamente el tiempo que ha pasado desde que se emitió el láser de luz hasta que el sensor lo capta de vuelta.

Este tiempo lo convierte en distancia debido a que la velocidad de la luz láser es constante y de esta manera, construye el conjunto de datos resultantes, que permite un mapeo muy preciso de un contorno y la posición exacta de dichos puntos. Repitiendo este proceso y enviando pulsos de luz sobre un área mayor y lo más rápido posible, podremos recoger información de un terreno y procesarla en tiempo real en lo que se conoce como una nube de puntos [12]. En la Figura 2-6, se puede ver un ejemplo de sistema LiDAR con sus componentes, se trata del YellowScan, un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) capaz de recoger un gran número de datos de gran calidad.

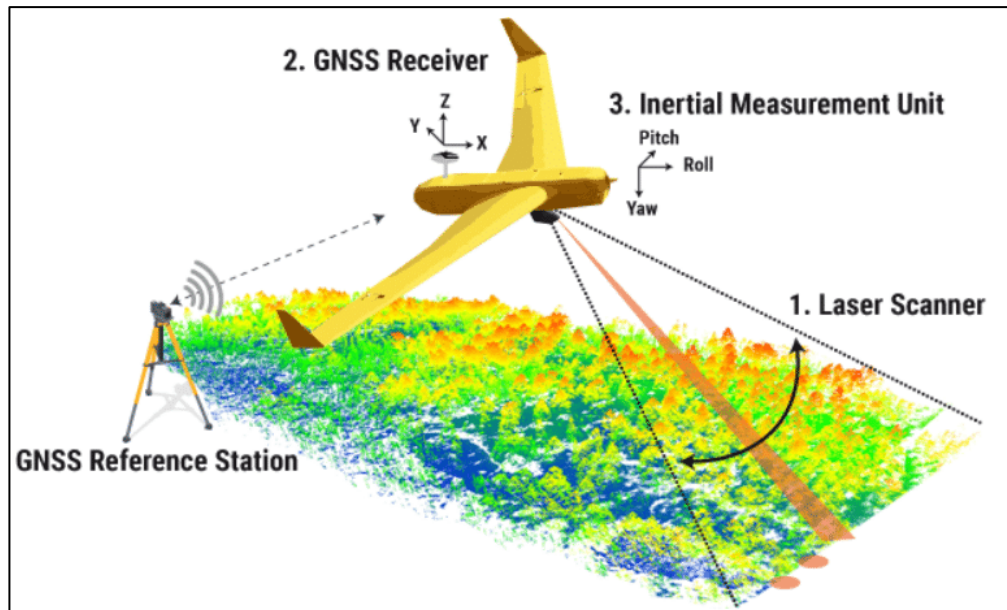


Figura 2-6 Componentes sistema LiDAR YellowScan [13]

LiDAR aerotransportado, está constituido por un láser montado en la parte baja de una aeronave (normalmente en helicópteros o drones) para obtener la información de la superficie terrestre. Se ha convertido en una herramienta de gran valor sustituyendo al método de fotogrametría, un método menos preciso y más antiguo [14].

2.2.2 Altimetría láser terrestre (TLS)

El LiDAR terrestre tiene el mismo funcionamiento que los dos anteriores, basándose en la emisión de pulsos de luz láser. Es necesaria la medición de ángulos cenitales y horizontales, así como el tiempo transcurrido del pulso. Se trata de sistemas más sencillos y por lo tanto más ergonómicos que se utilizan para recolectar datos a corta distancia. Por lo tanto, es ideal para la cartografía de zonas pequeñas con gran precisión.

Existen dos tipos de LiDAR terrestre. LiDAR estático y LiDAR móvil. El primero, se utiliza habitualmente para espacios interiores, destaca su empleo en la minería y arqueología. Por otro lado, el móvil, tal y como se muestra en la Figura 2-7, ha sido fundamental para la industria automovilística no solo en el desarrollo de asistencia al conductor sino también a la conducción autónoma. Gracias a la recopilación de datos en tiempo real y de manera precisa, rápida y económica [15].



Figura 2-7 Altimetro láser móvil acoplado a un vehículo [16]

Entre los sistemas de LiDAR móvil destaca el sistema Maverick, que envía pulsos láseres en 360°. Esta tecnología permite el acople a un vehículo para llevar a cabo levantamientos topográficos de una manera más rápida y menos costosa. Además, también puede ser transportado por un Segway. Por último, puede ser transportado por una persona a través de una mochila de transporte especial.

Otro ejemplo de LiDAR móvil es el ZEB REVO, que posee un láser de escáner rotatorio, ligero y manual. Muy sencillo e intuitivo, instable tanto en un jalón (que lo convierte en LiDAR estático) como en una plataforma en desplazamiento. Registra más de 40.000 puntos por segundo [17].

2.3 Batimetría

La batimetría es el estudio de la profundidad del bajo del agua tanto de fondos marinos como de lagos. Equivale a la topografía submarina. Las curvas de nivel en batimetría se denominan isóbatas que son las que proporcionan la información útil a la navegación. La batimetría proporciona información crucial para una navegación segura, mediante la traza de rutas marítimas tratando de evitar obstáculos en el fondo del mar. Además, tiene su utilidad en proyectos de ingeniería mediante la extracción de recursos naturales. Por último, la batimetría tiene su utilidad en el estudio del cambio climático, ayuda a comprender los efectos del aumento del nivel del mar en el litoral.

Además de una gran ayuda para la navegación, la batimetría permite identificar y estudiar los ecosistemas del fondo marino. A través de la batimetría, se pueden identificar estas áreas con características especiales que acogen gran variedad de vida marina, como puede ser los cañones submarinos, arrecifes y montañas submarinas. En función de la distribución de seres vivos en las distintas isóbatas, se pueden analizar las distintas especies que viven en cada región del lecho marino. Esto permite conocer mejor las especies y como se relacionan entre ellas conociendo así la biodiversidad de los ecosistemas marinos [18].

La cartografía submarina también se emplea para la investigación y aprovechamiento de los recursos naturales que se encuentran en los fondos marinos y lacustres. Facilita la detección de zonas propicias para la extracción de minerales, petróleo y gas, así como para la instalación de infraestructuras submarinas como pueden ser cables de telecomunicaciones y tuberías. Además, los datos cartográficos submarinos son útiles en la planificación de parques eólicos marinos, al identificar áreas óptimas para la colocación de turbinas eólicas en el lecho marino.

Los primeros estudios batimétricos se realizaron hace miles de años de una manera muy arcaica, estos consistían en atar una piedra a uno de los chicotes de un cabo y lanzarla al agua hasta que esta tocara fondo. De esta manera, si realizamos muchas mediciones en un área determinada, podremos conocer la profundidad de dicha zona, aunque de manera inexacta. Evidentemente, estos primeros estudios no son nada precisos ya que están condicionadas por los movimientos de los barcos y de las corrientes que mueven el cabo. Además, esta técnica permite únicamente conocer la profundidad en un punto en concreto.

En el año 1290 se elaboró la primera carta náutica denominada más tarde como Carta Pisana (Figura 2-8) por el lugar de su hallazgo en la ciudad italiana de Pisa. Esta carta cubre desde el Atlántico hasta Oriente Medio, por lo que recoge el litoral del Mediterráneo y en España la costa de Andalucía. A pesar de ser de una fecha tan antigua, da muestra de varios detalles cartográficos, como nombre de puertos, accidentes geográficos y líneas de rumbos con la dirección de los vientos.

En cuanto a la costa andaluza, se puede observar un cierto énfasis en los accidentes más característicos de ella como puede ser el Cabo de Gata, Tarifa, el río Guadalquivir o el Estrecho de Gibraltar entre otros muchos.



Figura 2-8 Carta Pisana [19]

2.3.1 Historia y batimetría en la Armada

En España, la Institución que se encarga de llevar a cabo la elaboración de cartas náuticas y de la investigación oceánica e hidrográfica es el Instituto Hidrográfico de la Marina. Se encarga de la realización de levantamientos hidrográficos del estudio del relieve submarino en nuestras costas y zonas marítimas. Además de la elaboración de cartas náuticas y del estudio de mareas y corrientes entre todas sus competencias. Sin embargo, éste ha tenido muchos cambios a lo largo de la historia de España.

Para entender sus orígenes, es necesario remontarse a la Casa de Contratación, fundada en las Atarazanas de Sevilla a principios del siglo XVI, específicamente en 1503, por los Reyes Católicos. La Casa de Contratación, aunque estuvo subordinada al Consejo Real y Supremo de Indias desde 1524, desempeñó un papel fundamental en el descubrimiento, colonización y comercio del Nuevo Mundo. Un aspecto crucial fue su contribución a la cartografía náutica, siendo considerada por lo tanto como la primera universidad náutica además del primer organismo oficial encargado de producir cartografía náutica.

Con la desaparición oficial de la Casa de Contratación en 1790, surgió la necesidad de crear una institución que se encargara de estas tareas de hidrografía. Aunque existía un Depósito Hidrográfico desde 1770, la publicación del "*Atlas Marítimo de España*" del ilustre marino D. Vicente Tofiño en 1789 señaló la urgencia de crear un organismo que coordinara y sistematizara los trabajos hidrográficos y la producción cartográfica. Así, por Real Orden del 17 de diciembre de 1797, nació la Dirección de Trabajos Hidrográficos o Dirección de Hidrografía. Entre sus primeras hazañas, destaca la publicación de las primeras cartas de la célebre Expedición Malaspina (1789-1794), una de las más destacadas del siglo XVIII.

Durante más de un siglo, la Dirección de Hidrografía llevó a cabo una labor importantísima. A mediados del siglo XIX, se formaron las Comisiones Hidrográficas de la Península, Antillas y Filipinas para renovar los levantamientos en la Península y cartografiar las nuevas plazas de Ultramar, lo que resultó en una de las colecciones más extensas de cartografía náutica de aquella época.

El inicio del siglo XX marcó una reorganización profunda en la Dirección de Hidrografía. Ésta fue disuelta y sus responsabilidades fueron distribuidas entre varios organismos. En 1908, se estableció oficialmente la especialidad de Hidrografía en la Armada, con la creación de una Academia en el Vapor "Urania", sustituido más tarde por el Yate Real "Giralda" en 1942. En 1921, España fue uno de

los dieciocho estados fundadores del Bureau Hidrográfico Internacional, un organismo destinado a fomentar la cooperación entre los servicios hidrográficos de los países miembros.

Pocos años antes de la Guerra Civil, se construyeron los buques "Tofiño" y "Malaspina", que jugaron un papel importante en la cartografía de las Islas Canarias y los territorios africanos hasta la década de 1970, albergando además la Escuela de Hidrografía en el primero de ellos.

Finalmente, ante la necesidad de potenciar la hidrografía en 1943, el servicio hidrográfico se independizó del Observatorio de Marina, dando origen al Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) por ley de 30 de diciembre, con sede en Cádiz y como organismo dependiente del Estado Mayor de la Armada.

En 1970, por Decreto número 3.853 de 31 de diciembre, el Instituto Hidrográfico de la Marina pasó a ser un Organismo de la Armada, dependiente directamente del AJEMA (Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada).

Posteriormente, la Ley 7/1986 de ordenación de la Cartografía determinó que sería responsabilidad de la administración del estado, a través del Instituto Hidrográfico de la Marina, la formación y conservación de la Cartografía Náutica Básica, equiparándolo así al Instituto Geográfico Nacional y otorgando a su producción cartográfica la categoría de Cartografía de Estado y de Documentación Oficial y preceptiva utilización para el navegante.

Tal y como dice la página principal de la Armada, la misión del IHM es: *“velar por la seguridad de la navegación en sus aspectos de obtener y difundir información sobre el mar y el litoral y contribuir al progreso de la Ciencia Náutica”*. Para el cumplimiento de su misión, el IHM cuenta con una flota de 3 buques hidrográficos, el Malaspina (A-31), que se puede apreciar en la Figura 2-9, el Tofiño (A-32) y el Antares (A-23), este último de menor tamaño. Estos son los encargados de la realización de levantamientos batimétricos, trabajos oceanográficos y exploraciones del relieve submarino. Además, se dedican a actualizar los derroteros y libros de faros, así como la toma de datos meteorológicos. Cuentan para ello con un sondador multihaz Simrad EM 300-302 (33KHz) y con un sondador monohaz Simrad EA 600 (12/210 KHz) [20].



Figura 2-9 Buque hidrográfico de la Armada A-31 Malaspina [20]

Esta flota cuenta también con 3 lanchas hidrográficas, Astrolabio (A-91), Escandallo (A-92) y Sondaleza (A-93). Estas se encargan principalmente de realizar levantamientos batimétricos con

recubrimiento total del fondo marino en puertos, canales de acceso y fondeaderos debido a sus pequeñas dimensiones.

2.3.2 Batimetría por teledetección

La teledetección consiste en la adquisición de datos de la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas espaciales. La Batimetría Derivada por Satélite (SDB, por sus siglas en inglés) resulta una alternativa a la hora de realizar un levantamiento batimétrico debido a la capacidad de los sensores remotos ópticos. Además, el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS en inglés) integrado a estas técnicas de teledetección, se han convertido en un gran avance a la hora de estudiar el fondo marino y su profundidad.

Cabe destacar que se han obtenidos resultados muy aceptables mediante esta técnica sobre todo en zonas poco profundas. Los siguientes satélites que se han empleado para estos fines son los siguientes.

En primer lugar, el GEOSAT, lanzado por la US Navy en 1985. Realizó bastantes levantamientos batimétricos, pero tuvo problemas a la hora de trazar rutas marinas debido al impreciso conocimiento del geoide. Además, necesitaba bastante tiempo para realizar dichos levantamientos.

El LANDSAT MSS (Scanner Multiespectral) es un satélite que se emplea fundamentalmente para estudiar la batimetría de la órbita polar, especialmente para localizar arrecifes. Su método consiste en determinar la profundidad según la claridad. El tipo de agua o tipo de algas se controla utilizando las bandas del espectro MSS-4 y MSS-5. Y según el grado de inclinación, se determina la profundidad a la que utiliza. La principal ventaja de este satélite es que tarda 18 días en realizar su órbita y 25 segundos en obtener una imagen. De esta manera, se puede realizar estudio multitemporal (analizar imágenes de un mismo lugar obtenidos en distintos momentos).

El satélite francés SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre), éste fue lanzado en 1986, 1990 y 1993, tiene una órbita menor y por lo tanto es de mejor resolución. Se obtienen imágenes estereoscópicas, lo que permite conocer un área en diferentes fechas y diferentes ángulos. Entre los productos que se obtienen del satélite destacan los mapas de la temperatura de la superficie del agua y la cartografía de sedimentos costeros.

Por último, el satélite canadiense RADARSAT, puesto en órbita en 1994 con el fin de estudiar la navegación en el Océano Atlántico [21].

La batimetría óptica se fundamenta en el principio de que la energía radiante total reflejada desde una columna de agua varía en función de su profundidad. Específicamente, el espectro de luz en las bandas azul y verde presenta una notable capacidad de penetración en el agua. Este algoritmo establece una correspondencia lineal entre la reflectancia de las bandas azul y verde. A medida que la profundidad del agua aumenta, los valores de reflectancia de la banda con mayor absorción disminuyen de manera más pronunciada que los de la banda con menor absorción [22].

Cabe destacar que hoy en día, las mejoras en resolución y exactitud de los nuevos satélites hacen que estos tengan un papel fundamental a la hora de levantamientos batimétricos con el uso de imágenes para determinar rangos de profundidad en función de la longitud de onda de las bandas espectrales de la imagen.

2.3.3 Batimetría por haz acústico

Los datos que se utilizan para la realización de mapas batimétricos provienen típicamente de un sonar montado en el casco de un barco o incluso en el lateral. Se envía un pulso de sonido que rebota con el fondo oceánico. Al igual que ocurre en la altimetría láser, se calcula el tiempo que tarda la onda en salir y volver lo que se traduce en la distancia al fondo marino.

Entre las técnicas para obtener levantamientos batimétricos, destacan las ecosondas monohaz y multihaz. La principal diferencia entre ambas reside en que con la sonda monohaz únicamente nos permite conocer la profundidad en un punto, de tal forma que al mover las embarcaciones obtendremos

un levantamiento batimétrico lineal. Es por eso por lo que actualmente el método más empleado sea el de ecosondas por multihaz (MEBS), donde éstas utilizan hasta 256 haces muy estrechos el uno del otro en forma de abanico con ancho entre 90 y 170 grados. Figura 2-10 se puede apreciar como un buque es capaz de hacer un levantamiento batimétrico con este método. Éste tiene una gran resolución angular, lo que significa que una sola característica del fondo, como puede ser la cota más alta de una montaña submarina, puede medirse desde varios ángulos. Por lo tanto, si un animal marino se encontrase debajo de la embarcación, este no afectará a la hora de obtener los datos ya que éstos se obtienen desde muchos ángulos.

A diferencia de la ecosonda monohaz, esta permite que un barco obtenga más información del fondo en menos tiempo y con mayor calidad. Además, cuentan con sensores que permiten corregir tanto el balanceo como el cabeceo del barco cuando se encuentra en movimiento de tal forma que los datos son muchos más precisos [23].

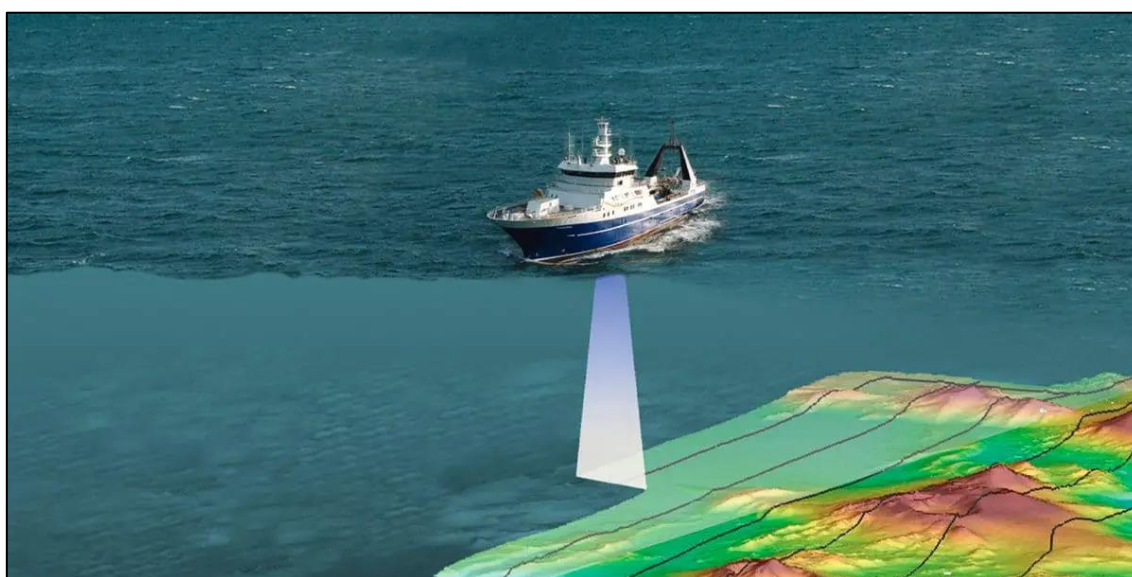


Figura 2-10 Levantamiento batimétrico a través de ecosonda por multihaz [24]

El barco cuenta con un GPS que posiciona los sondeos con respecto al globo terrestre. La velocidad con la que salen las ondas del barco corrige la refracción causada por la temperatura o la presión. Y finalmente un sistema informático es el encargado de procesar todos estos datos con las correcciones pertinentes de todos aquellos factores que puedan alterar estos datos.

Por último, cabe destacar que hoy en día las mejoras en resolución y exactitud de los nuevos satélites hacen que estos tengan un papel fundamental a la hora de levantamientos batimétricos con el uso de imágenes para determinar rangos de profundidad en función de la longitud de onda de las bandas espectrales de la imagen.

2.3.4 Batimetría mediante tecnología LiDAR

La batimetría LIDAR se emplea para determinar la profundidad del agua mediante la medición del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y la recepción de su señal de retorno. Cabe destacar que esta tecnología se realiza a través de un láser aerotransportado, ya sea en aviones, helicópteros o UAV's (Unmanned Aerial Vehicle).

Los sistemas utilizan pulsos láser emitidos a dos frecuencias distintas. Un primer impulso de frecuencia infrarroja más baja que refleja en la superficie del mar, mientras que un láser de frecuencia verde más alta penetra a través de la columna de agua y se refleja en el lecho marino. El análisis de estos dos pulsos distintos se utiliza para calcular la profundidad del agua y las elevaciones costeras. En

condiciones de buena transparencia del agua, estos sistemas pueden alcanzar profundidades de hasta 10 metros [25].

Por ejemplo, el Hawk Eye II Airborne Laser Bathymetry and Topography System (ALBTS), consta de un láser topográfico en longitudes de onda de 1064 nm (infrarrojo) y que se utiliza para la medición altimétrica del suelo terrestre, además, lleva integrado otro láser hidrográfico que opera a 532 nm (verde), que permite la medición del fondo marino. Ambos sensores trabajan simultáneamente con una frecuencia de pulsación de 4 kHz en batimetría y de 64 kHz en topografía. Como se puede ver en la Figura 2-11, la luz infrarroja rebota nada más encontrarse con el mar, mientras que la verde es capaz de penetrar en ella y obtener la profundidad a la que se encuentra el fondo marino.

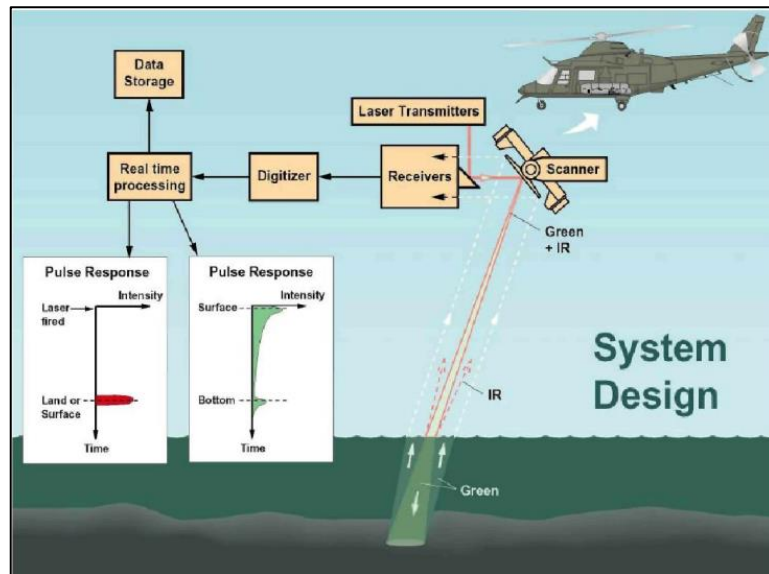


Figura 2-11 Principio de funcionamiento de un sistema LIDAR aerotransportado [26]

La principal ventaja del LiDAR batimétrico es que se emplea para recopilar datos en áreas con costa compleja o robusta, donde los buques de superficie no pueden operar de manera eficiente o segura debido a la presencia de rocas o vegetación sumergida. Es por lo tanto el complemento perfecto para realizar un estudio completo del fondo marino en aquellas zonas de difícil acceso. Sin embargo, presenta grandes inconvenientes ya que depende mucho de la meteorología y de la claridad del agua en el momento en que se realice el levantamiento. Además, que es mucho más costoso que otros métodos.

El funcionamiento del LiDAR es muy similar al del sonar, implica un sensor activo que consta de un telémetro emisor de luz láser y un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. Esto genera una serie de pulsos de luz que, al entrar en contacto con los objetos o el terreno, reflejan parte de la energía del pulso emitido hacia el sensor, generando nubes de puntos que son útiles para la batimetría [27].

La utilización de luz verde es una elección común para los sistemas LiDAR de batimetría debido a su capacidad de penetración en el agua, en comparación con otras longitudes de onda, como el rojo o el azul, la luz verde puede penetrar más profundamente en el agua antes de ser absorbida o dispersada, lo que permite mediciones más precisas de la profundidad. Es visible tanto para los sistemas de detección remota como para el ojo humano, lo que facilita la calibración y la interpretación de los datos recopilados. Además, en aguas poco profundas y con poca turbidez, la luz verde es más efectiva para penetrar y proporcionar mediciones precisas. Por último, su menor sensibilidad a las variaciones en el color del agua en comparación con otras longitudes de onda le puede ayudar a minimizar los errores en las mediciones causados por variaciones en la turbidez o la composición del agua. Todo esto permite que las mediciones sean más precisas y confiables a la hora de obtener la topografía submarina.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

La comprensión detallada de la batimetría es esencial para una variedad de aplicaciones científicas y prácticas, como puede ser la cartografía marina. Sin embargo, la adquisición de datos batimétricos precisos en zonas costeras presenta desafíos significativos debido a la complejidad del entorno marino y a las limitaciones técnicas de los métodos tradicionales de mapeo. Además, debido a los peligros existentes en la navegación, sobre todo en zonas más costeras, actualmente existen satélites que permiten la obtención de datos batimétricos muy precisos en las mencionadas zonas.

En este contexto, el lanzamiento del satélite ICESat-2 por parte de la NASA ha abierto nuevas posibilidades para la obtención de datos altimétricos de alta precisión sobre la superficie terrestre y marina. ICESat-2 utiliza el sistema ATLAS, un láser avanzado de pulsos para medir la altura de la superficie terrestre y, gracias a su capacidad de penetración en el agua, también ofrece la posibilidad de realizar mediciones precisas de la batimetría en zonas costeras.

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, se realiza un estudio topobatimétrico de dos zonas de estudio, combinando los datos del PNOA del IGN (Instituto Geográfico Nacional) con los datos topobatimétricos obtenidos del ICESat-2. Por otra parte, se utiliza un código en Python para analizar el gradiente de un canal específico de la playa del Retín, realizando asimismo un estudio multitemporal. Por último, se aplica también este código para un haz concreto de la ría de Corcubión, realizando un análisis comparativo de su aplicabilidad en ambas zonas de estudio, destacando sus principales diferencias.

3.1.1 Material y métodos

Son tres los productos de datos derivados del satélite ICESat-2 que utilizaremos en el presente trabajo. En primer lugar, se emplearán los datos proporcionados por el producto ATL13. Este conjunto de datos contiene alturas de la superficie del agua a lo largo de la trayectoria y estadísticas descriptivas de masas de agua continentales. Las masas de agua incluyen lagos, embalses, bahías y estuarios. Las estadísticas descriptivas incluyen la pendiente de la superficie a lo largo de la trayectoria (cuando los datos lo permiten), la media y la desviación estándar, la atenuación de la señal subsuperficial (532 nm), la altura de las olas y la topografía de profundidad hasta los 7 kilómetros fuera de costa [28].

Además, se utilizará el producto ATL08 que, como se recoge en la Tabla 2-1, nos proporciona los datos de la elevación de la vegetación terrestre y del terreno, y que se aplicará para conocer la topografía de las zonas costeras [29].

Por último, también se van a utilizar los datos del ATL03 [30]. A pesar de que estos datos son brutos, almacenan gran cantidad de fotones que van a permitir obtener la batimetría en ciertas zonas de estudio a través de un código en Python [31].

Para la realización de este trabajo se ha utilizado el sistema operativo Windows 11 Pro, el programa Excel y la aplicación de QGIS [32] para la visualización, tratamiento y análisis espacial de los datos de archivos de Excel. Además, para ejecutar el código de lenguaje Python, se empleará Colab [33], que se trata de un producto de Google Research que permite a cualquier usuario escribir y ejecutar código arbitrario de Python en el navegador.

3.1.2 Zonas de estudio

Para el siguiente trabajo, se han seleccionado dos áreas de estudio con una morfología distinta. En primer lugar, la Ría de Corcubión, que comprende Finisterre, Cee y Carnota tal y como muestra la Figura 3-1. Las rías de Galicia son muy populares ya que se formaron durante la era Cuaternaria, hace unos 2 millones de años, como resultado de la acción de los glaciares y el aumento del nivel del mar. Durante las glaciaciones, los valles fluviales fueron inundados por el mar, creando entradas de agua profundas y estrechas que se adentraban en la costa. Estas rías poseen esta característica que las diferencian del resto de elementos costeros del país, ya que en una distancia relativamente corta desde la línea de costa (apenas 1 kilómetro), la sonda puede alcanzar unos 100 metros.

Para el estudio de esta zona se va a utilizar el producto ATL13 de Open Altimetry al cual se le integrarán los datos del PNOA para realizar un estudio topobatimétrico completo. Como resultados, se realizarán un MDT y un perfil de elevación en la aplicación de QGIS.

Además, se repetirá el proceso, pero en esta ocasión, empleando el producto ATL08, para obtener un perfil topográfico y demostrar así que el satélite permite también obtener la topografía del terreno. La calidad de esta topografía se validará con los datos de elevación del PNOA.



Figura 3-1 Localización de la Ría de Corcubión

La otra zona de estudio será la playa del Retín, en la provincia de Cádiz (Figura 3-2). En el sur de España las playas tienen un gradiente mucho más suave y sus sondas en los primeros kilómetros desde la costa hacia el interior no superan los 50 metros de profundidad.

Para el estudio de esta zona se utiliza el producto de datos ATL03, sobre el cual se aplicará un código en Python que nos permitirá obtener un perfil batimetría derivado de uno de los haces del satélite.

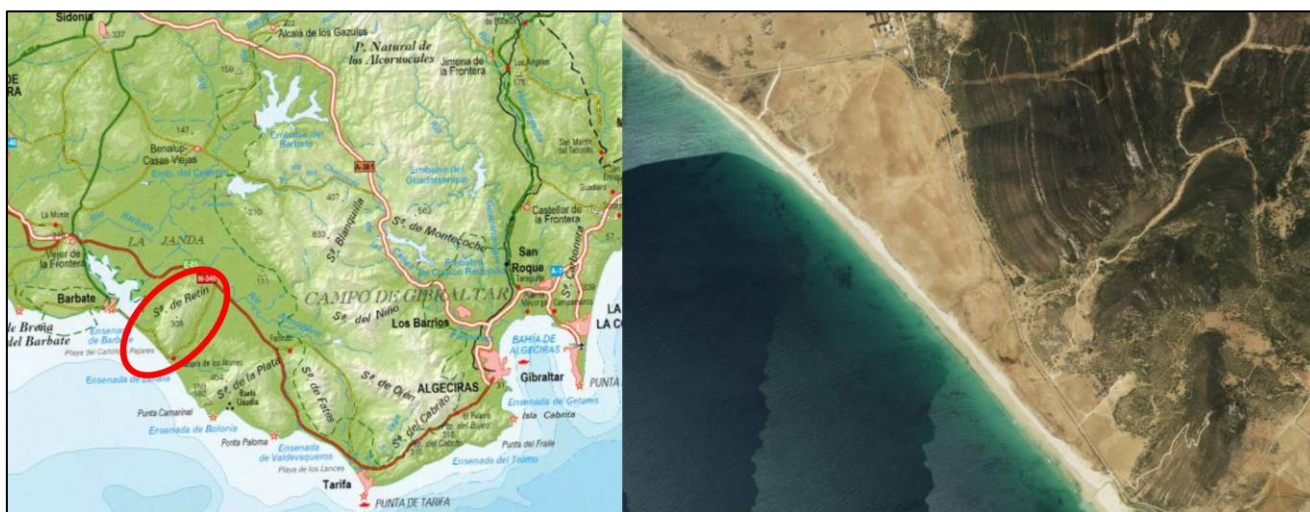


Figura 3-2 Playa de estudio de la zona del Retén

3.2 Obtención de los datos

Los datos del satélite ICESat-2 son de fuente abierta y, por lo tanto, pueden ser descargados por cualquier usuario. El NSIDC es un centro de información de Estados Unidos que apoya la investigación de la criosfera. Además, es uno de los ocho centros de archivos financiados por la NASA para archivar y distribuir los datos obtenidos por los satélites.

A continuación, se detalla el proceso realizado para la obtención de los datos:

1. Acceder a la página web del NSIDC <https://nsidc.org/home> y seleccionar la opción “Explore data” en la página de inicio. A continuación, se abrirá una interfaz en la que aparecen las distintas fuentes de datos con las que trabaja el NSIDC [2], tal y como muestra la Figura 3-3.
2. En el buscador que aparece en pantalla “Search Data” se buscará el satélite de interés ICESat-2 para poder acceder a los datos de éste.

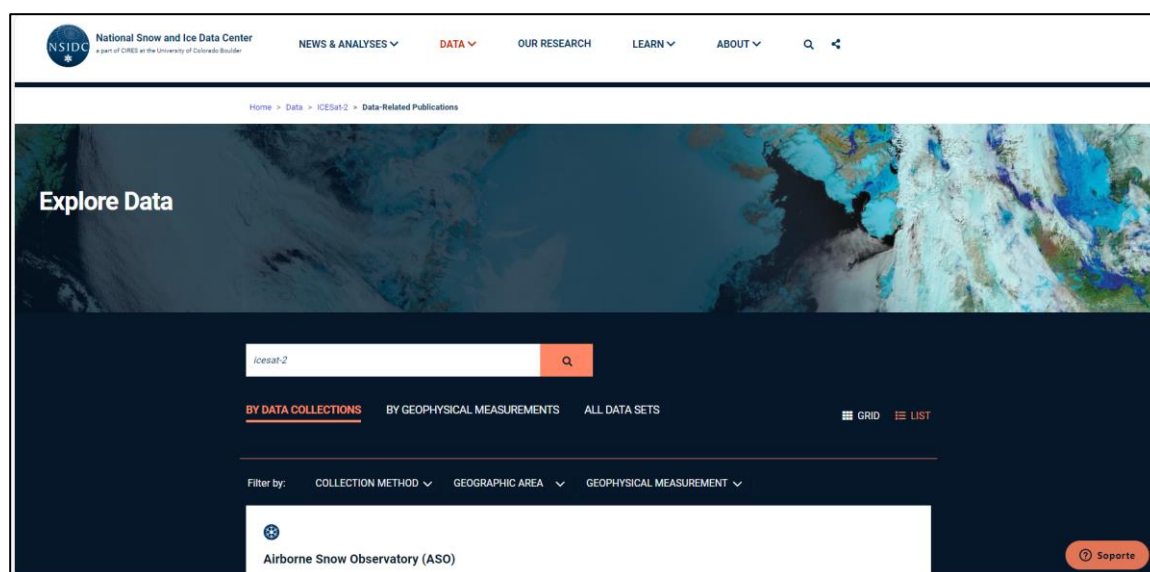


Figura 3-3 Explore Data NSIDC

Automáticamente se abrirá una nueva pestaña con todos los datos procesados del ATLAS mencionados anteriormente (Figura 2-4).

En determinados navegadores esta pestaña no aparece automáticamente por lo que se debe acceder mediante otro procedimiento. Bajar con el cursor hasta ver en pantalla el satélite ICESat-2 y se seleccionará la opción de “*Go to Collection*”. En la derecha de la nueva página se puede ver un índice con una serie de opciones de información del satélite. Se elegirá “*Data Tools*” y a continuación “*Open Altimetry*”.

Cabe destacar que el volumen de datos producidos por ICESat-2 es de aproximadamente un terabyte por día, por lo que presenta desafíos importantes para los usuarios que desean explorar de manera eficiente el conjunto de datos. El Centro de Archivo Activo Distribuido (DAAC) del NSIDC de la NASA, es responsable de almacenar, procesar y distribuir los datos de ICESat-2 y proporciona herramientas y servicios web que permiten el acceso a los distintos productos de datos de la misión. Entre ellos se encuentra el que se va a estudiar: Open Altimetry.

3.2.1 Open Altimetry

El método utilizado para la descarga y visualización de datos del ICESat-2 será mediante Open Altimetry, que se puede acceder a él desde la nueva pestaña abierta (Figura 3-4) o directamente desde el buscador del navegador [34].

Open Altimetry es una plataforma que proporciona acceso y herramientas para visualizar y analizar datos del ICESat-2. Esta plataforma ofrece interfaces de usuario intuitivas basadas en mapas, lo que facilita la exploración y el análisis de los datos por parte de los usuarios. Además, permite a los usuarios iniciar sesión con sus credenciales de *EarthData* para acceder a funciones adicionales, como descargas de datos y la capacidad de crear y compartir anotaciones. La plataforma utiliza estrategias para gestionar grandes volúmenes de datos [35].

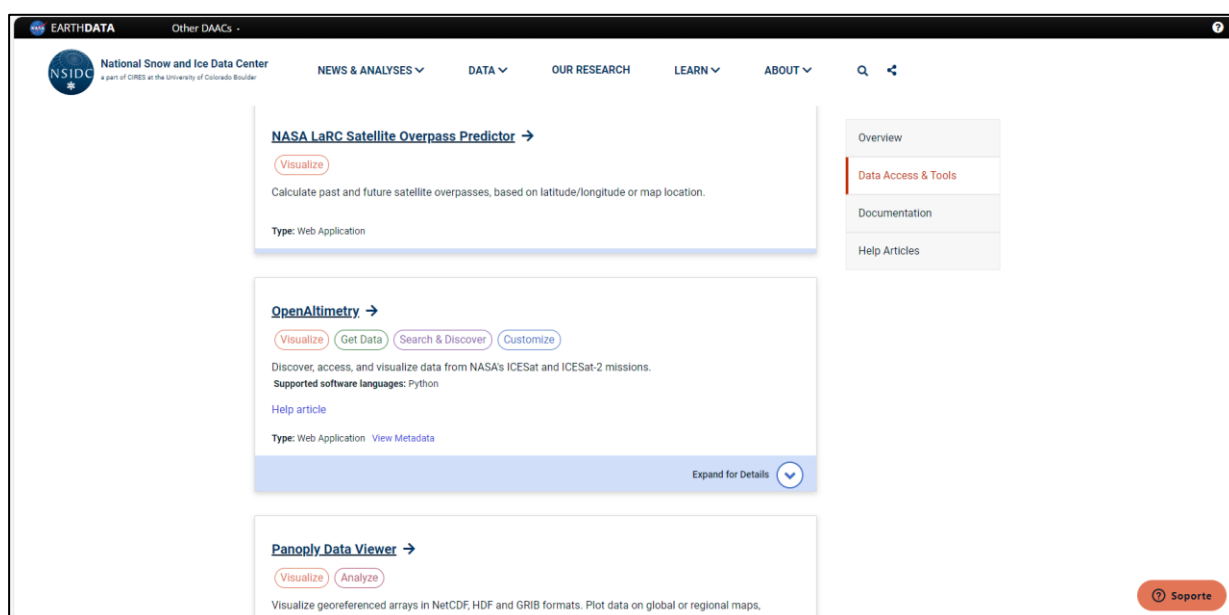


Figura 3-4 Acceso de datos a Open Altimetry

3. En la página de inicio de Open Altimetry se hará *click* en el icono “*Visualize*” y se abrirá una nueva pestaña donde aparecen se pueden obtener datos tanto del ICESat como del ICESat-2. Elegiremos la opción ICESat-2 y se abrirá una nueva interfaz.
4. En la interfaz del ICESat-2 en Open Altimetry, se ve una serie de iconos que a continuación se explican con la ayuda de la Figura 3-5.

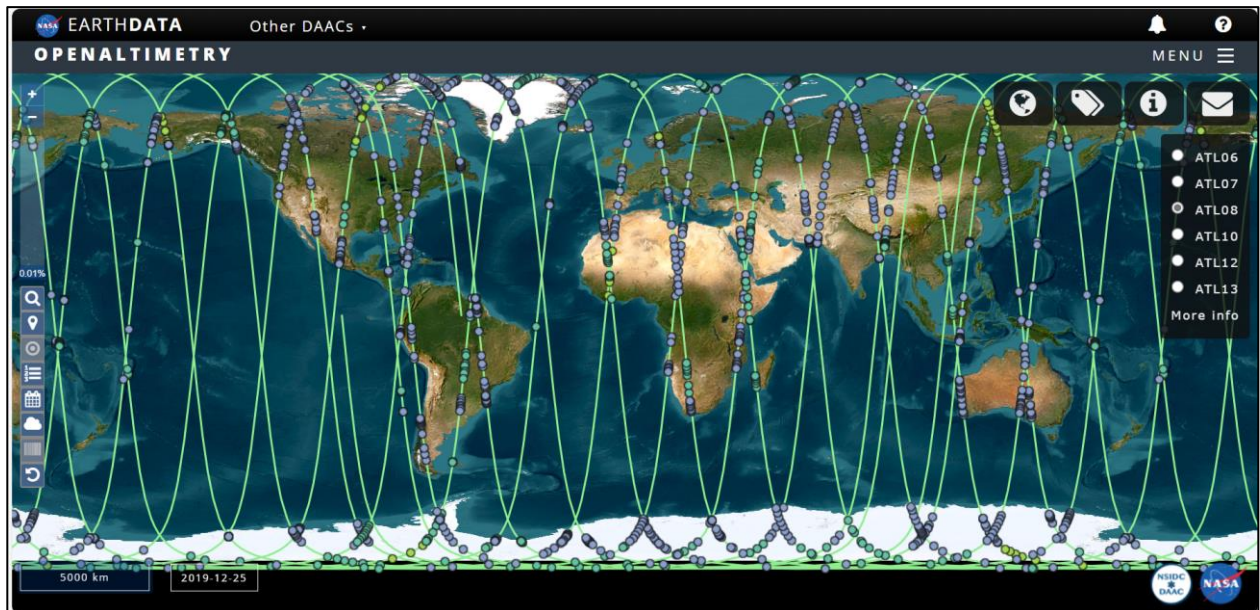


Figura 3-5 Interfaz del ICESat-2 en Open Altimetry

Empezando por la parte superior derecha:

- El icono donde aparece el globo terráqueo permite al usuario acceder a 3 opciones. Una donde se muestra toda la superficie terrestre, que es la que se ve en la Figura 3-5, con menos resolución en los polos; las otras dos visualizan una proyección de la Antártida y del Ártico (Figura 3-6) para poder obtener datos de manera más precisa en dichas zonas.



Figura 3-6 Interfaz del Open Altimetry en el Ártico

- La etiqueta que aparece a su derecha, son anotaciones, de usuarios que han obtenido datos y quieren poner anotaciones personales o que sirvan de ayuda a la comunidad. Además, permite la opción de añadir anotaciones propias.
- El símbolo de información abre un desplegable donde se explican los distintos iconos más importantes que salen en la aplicación.
- La columna de la derecha muestra los distintos productos del ATLAS que se pueden encontrar en Open Altimetry. De toda la resolución de datos que se puede obtener del

satélite, en esta página únicamente podemos obtener datos del ATL06 al ATL13, ya que son los datos más procesados. Si se deja el cursor en uno de los productos ATLAS, aparece una pequeña descripción de los datos que se pueden obtener de éste.

Las líneas verdes representan la trayectoria que describe el satélite durante el periodo que tarda en dar la vuelta a la Tierra, que es de 91 días en este caso particular. Si ampliamos la imagen, podemos ver las distintas trayectorias del satélite desde que se puso en órbita en septiembre de 2018. Por lo tanto, a cada trayectoria se le asignan hasta 20 fechas, que son todas las que el satélite ha pasado por ese tramo hasta la fecha actual, tal y como se puede observar en la Figura 3-7. De esta manera, se puede hacer un estudio multitemporal de una zona determinada a lo largo de los años.

Si se comparan las Figura 3-6 y Figura 3-7, se puede ver como el satélite sobrepasa España únicamente por esa zona y no volverá a hacer hasta dentro de 91 días. Sin embargo, en los polos, para una sola trayectoria el satélite sobrevuela todo ese terreno. Esto significa que se obtendrán muchos más datos en las zonas polares.

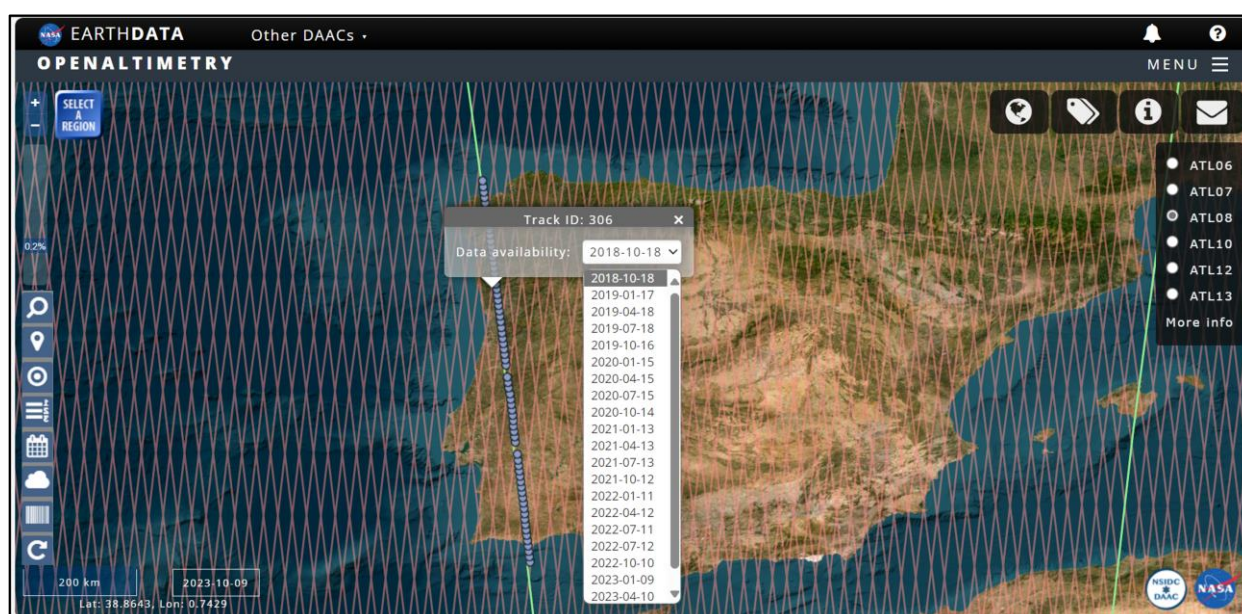


Figura 3-7 Ejemplo trayectoria ICESat-2 con sus fechas

Siguiendo con la descripción de Open Altimetry, en la zona izquierda se puede ver una columna con distintos iconos, se puede ver mejor en la Figura 3-8:

- La barra superior indica el porcentaje de datos mostrados con respecto a lo ampliada que esté la imagen. A medida que se amplía la imagen, el número de datos mostrados aumenta.
- La lupa mostrada abajo, es una herramienta que sirve para poder ampliar la imagen a una zona de interés, una herramienta para no tener que usar el cursor del ratón y poder seleccionar la zona de interés de manera más rápida y automática.
- El icono mostrado debajo, que se asimila a una chincheta, se utiliza para buscar datos del ATLAS de manera automática especificando los valores de latitud y longitud.

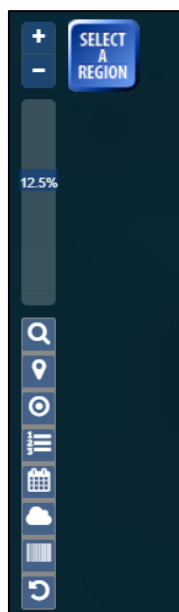


Figura 3-8 Menú de iconos de Open Altimetry

- La diana que se encuentra debajo de ésta es el filtro de haz que muestra los datos. Como se ha explicado en el apartado 2.1.2 Satélite ICESat-2, el satélite, cuenta con 3 haces de datos, a cada haz, le corresponden una serie de datos, unos débiles y otros con mejor resolución (fuertes). Por lo tanto, con esta herramienta, se puede hacer un filtro para que se muestren únicamente los datos con los que se quiera trabajar.
- El icono de calendario sirve para hacer una vista de datos con respecto a una fecha concreta, de esta manera solo mostrará los datos que se han obtenido en la fecha que se ha seleccionado.
- El icono de la nube en la barra de herramientas muestra una visualización de las nubes que hubo mientras el satélite recorría su trayectoria por la Tierra. De esta manera, si en algún momento se muestra una falta de datos en la trayectoria, esto se debe a que las nubes han obstaculizado este proceso de obtención de datos y los haces de luz no han podido rebotar en la superficie terrestre. Mediante esta herramienta, se puede comprobar en qué fechas no ha habido nubes en una zona de estudio determinada desde 2018 y, por lo tanto, poder seleccionar una fecha donde se pueda obtener los datos de interés sin la interferencia de las nubes. En la Figura 3-9 se puede ver un ejemplo de las nubes para un día determinado.
- El siguiente icono sirve para ocultar las distintas trayectorias del satélite para que se vea de manera más clara la imagen.
- Por último, el icono que está más abajo se utiliza para reiniciar todas las modificaciones que se han realizado antes y mostrar la imagen por defecto.

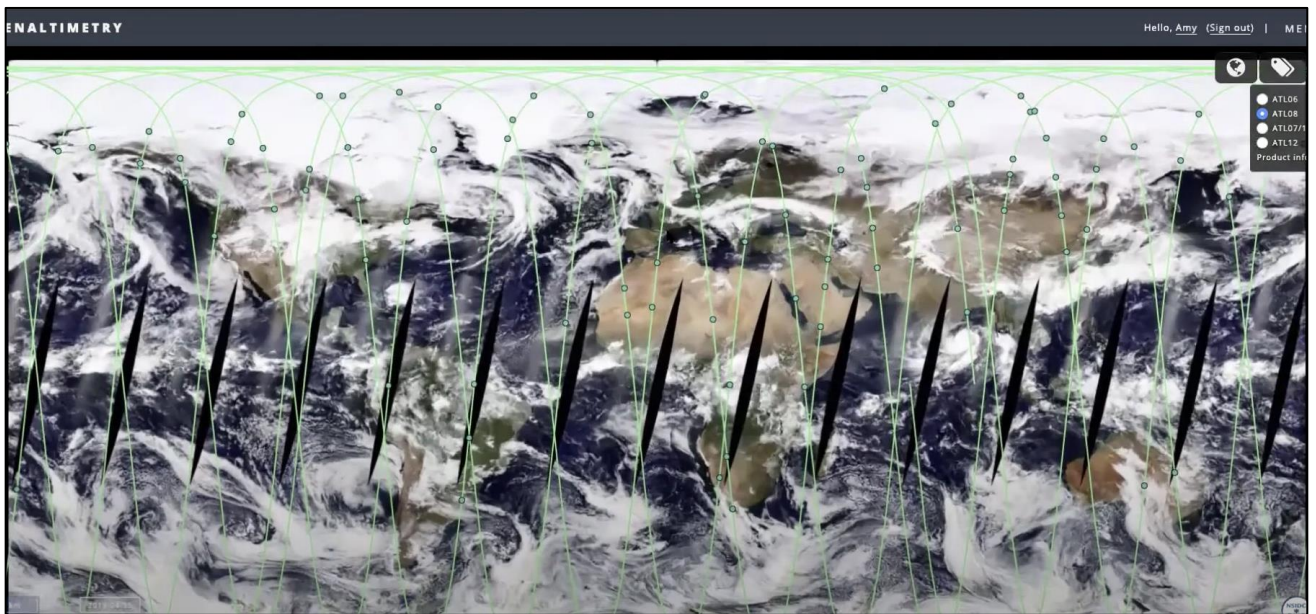


Figura 3-9 Capa de nubes Open Altimetry

Para la obtención de datos desde Open Altimetry, se debe seleccionar el haz de la trayectoria del satélite que sobrepase por la zona a estudiar y en el periodo de tiempo deseado. Además, habrá que seleccionar el tipo de dato procesado que se quiera descargar para su estudio dentro de la familia de productos de datos ATLAS disponibles (esto se selecciona en la derecha del Open Altimetry). A continuación, se pulsa en el cuadro que aparece en la esquina superior izquierda “*Select a Region*”, y se dibuja el área donde se quiera llevar a cabo la obtención de datos (Figura 3-10).

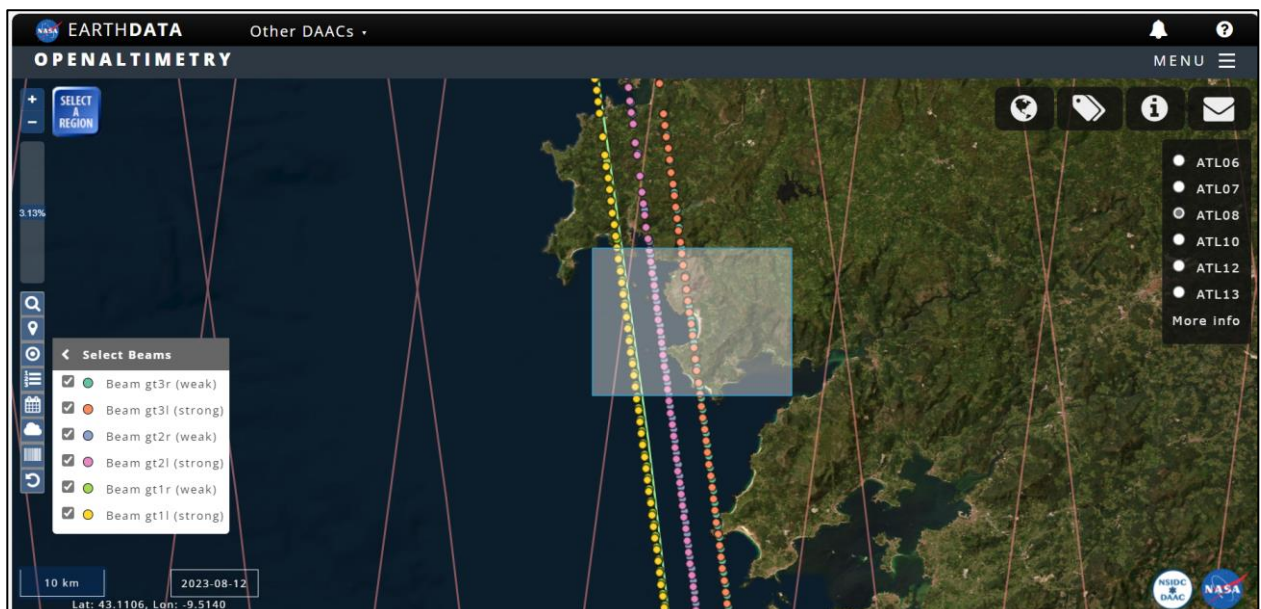


Figura 3-10 Ejemplo de selección de datos de un área determinada

Una vez seleccionada la región de estudio, se abrirá una nueva pestaña donde aparecen los datos de los tres haces seleccionados en la trayectoria. Además, muestra el perfil de elevación de los datos procesados por los distintos ATLAS. En la Figura 3-10 y Figura 3-11, se puede ver un ejemplo de los datos obtenidos por Open Altimetry. El perfil de elevación nos permite conocer la longitud, latitud, elevación y distancia con respecto al área seleccionada de cada uno de los datos obtenidos por el

satélite, así como el haz al que pertenece cada uno de los datos. La referencia de elevación utilizada por el satélite ICESat-2 es el elipsoide geoidal WGS 84, que es un modelo geométrico de la forma de la Tierra que proporciona una superficie de referencia para la medición de altitudes. En este modelo, la referencia de elevación se define como el nivel medio del mar en condiciones de gravedad normal en la superficie terrestre.

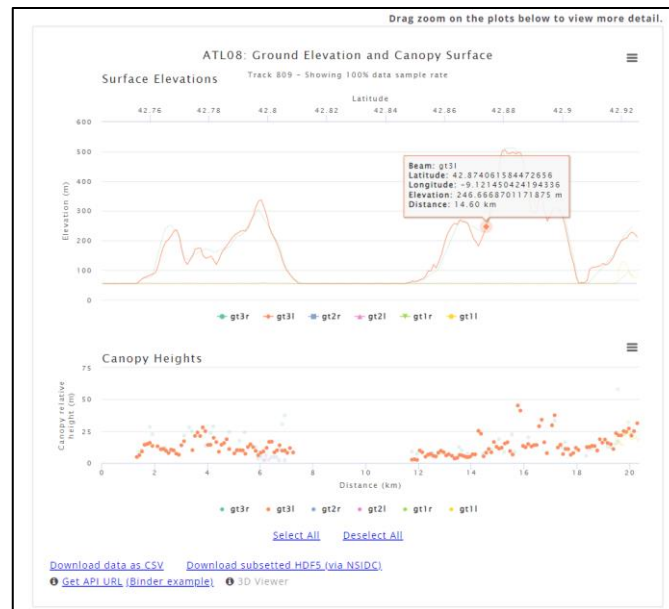


Figura 3-11 Ejemplo de datos del ATL08 obtenidos de un área determinada

Open Altimetry permite también la opción de visualizar los datos del ATL03, seleccionando la opción de “*ATL03 Photon Heights*”. Representan los datos brutos y sin procesar obtenidos desde el sistema ATLAS, y contienen todos los fotones clasificándolos tanto en ruido como en fotones con mayor o menor confianza.

Para descargar los datos, se podrán descargar como un archivo CSV (archivo separado por comas) o como un subconjunto HDF5, que se puede abrir en lenguaje Python. Al abrir los datos descargados como CSV en una hoja de Excel, aparecen todos los datos en una única celda de Excel. Es necesario por tanto transformarlos para adaptarlos a un formato de libro de Excel para más tarde poder trabajar con ellos en QGIS. Para ello, se utiliza la herramienta Power Query, de Microsoft Excel, que permite importar, transformar y combinar datos para su posterior análisis y visualización. De este modo, Power Query proporciona una solución completa del proceso ETL (Extract, Transform, Load) con el objetivo último de que el archivo derivado del ICESat-2 puede ser importado en el entorno de trabajo de cualquier Sistema de Información Geográfica.

En primer lugar, al abrir Microsoft Excel, en la pestaña de “*Datos*”, se debe seleccionar la opción “*Obtener Datos (Power Query) > De un Archivo > Desde un libro de Excel*” (Figura 3-12).

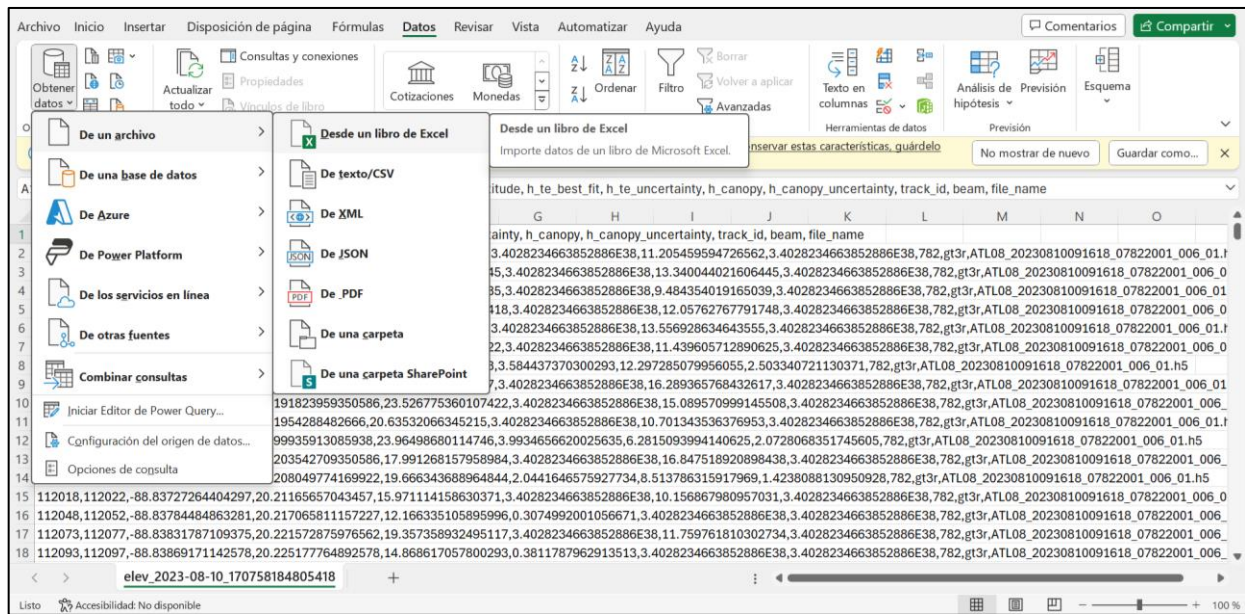


Figura 3-12 Ejemplo para importar un archivo CSV en la herramienta Power Query de Excel

A continuación, hay que seleccionar el archivo CSV (para encontrarlo es necesario que se puedan buscar en todos los archivos y no únicamente archivos de Excel que aparece como determinado). Una vez seleccionado el archivo se procede a “Importar” (Figura 3-13) y finalmente en la nueva pestaña “Delimitador” se selecciona por “Comas” y en “Detección del tipo de datos” se escoge la opción de “No detectar tipos de datos” para poder obtener los datos de la manera más organizada y de acorde a sus características. Se guardará el libro de Excel generado con todos los datos separados por columnas dentro de una tabla en un libro de Excel, como se puede ver en la Figura 3-14.

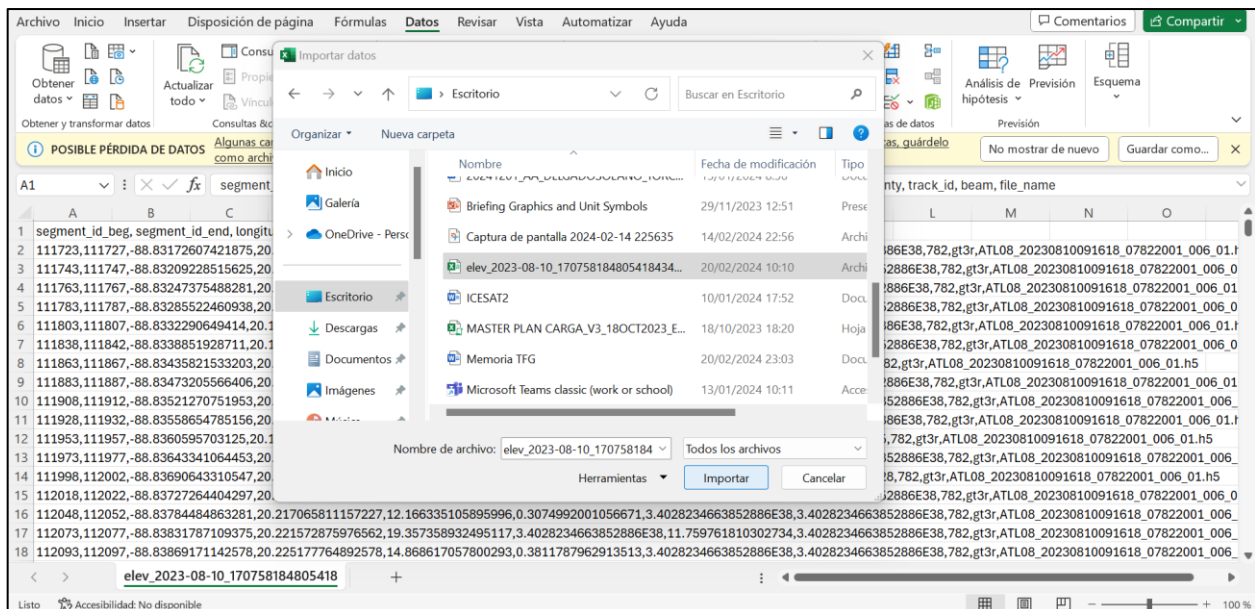


Figura 3-13 Importación de un archivo CSV en un libro de Excel

En este punto, los datos se podrán manipular en función de los intereses particulares del usuario. Las dos primeras columnas muestran el identificador de inicio y fin respectivamente dentro de la sección seleccionada. Los datos del ICESat-2 se entregan en coordenadas geográficas y por eso, las siguientes 3 columnas muestran la geolocalización de los datos (longitud, latitud y altitud

respectivamente). La longitud indica la posición Este-Oeste de un punto de la Tierra, respecto al meridiano de Greenwich mientras que la latitud indica la posición Norte-Sur de un punto con respecto al ecuador terrestre. La altura ortométrica representa la altura medida a partir del geoide, y se considera una altura sobre el nivel medio del mar. Es importante no confundirla con la altura elipsoidal, que se mide sobre el elipsoide (modelo matemático de la forma de la Tierra). Como es de esperar, existen diferencias entre ambas alturas, a causa de la variación de la relación de distancia entre el geoide y el elipsoide a lo largo de toda la Tierra. Por todo ello, es crucial utilizar el datum correcto al trabajar con datos geospaciales para garantizar la precisión y la coherencia en las mediciones y las representaciones cartográficas.

La variable "QF_IWP" proporciona información sobre la confiabilidad de las mediciones del contenido de agua en forma de hielo realizadas por ICESat-2. Esta calidad de medida puede ser útil para los investigadores que utilizan los datos de ICESat-2 para estudiar el hielo marino, los glaciares y otros fenómenos relacionados con el hielo en la Tierra.

Por último, las últimas 3 columnas indican respectivamente el número de trayectoria del satélite (track_id), el tipo de haz que se utiliza en ese punto (beam) y el nombre del archivo (file name, que en la Figura 3-14 es el mismo para cada punto).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9
2	segment_id_beg	segment_id_end	segment_lon	segment_lat	ht_ortho	qf_iwp	track_id	beam	file_name
3	763637	763641	-9.24650147019210	42.91483973748178	-0.7682334780693054	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
4	763641	763647	-9.24660569522911	42.91404112468479	-0.8198457360267639	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
5	763681	763685	-9.24752246577142	42.90696755283581	-0.7714971899986267	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
6	763685	763687	-9.24760034382138	42.90639235678210	-0.947129487991333	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
7	763687	763690	-9.24766195200244	42.90591897233586	-0.8207108378410339	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
8	763690	763693	-9.24773092097272	42.90537679689058	-0.7183619737625122	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
9	763693	763696	-9.24779030654206	42.90490704984253	-0.8039253950119019	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
10	763696	763699	-9.2478637382124	42.90433093991211	-0.756656289100647	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
11	763699	763702	-9.24792435128838	42.90386092512623	-0.742638885974884	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
12	763702	763704	-9.24798604709114	42.90338680507368	-0.7301709055900574	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
13	763704	763707	-9.24804101193996	42.90297006465373	-0.6562093496322632	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
14	763707	763709	-9.24810231088641	42.90250975577627	-0.5733470916748047	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
15	763709	763712	-9.24816367516117	42.9020528990706	-0.6285277605056763	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
16	763712	763714	-9.24822099715938	42.90162118634819	-0.7114402055740356	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
17	763714	763716	-9.24827157505243	42.90123248348741	-0.671954870223999	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
18	763716	763718	-9.24831964464588	42.90085369933649	-0.6343815326690674	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
19	763718	763720	-9.24837046110806	42.90044914863301	-0.6895800828933716	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
20	763720	763723	-9.24842680582389	42.90000102437868	-0.811800479888916	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
21	763723	763726	-9.24849564203668	42.89946207809503	-0.6821426153182983	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
22	763726	763729	-9.24856621250633	42.89892394667269	-0.6824185848236084	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5
23	763729	763737	-9.24871365647191	42.89782840949071	-0.8858936429023743	7	847	gt3r	ATL13_20200220005929_08450601_006_01.h5

Figura 3-14 Tabla de datos del ATL13 en Excel

3.3 Importación de datos en QGIS

Una vez se han descargado todos los archivos necesarios para el estudio, se procede a su importación en un programa SIG. Para este trabajo se utilizará el programa QGIS, "Quantum GIS", un sistema de información geográfica de código abierto, para hacer el estudio de la topobatimetría. La zona seleccionada será la ría de Corcubión, tal y como se muestra en la Figura 3-15. La selección de esta zona se debe a que se puede hacer un estudio más completo ya que sobre ella se cruzan dos trayectorias del satélite (track 806 y track 847), disponiendo así del doble de datos.

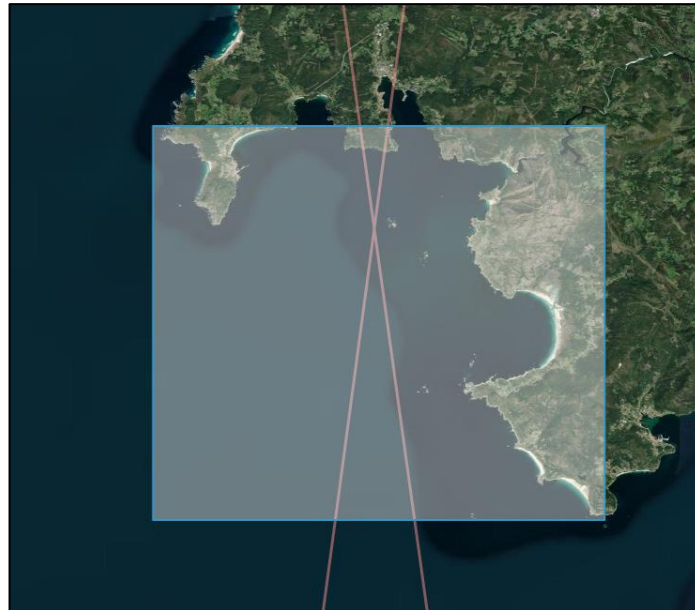


Figura 3-15 Selección de la zona de estudio

Para poder descargar todos los datos posibles, se seguirán los pasos explicados al final del apartado 3.2.1 Open Altimetry. Una vez se obtiene la hoja de cálculo bien definida por sus parámetros, se eliminarán todos aquellos que no sean latitud, longitud y elevación tal y como muestra la Figura 3-16.

	A	B	C	D	E	F
1	Column1	Column2	Column3			
2	Column3	Column4	Column5			
3	segment_lon	segment_lat	ht_ortho			
4	-9.107226537333096	42.73583734207032	0.34454336762428284			
5	-9.107265247735919	42.7361343616195	0.34485483169555664			
6	-9.107290658542745	42.736325021632744	0.44860461354255676			
7	-9.107307324991098	42.7364466022011	0.3221253752708435			
8	-9.107327775237128	42.73659401731305	0.305541068315506			
9	-9.10734656808816	42.736728758232346	0.382670134305954			
10	-9.107367162384978	42.736876387329815	0.1528218537569046			
11	-9.107395075166256	42.73707534288433	-0.04638787358999252			
12	-9.107423923221583	42.73728048319355	0.3155640959739685			
13	-9.107450094364143	42.73746632700639	0.33205220103263855			
14	-9.107470167114716	42.737612600002116	0.5127174854278564			
15	-9.10749192907481	42.73777132458794	0.7012724876403809			
16	-9.107515302759882	42.7379424832009	0.736953616142273			
17	-9.107539248414032	42.73811976007999	0.6827626824378967			
18	-9.107564972262571	42.73830964098741	0.7197367548942566			

Figura 3-16 Ejemplo de datos en formato CSV

Una vez se filtre la tabla con estas tres columnas, se procede a importarlas al programa QGIS, y para ello, una vez abierta la aplicación, en la parte superior izquierda de la barra de herramientas se selecciona la opción “Abrir Administrador de Fuentes de Datos”. Se abrirá una nueva pestaña para poder subir el archivo que se desea. La opción para elegir será “Texto delimitado”, dentro de formato de archivo se debe seleccionar “Delimitadores personalizados” por “Punto y coma”. A continuación, para definir la geometría esta será por “Coordenadas del punto” y hay que asegurarse que el “Campo X” es la columna donde se encuentra la longitud, el “Campo Y” la latitud y por último el “Campo Z” la altura ortométrica. De esta manera ya están definidas las coordenadas de los puntos con su longitud,

latitud y elevación. Por último, como ya se ha visto anteriormente, el satélite ICESat-2 trabaja en el sistema de referencia geodésico WGS 84, y a la hora de elegir el SRC (Sistema de Coordenadas de Referencia) es muy importante seleccionar “EPSG: 4326 – WGS 84”. Este sistema de coordenadas relaciona el mapa bidimensional representado en el SIG con puntos reales en la Tierra. Para latitudes medias, donde se ubican las dos zonas de estudio, se utiliza el código numérico EPSG:4326. Los códigos EPSG codifican en los SIG los distintos sistemas de coordenadas. En la Figura 3-17 se ve cada uno de estos parámetros señalados anteriormente. A continuación, una vez añadida la capa seleccionada, se podrá observar dentro del programa una línea de puntos que refleja el haz de puntos del satélite.

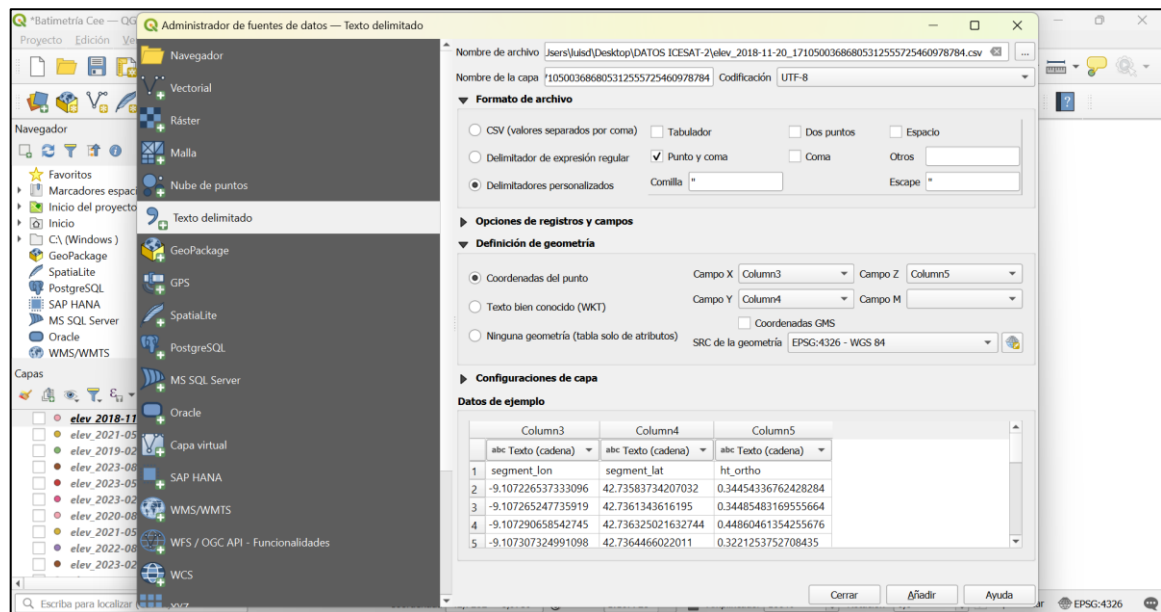


Figura 3-17 Ejemplo para la importación de los datos de un archivo CSV a QGIS

Una de las ventajas que ofrece este satélite es que cada vez que pasa por una trayectoria, no pasa exactamente por el mismo punto por el que lo hizo 91 días antes. Por eso, con la opción de Open Altimetry, podemos seleccionar las distintas fechas por las que ha pasado dicho satélite para poder obtener la mayor cantidad de puntos posibles. De esta manera, haciendo todo el proceso de descarga de datos desde 2019 hasta la última fecha disponible se obtienen una gran cantidad de datos.

Se han podido descargar hasta 20 capas distintas de datos. Se han descartado aquellas fechas en las que no había suficientes datos debido a la densidad de las nubes que impedían su obtención. Además, también se han descartado las fechas más antiguas en las que coincidían en la trayectoria. Así, habiendo descargado hasta 20 capas de ambas trayectorias, quedaría la siguiente nube de puntos (como muestra la Figura 3-18) obtenida del satélite ICESat-2 desde 2019 hasta la fecha.

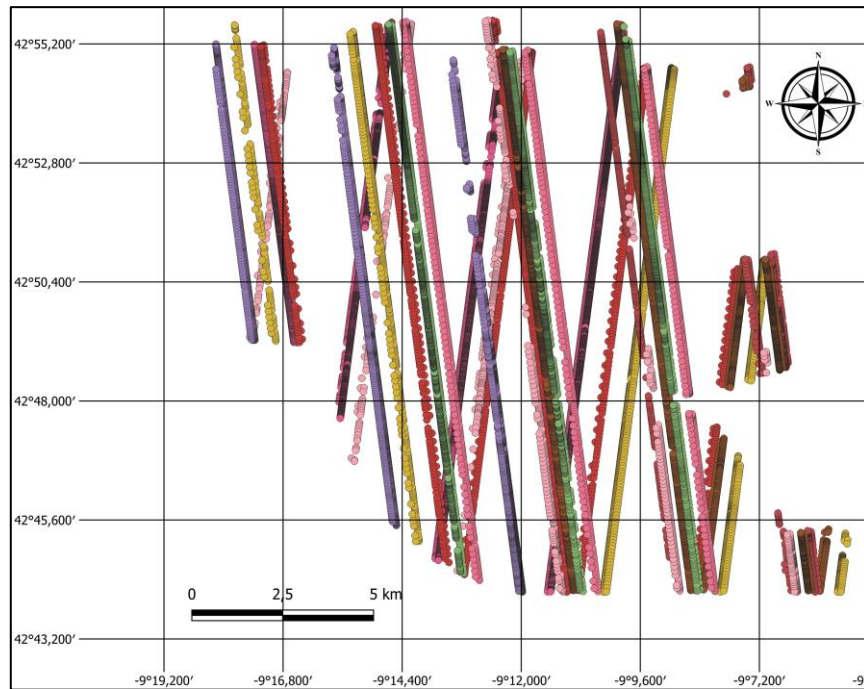


Figura 3-18 Nube de puntos del ATL13 obtenidos del satélite ICESat-2

Con esta nube de puntos de la batimetría de la zona, haría falta integrarle la parte topográfica para poder hacer el estudio topobatimétrico. Para ello, habrá que descargar del PNOA la zona topográfica de interés. Ya que el PNOA no obtiene la batimetría de ninguna zona. Lo primero que se tiene que hacer es entrar a la página web del PNOA y dentro de esta, “PNOA LiDAR”. Debajo de esta pestaña, se encuentra un hipervínculo que lo redirige al Centro de descargas del CNIG [36].

En esta nueva pestaña, en “Modelos Digitales de Elevaciones”, habrá que elegir la opción de “LiDAR 2ª Cobertura (2015-2021)” ya que es la cobertura más reciente (la 3ª cobertura está prevista que finalice en 2025). A continuación, se procederá a dibujar el área semejante de estudio, mediante la opción de “Dibujar por polígono” (Figura 3-19). Una vez dibujado, aparece la opción de descargar todos los archivos disponibles. Se procederá a ello, habiendo seleccionado antes en “Temática” la opción de “Coloreado (RGB) 2015” y el tipo de fichero será LAZ.



Figura 3-19 Área seleccionada para la descarga del PNOA

Como se trata de una zona relativamente amplia, el archivo se descarga en formato jnlp. Para descomprimir este archivo, hay que seguir los pasos explicados en este documento: [Instrucciones para la descarga automática](#).

Una vez realizada la descarga, se procederá a subir los archivos LAZ a QGIS. Para ello, y de la misma manera que para los datos en CSV, en “*Administrador de fuentes de datos*”, se seleccionará la opción de “*Nube de puntos*”. Una vez descargados todos los archivos, quedará la topobatimetría de la ría de Corcubión tal y como muestra la Figura 3-20.

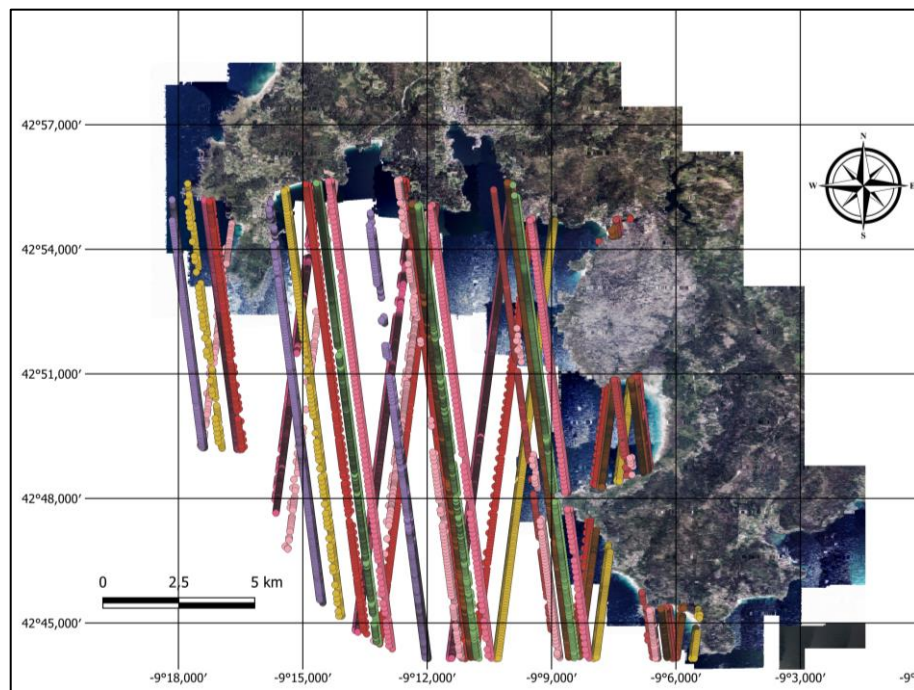


Figura 3-20 Estudio topobatimétrico integrando datos del PNOA y del ICESat-2

Una vez integrados los datos del ICESat-2 y los datos del PNOA, se va a analizar el estudio topobatimétrico de la ría de Corcubión. Para ello, se realizará un MDT con todos los trazos de los distintos haces del satélite.

Para realizar un MDT en la aplicación de QGIS, habrá que buscar en el menú superior el icono de engranaje (esquina superior derecha) llamada “*Caja de herramientas*”. Una vez se haya desplegado el menú, habrá que buscar “*Interpolación TIN*”. En la nueva pestaña habrá que añadir todas aquellas capas que se quieran interpolar para realizar el MDT. El atributo de interpolación será en este caso la columna 5 ya que corresponde al valor de la altura. Para añadir una capa, habrá que seleccionar el icono “+”. Véase en la Figura 3-21.

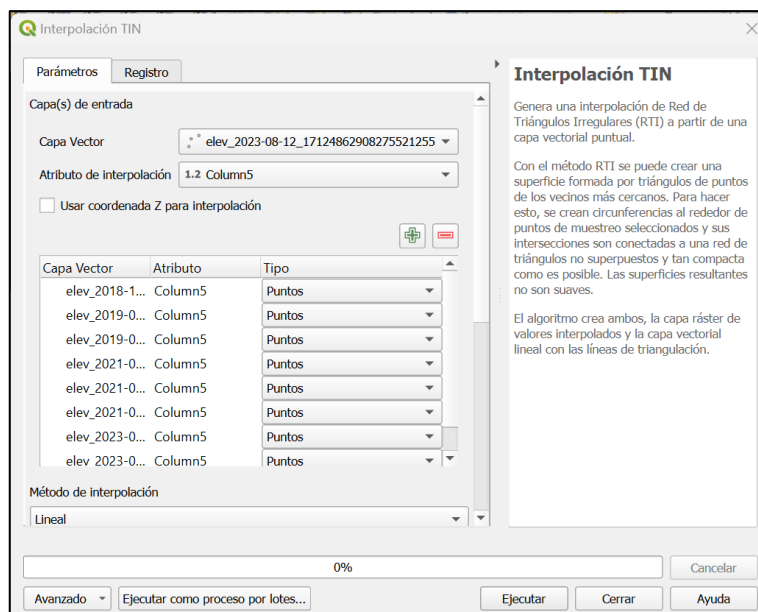


Figura 3-21 Interpolación TIN

A continuación, el método de interpolación será lineal. La extensión solamente habrá que pulsar el icono del ratón y automáticamente se mostrarán los valores de latitud y longitud en los que se realiza este MDT. Por último, el tamaño de los píxeles debe ser de 0,0001 para que el MDT generado tenga las suficiente filas y columnas como para que sea entendible. Una vez añadidos todos los parámetros se pulsará “Ejecutar” (Figura 3-22).

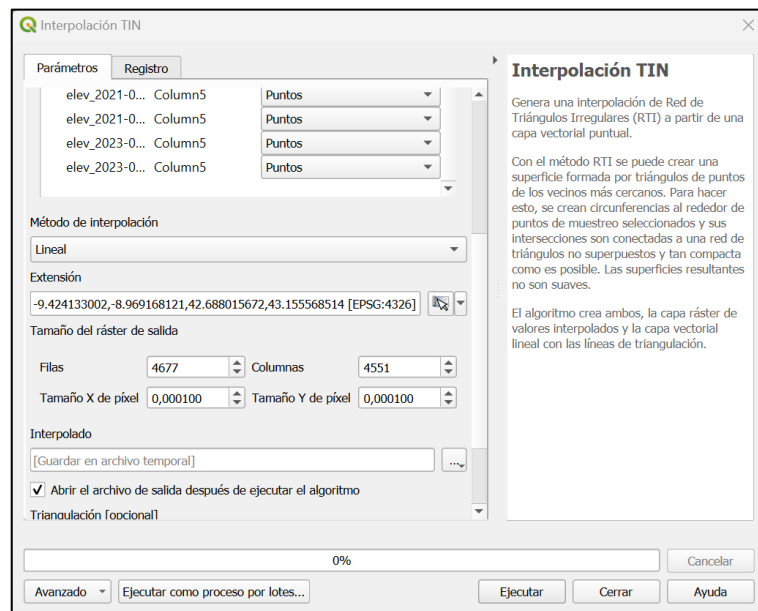


Figura 3-22 Parámetros interpolación TIN

A continuación, se va a realizar un perfil topográfico en QGIS para poder visualizar los datos en perfil. Para ello, habrá seleccionar del menú la herramienta “Ver” y en el desplegable se elegirá la opción de “Perfil de elevación”, tal y como se puede ver en la Figura 3-23. Por último, habrá que seleccionar el tercer icono empezando por la izquierda del menú de herramientas “Capture curve” que sirve para realizar un corte en la zona donde se quiera realizar el perfil topográfico.

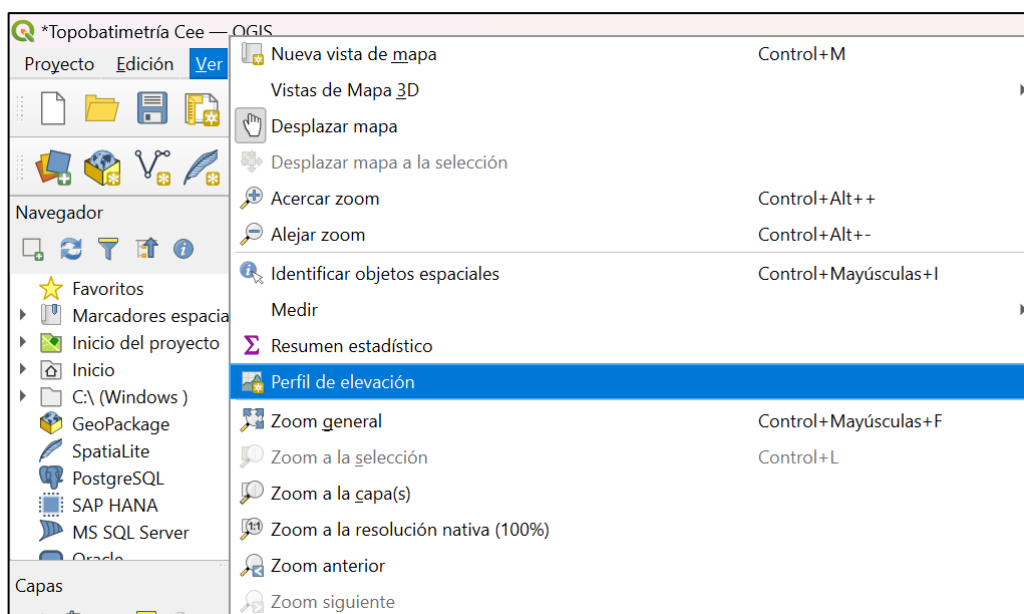


Figura 3-23 Perfil de elevación

3.4 Código Python para obtener la batimetría

La NASA a través del satélite ICESat-2, realiza cada cierto tiempo unas semanas de aprendizaje de obtención y procesamiento llamadas “*Hackweeks*”. La semana del 7 al 11 de agosto de 2023 se realizó una “*Hackweek*” donde el científico Jonathan Markle (experto en el procesamiento de datos del ICESat-2 con respecto a la costa y aguas poco profundas) expuso una conferencia sobre la obtención de la batimetría de una zona a través de un código en lenguaje Python [37]. Este código se encuentra en el Anexo III.

A continuación, se hará un estudio del perfil batimétrico de una playa próxima al Campo de Adiestramiento de la Sierra del Retén (CASR), siguiendo aquellas líneas del código que habrá que modificar y explicándolo con detalle. La Figura 3-24 muestra la zona de interés con un rectángulo azul, a través de la interfaz de Open Altimetry (La zona de más vegetación que se puede apreciar a la derecha de la trayectoria del satélite seleccionada es el CASR).

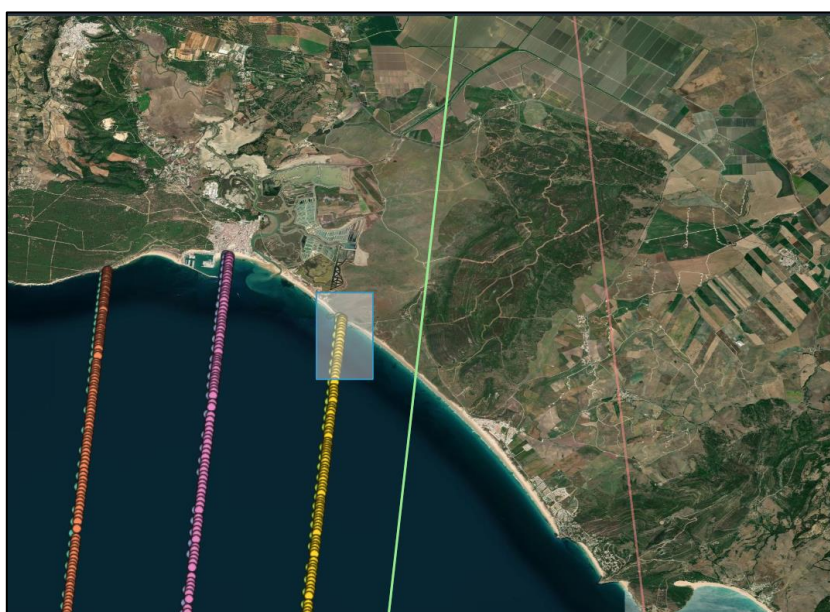


Figura 3-24 Playa del CASR a estudiar

En primer lugar, para la selección de la zona de estudio, habrá que abrir en la aplicación de Open Altimetry, “View signal Photons” (ATL03) que aparece al seleccionar una zona. En la Figura 3-25 se puede ver observar de manera muy tenue el comienzo del gradiente de la playa, sin embargo, a medida que avanza hacia mar adentro, únicamente aparece la altura del nivel del mar. Por eso, a través del código mencionado, se obtiene la batimetría de dicha playa.



Figura 3-25 Fotoness de la playa de estudio en Open Altimetry

Lo primero que habrá que saber es el número de trayectoria del haz (984) y la fecha por la que pasa por esa zona (2023-08-23). Como se puede ver en la Figura 3-26, en la línea 3 y 4 del bloque 3, se deben introducir estos datos. En el siguiente bloque (4) la opción a elegir en “aoi_name” en la línea 3, será “user_defined” esto quiere decir que se podrá escoger una zona de estudio cualquiera. Las opciones de “new_zealand”, “japan” ... son opciones predeterminadas por el código a modo de ejemplo, donde si se selecciona esa opción, automáticamente aparece una zona de estudio en dichos lugares.

```

1 # modify the following lines for custom tracks identified from Open Altimetry
2
3 target_date = '2023-08-23' # 'YYYY-MM-DD'
4 target_rgt = 984 # track ID

[ ] 1 # set aoi_name to user defined if date/rgt specified using OpenAltimetry
2
3 aoi_name = 'user_defined' # options: user_defined, new_zealand, japan, north_c
4
5 aoi_data = {
6     'user_defined': {
7         'target_date': target_date,
8         'target_rgt': target_rgt,
9         'bbox_coords': [],
10    },
11    'new_zealand': {

```

Figura 3-26 Bloque 3 y 4 del código

A continuación, cuando se ejecute el siguiente bloque del código (5), aparecerá el mapa del mundo, muy parecida a la interfaz del Open Altimetry. Por lo tanto, se debe seleccionar el área de estudio mediante el cuadrado que se encuentra en la izquierda del mapa, tal y como muestra la Figura 3-27.

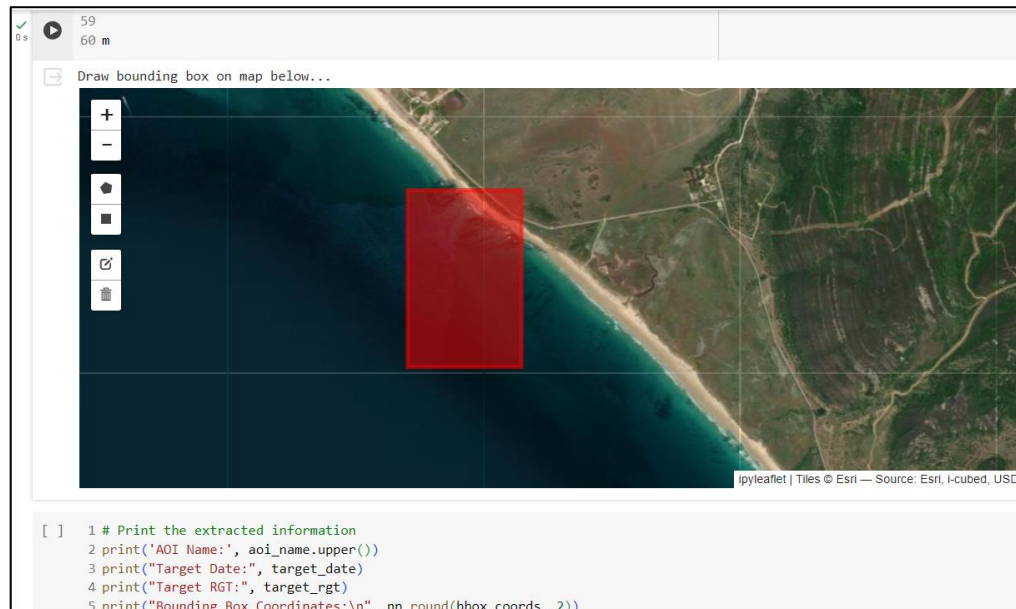


Figura 3-27 Bloque 5 del código, dibujar el área de interés

Cuando se ejecute el bloque 6, se guardarán las coordenadas del rectángulo dibujado, como aparece en la Figura 3-28. En las líneas 3 y 4 del bloque 7, habrá que escoger el tipo de haz, es decir, el fuerte o el débil y el número del haz respectivamente, esto se puede ver en la aplicación de Open Altimetry. Para este caso, tal y como se puede ver en la Figura 3-25, el tipo de haz seleccionado para esta zona es el “*gt1l*” (strong). Por norma general, siempre se utilizará el haz fuerte ya que es el que más potencia tiene y por lo tanto el que más fiabilidad tendrá a la hora de obtener la batimetría.

```

[8] 1 # Print the extracted information
    2 print('AOI Name:', aoi_name.upper())
    3 print("Target Date:", target_date)
    4 print("Target RGT:", target_rgt)
    5 print("Bounding Box Coordinates:\n", np.round(bbox_coords, 2))

AOI Name: USER_DEFINED
Target Date: 2023-08-23
Target RGT: 984
Bounding Box Coordinates:
[[[-5.89 36.16]
  [-5.89 36.17]
  [-5.88 36.17]
  [-5.88 36.16]
  [-5.89 36.16]]

  [[-5.9 36.16]
  [-5.9 36.17]
  [-5.89 36.17]
  [-5.89 36.16]
  [-5.9 36.16]]]

[ ] 1 # use the middle, strong beam for this demo
    2 # for more on this, see the ATL03 user guide, or other hackweek documentation
    3 beam_type = 'strong'
    4 track_num = 1
    
```

Figura 3-28 Bloque 6 y 7 del código

A continuación, los siguientes bloques del código (8, 9 y 10) se ejecutarán sin hacer ninguna modificación sobre ellos. Hasta llegar al número 11 el cual una vez se ejecute, se podrá confirmar que los datos que se han introducido anteriormente (el número de trayectoria, fecha y el rectángulo dibujado) coinciden ya que al subir al bloque 5 (donde había que dibujar el área seleccionada) se mostrará la línea de trayectoria con una marca verde, tal y como se puede observar en la Figura 3-29.



Figura 3-29 Confirmación de que los datos introducidos son los correctos

En el bloque 12 línea 2, habrá que establecer los límites en el eje “y” (eje de elevación), como muestra la Figura 3-30. Esto puede resultar de gran utilidad a la hora de conocer de manera más detallada el gradiente de una playa si se pone unos límites más pequeños. Además, es de gran utilidad para tener en cuenta el calado de las embarcaciones de desembarco, al poner de límite el calado de esta embarcación, sabremos la distancia que tendrán que recorrer las tropas bajo el agua.

```

1 # get location of every 100th photon (to reduce data load)
2 ph_lon = df.geometry.x.values[::100]
3 ph_lat = df.geometry.y.values[::100]
4 ph_loc_list = [[y, x] for x, y in zip(ph_lon, ph_lat)]
5
6 ground_track = ipyleaflet.Polyline(locations=ph_loc_list,
7                                     color='limegreen', weight=5)
8
9 m.add_layer(ground_track)
10
11 # see map above has been updated with the satellite ground track!

[ ] 1 # elevation range for plotting
2 ylim = [-20, 10]
3
4 # filter very shallow / deep data to refine bathymetry
5 min_bathy_depth = 0.5
6 max_bathy_depth = 30

```

Figura 3-30 Bloque 11 y 12 del código

Todos los demás bloques del código se ejecutarán sin modificar nada. En el bloque 13, se comenzará a visualizar los fotones recibidos sin mostrar todavía la batimetría de la zona, aparecen todos los fotones recibidos, incluido el ruido, el buffer y los fotones de menor confianza. De tal manera que se obtienen muchos datos aun sin aclarar, aunque se puede ver cómo hay una clara tendencia de fotones que van indicando la batimetría de la playa. Además, se ver también perfectamente una clara línea de mismo nivel que indica el nivel del agua.

Sin entrar en detalle en el código, los siguientes bloques del código sirven para eliminar todos estos datos que son redundantes a la hora de conocer la batimetría de una zona. En el código se van mostrando una serie de gráficas que permiten seguir paso por paso los resultados que se van obteniendo hasta que finalmente se muestra la gráfica con una línea que refleja el nivel del suelo marino [22]. Esta gráfica se mostrará en el apartado 4.2.1 Resultados del producto ATL03.

Por último, se hará un estudio multitemporal de la misma zona para poder comparar los datos a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se comentan en el apartado 4.2.2 Estudio multitemporal.

4 RESULTADOS

Una vez explicado los distintos procesos de obtención de la batimetría en las distintas zonas, se van a explicar los resultados obtenidos y el porqué de estos. En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos del estudio topobatimétrico de la ría de Corcubión obtenida con el ATL13 (batimetría) y el ATL08 (topografía). A continuación, se expondrán los resultados de la playa del Retín, mediante el código comparándola con la carta náutica y realizando un estudio multitemporal de la misma. Por último, se empleará el código para un haz en concreto de la Ría de Corcubión comparándola con los resultados obtenidos del QGIS

4.1 Resultados de la Ría de Corcubión

4.1.1 Resultados del producto ATL13

El MDT generado en el entorno QGIS, tal y como se puede ver en el panel de Capas a la izquierda de la Figura 4-1, tiene unos valores de altura ortométrica entre 3,36 y -3,44 metros mientras que en la en la carta náutica mostrada en la Figura 4-2, aparecen sondas que alcanzan hasta 200 metros. Analizando el archivo en detalle, y contrastando los datos del producto ATL13 con un perfil de elevación de la Ría de Corcubión (Figura 4-3), se demuestra que las alturas de los puntos que proporciona este producto derivado del ICESat-2 no superan incluso los 4 m por debajo del nivel medio de los mares en una de las zonas más profundas de la ría.

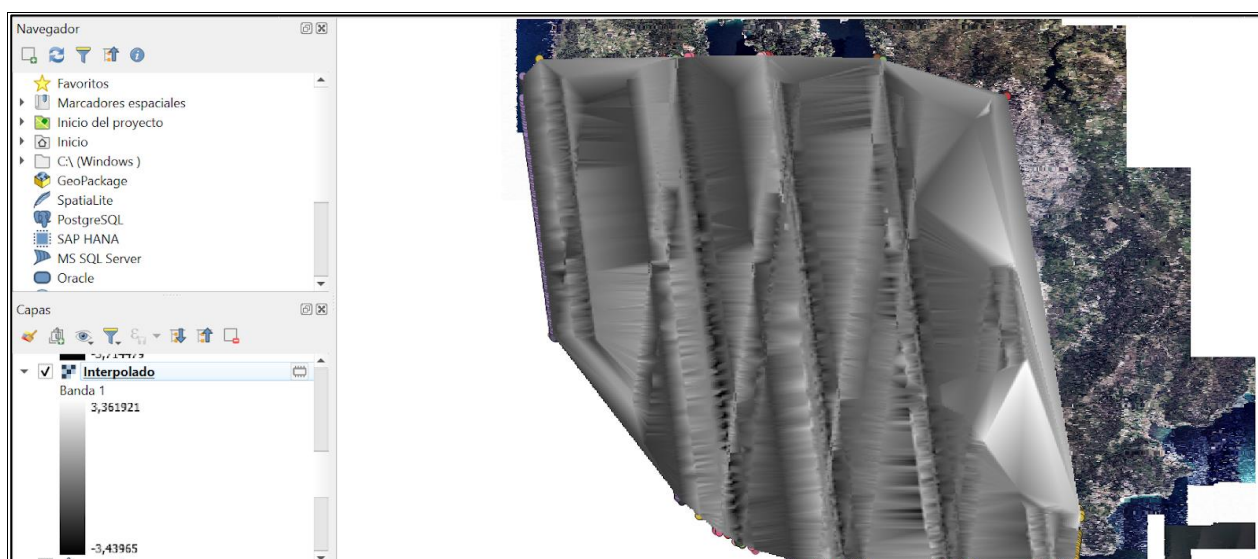


Figura 4-1 Modelo MDT de la ría de Corcubión

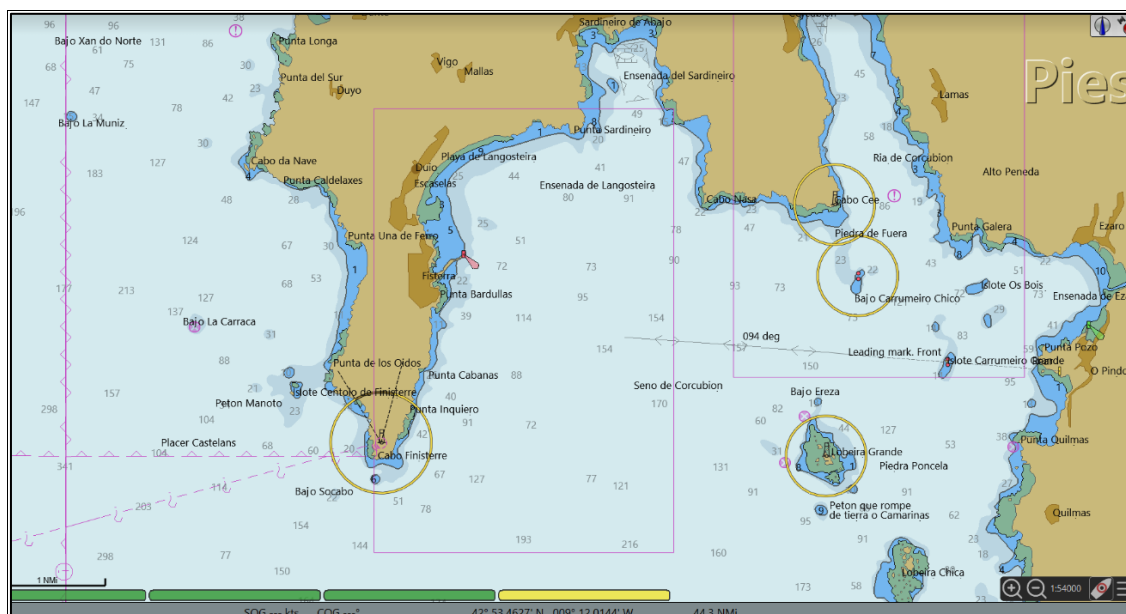


Figura 4-2 Carta náutica de la ría de Corcubión

En particular, si se observan detenidamente cada una de las líneas que reflejan la trayectoria del satélite, se puede apreciar que los puntos describen ondulaciones, similares a las crestas y valles de las olas de superficie. Esto nos lleva a pensar que los datos recogidos por el ATL13 en la interfaz de Open Altimetry, no penetran en el mar y devuelven estadísticas más próximas a la altura de la superficie del agua o altura significativa de la ola. Se concluye por tanto que los datos proporcionados por el ATL13 no son adecuados para realizar un estudio batimétrico de ninguna ría.

Es por ello por lo que, para poder llevar a cabo un estudio batimétrico, será necesario trabajar con todos los fotones recibidos del ATL03 y no con los del ATL13, que es un producto derivado partir del primero.

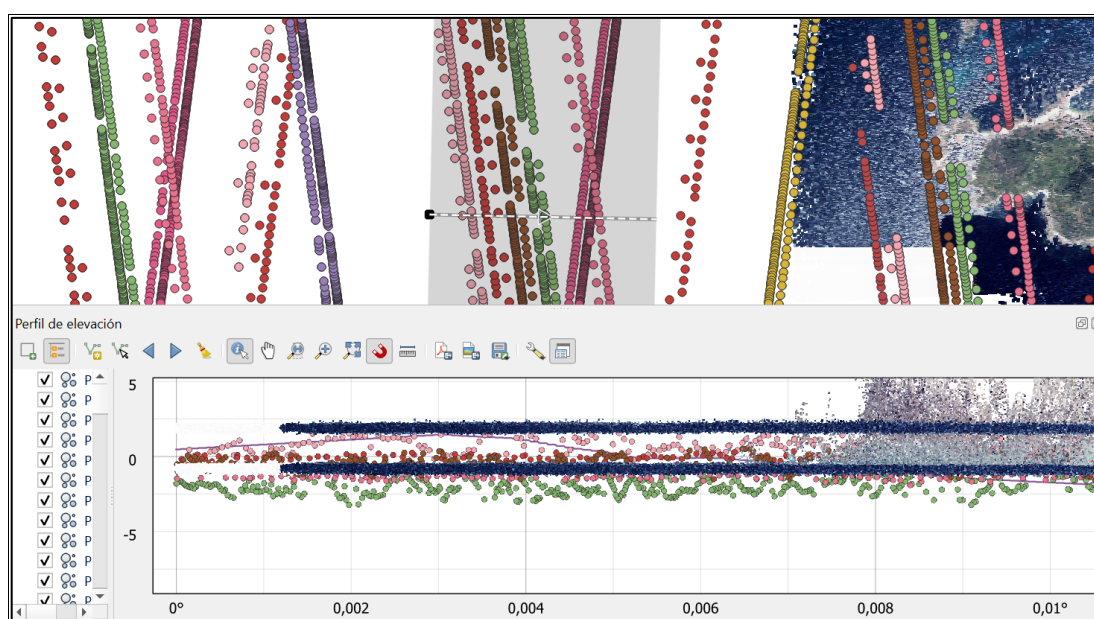


Figura 4-3 Perfil de elevación ampliado de la Ría de Corcubión

4.1.2 Resultados del producto ATL08

Para demostrar que el satélite ICESat-2 permite obtener datos topográficos, se ha realizado un estudio siguiendo la metodología que se explica en el apartado 3.3 Importación de datos en QGIS, pero en esta ocasión añadiendo los datos del producto ATL08 (Figura 4-4).

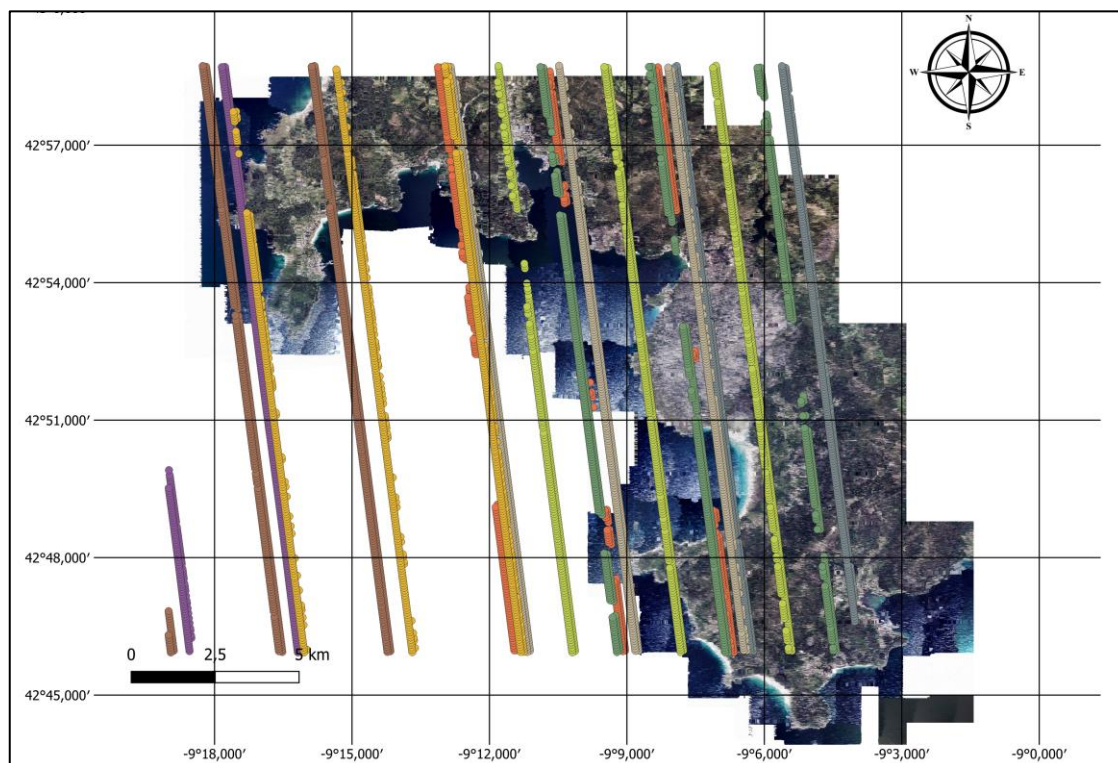


Figura 4-4 Datos importados del ATL08 en la Ría de Corcubión

Al realizar la importación de datos CSV a Microsoft Excel, se muestran en pantalla una serie de parámetros distintos al ATL13, tal y como muestra la Figura 4-5. Las columnas 1, 2, 3, 4, 9, 10 y 11 son idénticas que en el ATL13. Las otras columnas recogen nuevos campos:

- “*h_te_best_fit*” (5): Esta variable se refiere a la mejor estimación de la altura de la superficie terrestre obtenida mediante el procesamiento de los datos láser del satélite ICESat-2. Representa la altura promedio de la superficie terrestre en un área específica.
- “*h_te_uncertainty*” (6): Indica la incertidumbre asociada con la estimación de la altura de la superficie terrestre. Es importante tener en cuenta que las mediciones láser pueden estar sujetas a cierto grado de error, y esta variable proporciona una medida de esta incertidumbre.
- “*h_canopy*” (7): Se refiere a la altura de la parte superior del dosel de la vegetación, es decir, la altura máxima de ésta en un área determinada. Esta medida es útil para estudios de vegetación y ecología, ya que proporciona información sobre la estructura vertical de la vegetación en un paisaje.
- “*h_canopy_uncertainty*” (8): Al igual que sucedía con la incertidumbre asociada con la altura de la superficie terrestre, esta variable indica la incertidumbre en la estimación de la altura del dosel vegetal. Puede existir variabilidad en la medición de la altura de la vegetación debido a factores como la densidad y la estructura del dosel, y esta variable proporciona una medida de dicha incertidumbre.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8	Column9	Column10	Column11
segment_id_beg	segment_id_end	longitude	latitude	h_te_best_fit	h_te_uncertainty	h_canopy	h_canopy_uncertainty	track_id	beam	file_name
801046	801050	-5.886775016784668	36.19005584716797	43.7198337402344	0.7404600977897644	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801051	801055	-5.8868818283081055	36.18915557861328	43.64357376098633	0.9687212705612183	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801056	801060	-5.886988639831543	36.18825912475586	43.60244369506836	0.9684900045394897	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801061	801065	-5.887094020843506	36.18735885620117	43.733673095703125	0.8072421550750732	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801066	801070	-5.88720178604126	36.186458587646484	43.70015335083008	0.38314956426620483	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801071	801075	-5.887308597564697	36.1855583190918	43.68598556518555	0.1441892385482788	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801076	801080	-5.8874125480651855	36.184661865234375	43.74111557006836	0.930863618850708	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801081	801085	-5.887524127960205	36.18376159667969	45.576717376708984	0.8141289949417114	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801096	801100	-5.887840270996094	36.18106460571289	55.76565170288086	1.741902470588684	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801106	801110	-5.888059618088867	36.17926788330078	46.46818161010742	0.876283586025238	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801111	801115	-5.888166427612305	36.178367614746094	43.88615036010742	0.8657925724983215	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801116	801120	-5.888274192810059	36.177467346191406	43.82490158081055	0.3198947310447693	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801121	801125	-5.888382434844971	36.17656707763672	44.902706146240234	0.7616837024688721	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801136	801140	-5.888705253601074	36.17367008666992	54.72348403930664	1.1392515897750854	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801141	801145	-5.888808727264404	36.1729736328125	54.27377700808064	1.2618441581726074	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801146	801150	-5.888922214508057	36.17207336425781	52.42698287963867	1.2693398388580322	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801151	801155	-5.8890275955200195	36.171173095703125	49.981117248535156	1.0004957914352417	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801156	801160	-5.889128684997559	36.17027282714844	48.306884765625	1.03286874294281	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5
801161	801165	-5.889241695404053	36.169376373291016	48.1824951171875	0.9810801148414612	3.4028234663852886E38	3.4028234663852886E38	984	gt1r	ATL08_20230823151418_09842006_006_01.h5

Figura 4-5 Parámetros en Excel del ATL08

Para la importación de los datos en QGIS, los parámetros que se tienen en cuenta son longitud, latitud y altura más adecuada “*h_te_best_fit*” (Columnas 3, 4 y 5 respectivamente).

La Figura 4-6, muestra un perfil topográfico de la Ría de Corcubión integrando los productos del ATL08 con los del PNOA. Se puede comprobar como efectivamente el satélite ICESat-2 proporciona los datos topográficos a través del láser ATLAS. Aunque como es esperable, los modelos topográficos obtenidos trabajan a distintas escalas: el modelo del PNOA proporciona mayor resolución (0,5 puntos por cada m²) mientras que el ATL08 ofrece puntos de elevación cada 100 m en dirección paralela a la trayectoria del satélite [29].

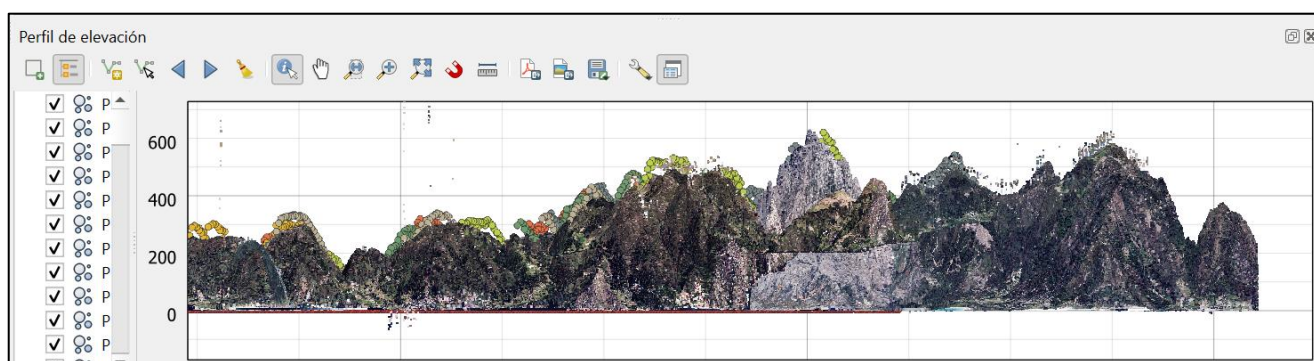


Figura 4-6 Perfil topográfico ATL08 en la Ría de Corcubión

Por otro lado, si realizamos el perfil topográfico seleccionando únicamente uno de los haces obtenidos del ATL08 (Figura 4-8), se puede observar cómo los datos del satélite están aproximadamente 55 metros más elevados con respecto a los datos obtenidos del PNOA.

Esto se debe a que los datos proporcionados por el PNOA utilizan como referencia el geoide EGM 08 mientras que las alturas derivadas del instrumento ATLAS son relativas al elipsoide WGS-84. Esto significa que los primeros datos representan alturas ortométricas mientras que los segundos trabajan con alturas elipsoidales. La altura ortométrica se mide desde el geoide hasta el punto de interés, mientras que la altura elipsoidal se mide desde el elipsoide de referencia hasta el mismo punto.

La ondulación del geoide (N) es la altura del geoide en relación con un elipsoide de referencia dado y puede calcularse como $N=h-H$, donde H es la altura ortométrica y h, la altura elipsoidal. Si se comprueba el valor de la ondulación del geoide en la Ría de Corcubión mediante el conversor disponible en [31], se observa un valor de 55,767 metros (Figura 4-7), lo cual confirma que el satélite proporciona datos altimétricos del terreno con gran precisión.

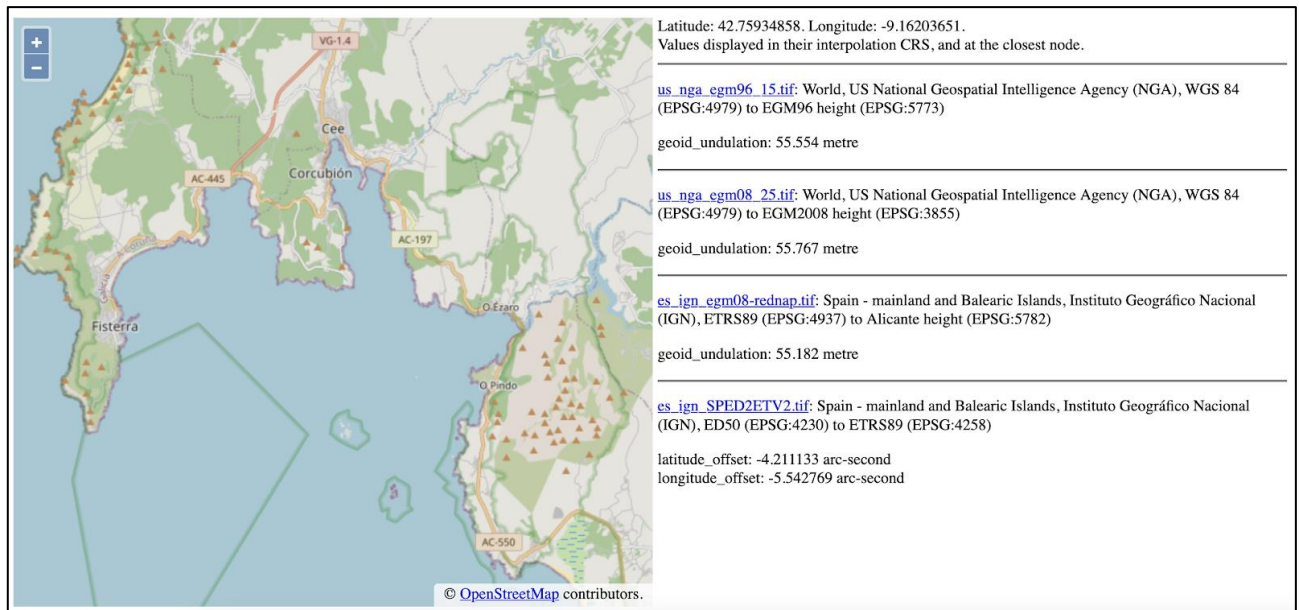


Figura 4-7 Interfaz programa CDN para conversor de alturas [31]

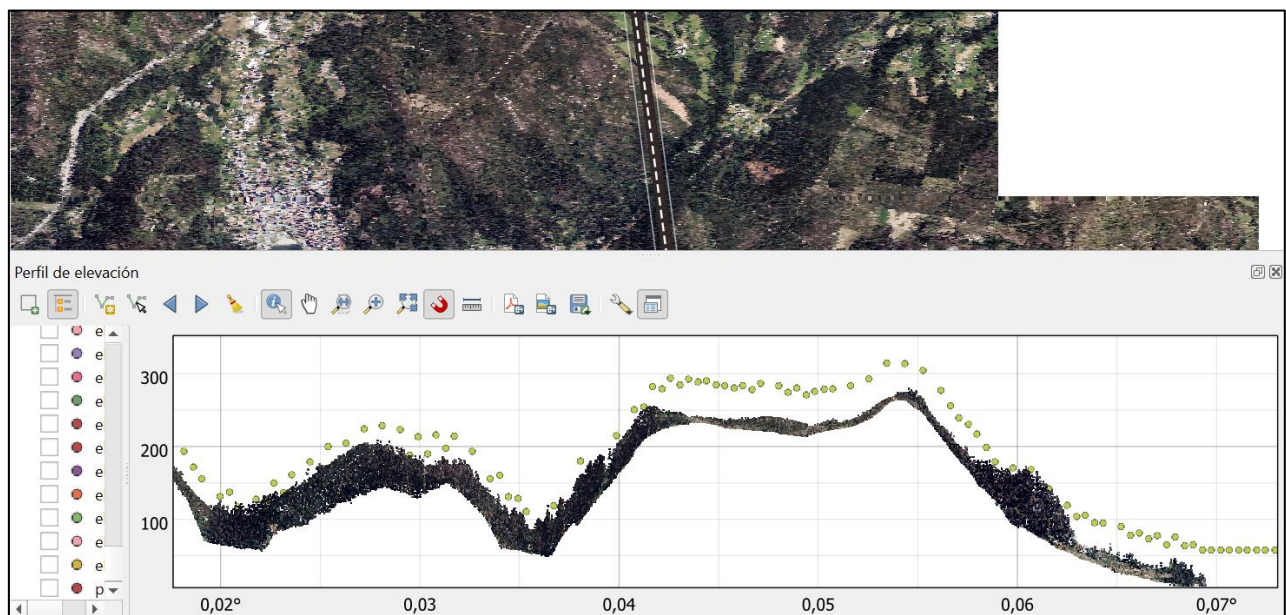


Figura 4-8 Perfil topográfico del ATL08 ampliado

En las Figura 4-9 y Figura 4-10, se puede ver una zona ampliada donde la cota de los datos del ICESat-2 es de 522,8 metros y la cota del PNOA es de 467,7 metros, siendo la diferencia de cotas de 55,1 metros.

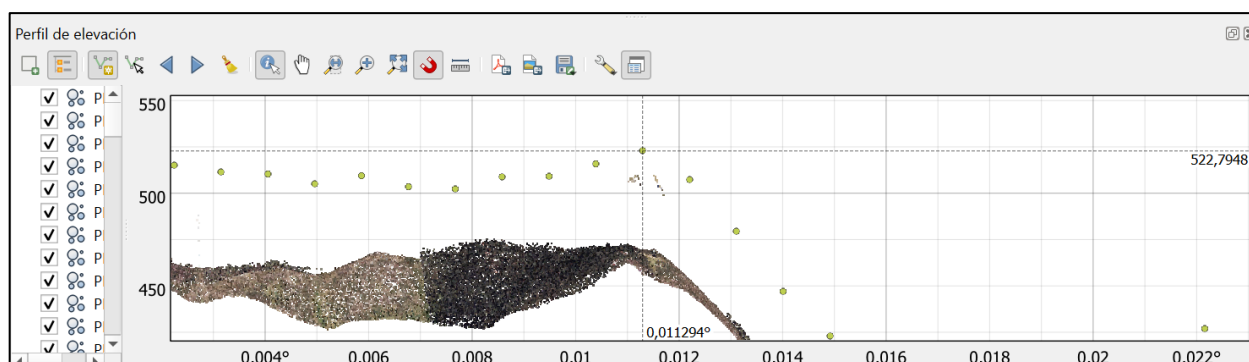


Figura 4-9 Cota del ICESat-2 a 522,8 metros

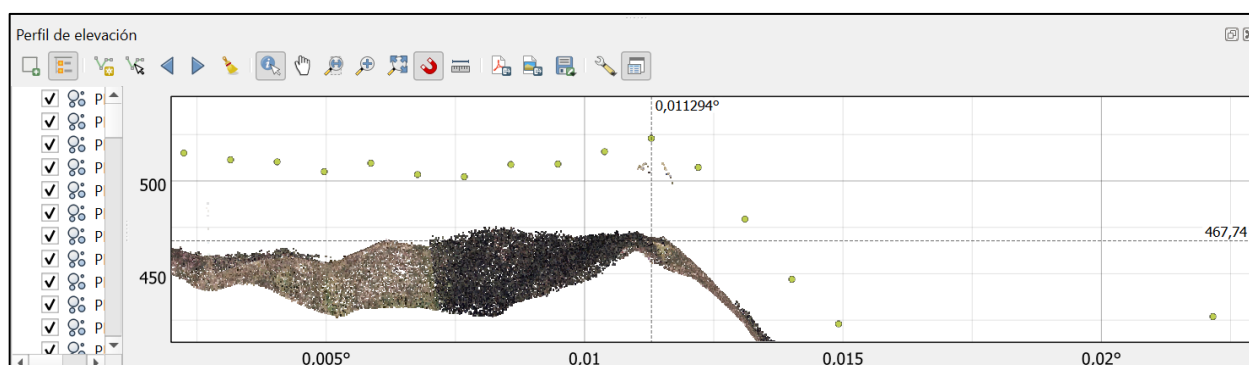


Figura 4-10 Cota del PNOA a 467,7 metros

4.2 Resultados de la playa del Retén

4.2.1 Resultados del producto ATL03

En vista de los resultados obtenidos en el apartado 4.1 Resultados de la Ría de Corcubión, donde se ha comprobado que el ATL13 no obtiene la batimetría de la zona, se va a realizar un estudio batimétrico mediante el código de Python que utiliza los fotones del ATL03.

Los fotones del ATL03 también se pueden descargar como CSV en la aplicación de Open Altimetry, tal y como muestra la Figura 4-11. La única diferencia con respecto a los otros dos productos de datos derivados del ATLAS es la columna 5 “*confidence code*”, que recoge valores entre 0 y 4. Esta columna contiene un código que indica el nivel de confianza o certeza asociado con las mediciones de altimetría láser realizadas por el satélite.

El 4, indica que la medición tiene una alta fiabilidad y se considera muy precisa. El 2, indica que la medición tiene una fiabilidad aceptable, pero puede estar sujeta a cierto grado de incertidumbre. Por último, el 0, indica que la medición tiene una baja fiabilidad y puede no ser precisa.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5
beam	latitude	longitude	photon height	confidence code
gt1l	36.168130	-5.888445	157.269348	0
gt1l	36.168127	-5.888443	49.669186	4
gt1l	36.168126	-5.888448	244.051163	0
gt1l	36.168123	-5.888446	155.892120	0
gt1l	36.168123	-5.888445	131.753418	0
gt1l	36.168121	-5.888443	49.711311	4
gt1l	36.168118	-5.888441	-42.226887	0
gt1l	36.168115	-5.888439	-147.263336	0
gt1l	36.168117	-5.888446	146.652878	0
gt1l	36.168114	-5.888444	49.733150	4
gt1l	36.168114	-5.888444	49.729511	4
gt1l	36.168110	-5.888441	-87.221230	0
gt1l	36.168111	-5.888448	180.897034	0
gt1l	36.168108	-5.888445	46.711349	2
gt1l	36.168108	-5.888445	49.770603	4
gt1l	36.168106	-5.888450	236.647720	0

Figura 4-11 Tabla de parámetros del ATL03 en Excel

A continuación, se van a descartar los valores de “*confidence code*” 0 y 1, ya que corresponden al ruido y al buffer. Para ello se debe pulsar el desplegable de la columna 5 y se filtran indicando aquellos valores deseados (2, 3 y 4 en este caso).

En la Figura 4-12, se muestra el perfil de elevación en QGIS de los datos obtenidos del ATL03 en la playa del Retén. Como se puede ver, hay una gran cantidad de fotones almacenados que no permiten realizar un estudio de manera óptima. Sin embargo, en la Figura 4-13 se ha hecho una ampliación del primer kilómetro donde no hay tanta interferencia. Se puede confirmar, igual que en la Figura 3-25, que aparecen las primeras muestras de batimetría, aunque no sea de manera precisa.

Es por eso por lo que a través del código propuesto en Python se puede obtener de manera precisa la batimetría en esas zonas donde aparecen unas primeras muestras batimétricas. A diferencia de zonas como la Ría de Corcubión donde éstas ni tan siquiera aparecen en el ATL03 de la interfaz de Open Altimetry.

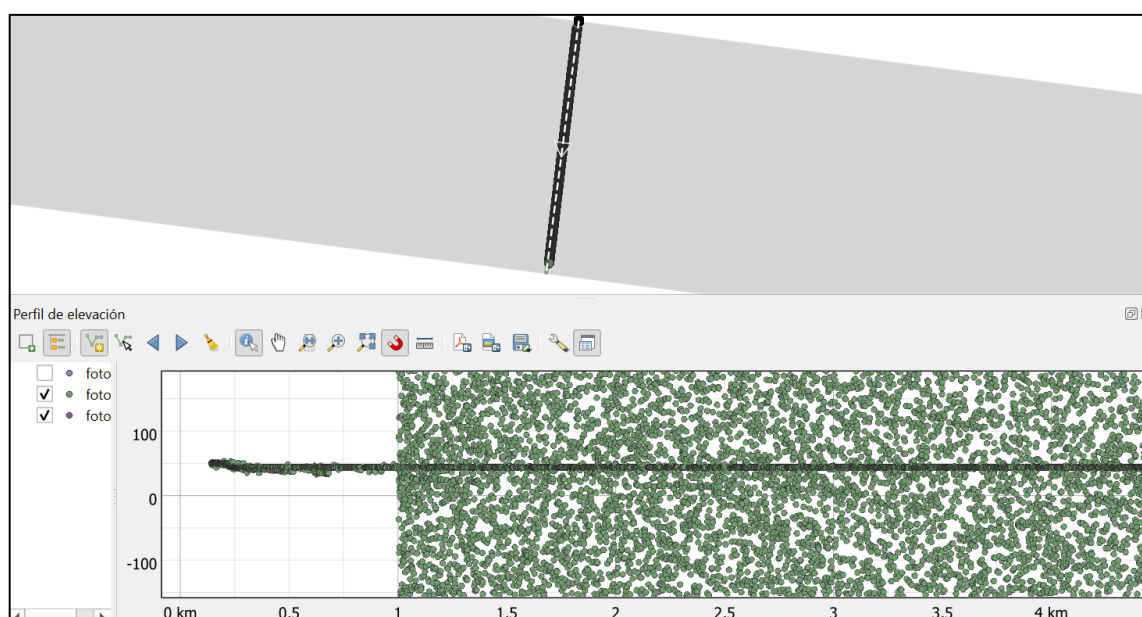


Figura 4-12 Perfil topográfico de los fotones del ATL03 en QGIS

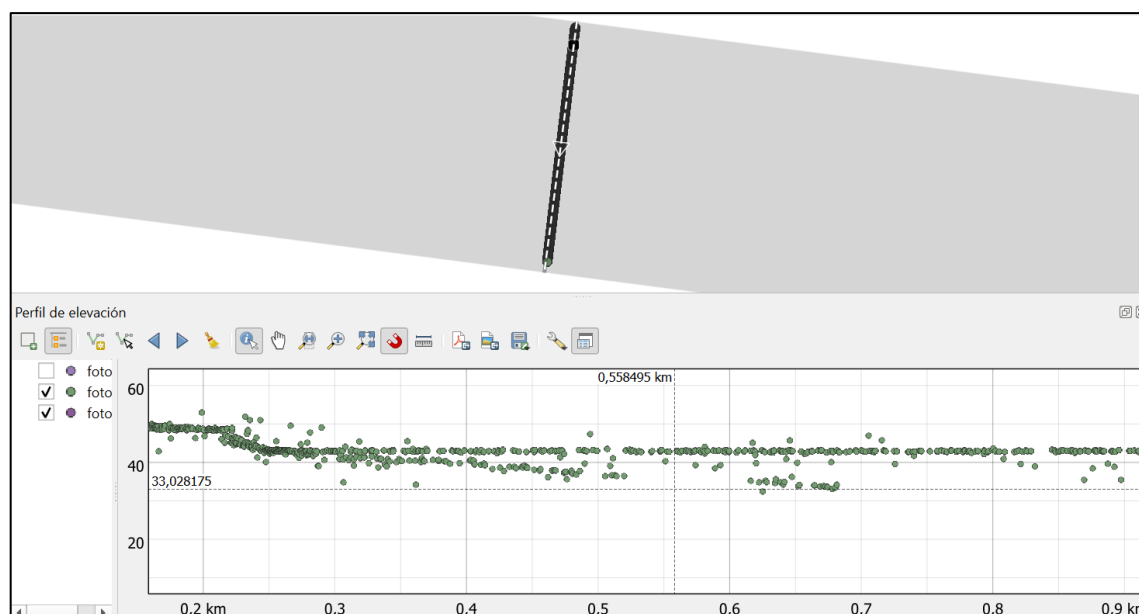


Figura 4-13 Perfil topográfico ampliado de los fotones del ATL03 en QGIS

Por lo tanto, una vez se han introducido todos los datos explicados en el apartado 3.4 Código Python para obtener la batimetría, se deben ejecutar todos los siguientes bloques del código, estos bloques nos irán dando información del proceso de obtención de la batimetría, eliminando todo el ruido y aquellos fotones que no son de utilidad. Hasta que finalmente, en el bloque número 25, se muestra el resultado de la gráfica “*Refraction Corrected Bathymetry*”.

Tal y como muestra la Figura 4-14, la gráfica nos muestra con una línea de color rojo (Estimated Seafloor) una estimación del gradiente de dicha playa. Los puntos de color azul se refieren a una estimación de la superficie del agua. A través de esta estimación, se marca la cota 0 para conocer luego la profundidad del suelo marino. Los puntos negros de mayor grosor son aquellos fotones corregidos mediante el código, a partir de estos fotones se traza la línea roja que representa la batimetría. Por último, los puntos negros más finos son aquellos fotones no corregidos y que, por lo tanto, no son de interés para el estudio.

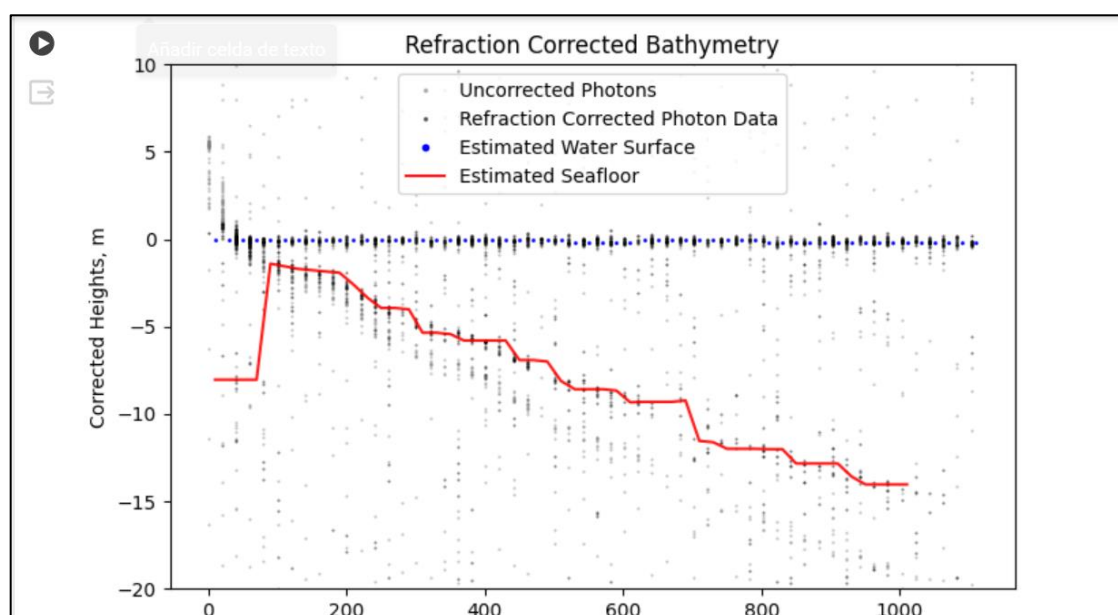


Figura 4-14 Batimetría de la playa del Retín del 23/08/2023

Gracias a esta gráfica, sabemos que, a la distancia de 1 kilómetro, la profundidad del lecho marino es de aproximadamente 13 metros. Se puede apreciar también que se sigue una pendiente bastante similar, como una línea recta.

Además, en la Figura 4-14 se puede ver como a medida que se va acercando a la playa, aproximadamente a 100 metros, la línea vuelve a los 8 metros por debajo del nivel del mar. Esto constituye claramente un fallo a la hora de hacer la estimación del suelo marino, pues como se puede apreciar, los fotones corregidos tienden a subir hasta una cota positiva.

Esto se puede deber a que el código seguramente se emplee para estudiar el fondo marino y, al llegar a cotas al nivel del mar (como puede ser una playa), vuelva a detectar fotones de menor intensidad forzando que haya profundidad.

De todas formas, se puede entrar más en detalle, modificando una serie de parámetros en el código para poder ver mejor este gradiente de la playa y poder hacer un mejor estudio. Para ello, en el Bloque 12, línea 2 (como muestra la Figura 3-30) los límites en el eje “y” los modificaremos a 5 metros para poder observar mejor el gradiente en la entrada en playa. Además, en el bloque 25 (que es el bloque que nos proporciona la gráfica de la Figura 4-14) habrá que introducir una línea en el código, como muestra la Figura 4-15. La nueva línea es la 21. Aquí se está acotando la zona de estudio a los primeros 100 metros de entrada en playa.

```

1 f = plt.figure(figsize=(8, 5))
2
3 # # unrefracted photon elevations
4 plt.plot(df.along_track_meters, df.height_ortho, '.',
5          c='grey', markersize=1, alpha=0.5, label='Uncorrected Photons')
6
7 plt.plot(df_cleaned.along_track_meters, df_cleaned.height_ortho + df_cleaned.dz_refraction, 'k.',
8          markersize=1, alpha=0.5, label='Refraction Corrected Photon Data')
9
10 plt.plot(bin_centers_at, water_surface, 'b.',
11           markersize=2, alpha=1, label='Estimated Water Surface')
12
13 plt.plot(bin_centers_at, bathymetry_corrected, 'r-',
14           markersize=1, alpha=0.9, label='Estimated Seafloor')
15
16
17
18 plt.ylabel('Corrected Heights, m')
19 plt.xlabel('$x_{ATC}$, m');
20 plt.ylim(ylim)
21 plt.xlim([0, 100])
22 plt.title('Refraction Corrected Bathymetry');
23 plt.legend(markerscale=3)
24 plt.show()

```

Figura 4-15 Bloque 25 del código

Por lo tanto, la nueva gráfica de batimetría es la que aparece en la Figura 4-16, esta gráfica se ha acotado a los primeros 100 metros que corresponden a la entrada en playa y, además, a una profundidad de 5 metros, para poder entrar más en detalle en esta zona que se considera crítica a la hora de desembarcar por el calado de las embarcaciones.

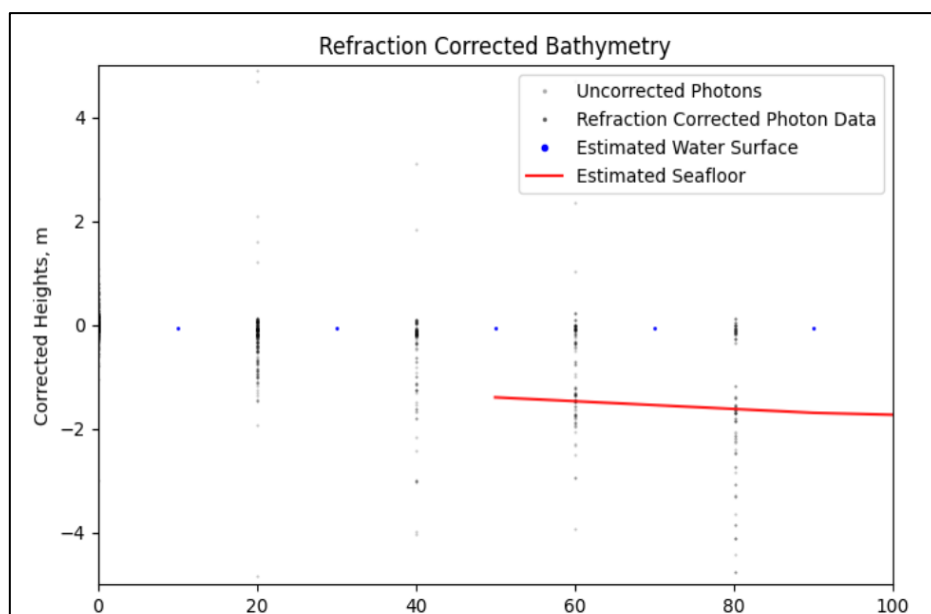


Figura 4-16 Gráfica de la batimetría en los primeros 100 metros

Esta gráfica, como se ha podido ver con anterioridad, no llega a cruzar el fondo marino con el nivel del mar. De todas formas, se puede ver la tendencia de la playa en los primeros 100 metros. De hecho, se puede intuir que aproximadamente en el metro 15 es cuando se produce este corte del nivel del mar con el fondo marino. Por lo tanto, sabiendo que el calado de las LCM (Lanchas de desembarco clase LCM-1E) de la Armada es de 1 metro con la máxima carga, se puede hacer una estimación de donde van a varar estas embarcaciones y entonces saber la distancia que las tropas van a recorrer desde que la embarcación vara hasta llegar a playa (Figura 4-17).

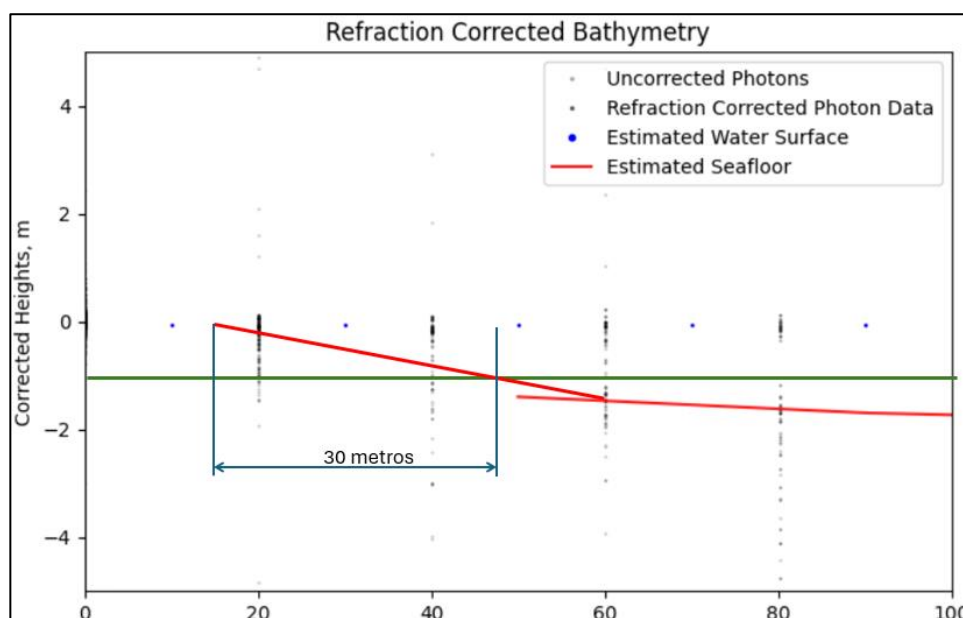


Figura 4-17 Estimación varada de las LCM

La línea verde muestra el límite de 1 metro que simula el calado con carga máxima de las LCM de la Armada. La línea roja superior representa la tendencia de la batimetría hasta la llegada en playa de manera intuitiva pero que permite hacer una aproximación de la distancia que las tropas van a recorrer a pie hasta la llegada a playa, aproximadamente 30 metros.

Por último, se va a comprar la Figura 4-14 con una carta náutica para ver si coinciden las batimetrías de la playa. La Figura 4-18 muestra la sonda en la zona del Retín, donde la línea azul simula la trayectoria del satélite, con las distancias de cada tramo entre isóbatas. Esta imagen fue tomada del IHM [38].

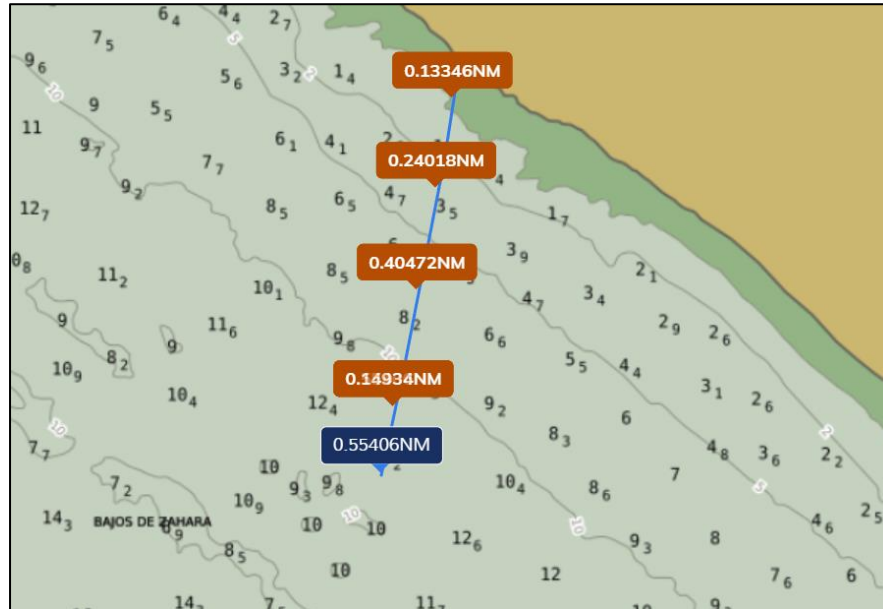


Figura 4-18 Carta náutica de la playa del Retín

Por lo tanto, si se hace una comparación de la batimetría obtenida por el satélite con respecto a la carta náutica se puede ver que efectivamente, en el primer kilómetro de mar adentro (0,54 millas náuticas) la profundidad del mar no es superior a los 15 metros. La primera isóbata que corresponde con el tramo de 200 metros (0,13 NM), tanto en la carta náutica como en la batimetría del satélite, no llega a los 3 metros de profundidad. La siguiente isóbata se encuentra a 450 metros (0,24 NM) y su profundidad coincide con unos 6, 7 metros bajo el nivel del mar. Por último, a 750 metros (0,4NM), ya existe una profundidad de 10 metros.

Entonces, tras este análisis podemos concluir que la batimetría obtenida por el satélite en la playa del Retín (Figura 4-14) coincide perfectamente con las isóbatas de la carta náutica (Figura 4-18).

4.2.2 Estudio multitemporal

En este apartado se realizará un estudio multitemporal de dicha playa del Retín. Para ello, se han seleccionado las siguientes fechas: el 1 de junio de 2019, el 27 de agosto de 2021 y el 23 de febrero de 2023. Gracias a las trayectorias realizadas por el satélite desde su puesta en órbita, podemos seleccionar hasta 20 fechas. Sin embargo, habiendo hecho una visualización de las 20 trayectorias, únicamente en 5 de ellas coincide la trayectoria seleccionada en la Figura 3-24. De estas 5, se han seleccionado las 3 mencionadas antes, ya que son aquellas en las que se han obtenido la mayor cantidad de datos posibles para poder hacer este estudio multitemporal.

La Figura 4-19 muestra los fotones recibidos de la fecha del 23 de febrero de 2023. Se puede apreciar una variación del gradiente de la playa muy similar al de la Figura 4-14.

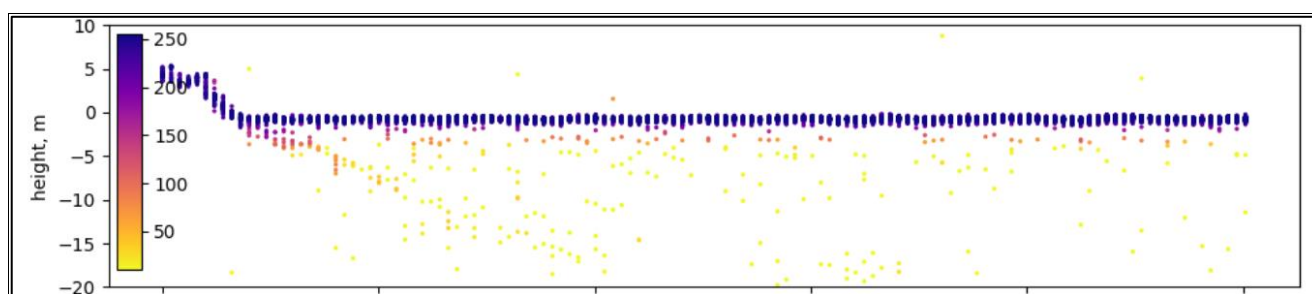


Figura 4-19 Fotonos recibidos en la fecha del 23 de febrero de 2023

En la Figura 4-20 se observa la estimación de la batimetría para esa fecha. Se puede ver que el código no es capaz de crear una línea estimada del suelo marino. Sin embargo, existe una tendencia muy similar a la anterior en los primeros 300 metros.

El problema está en que viendo el histórico del tiempo en Barbate, se puede ver que ese día había una nubosidad alta [39] y por lo tanto no todos los fotones son capaces de penetrar la capa de nube. Aquellos fotones que consiguen llegar, tienen que también atravesar el agua del mar, que seguramente estuviese turbia en esa fecha, lo que impide la obtención de gran cantidad de fotones en el suelo marino.

Por lo tanto, debido a las malas condiciones meteorológicas, los fotones del láser no son capaces de penetrar la superficie del mar a partir de los 300 metros, siendo incapaz así de obtener una estimación del fondo marino.

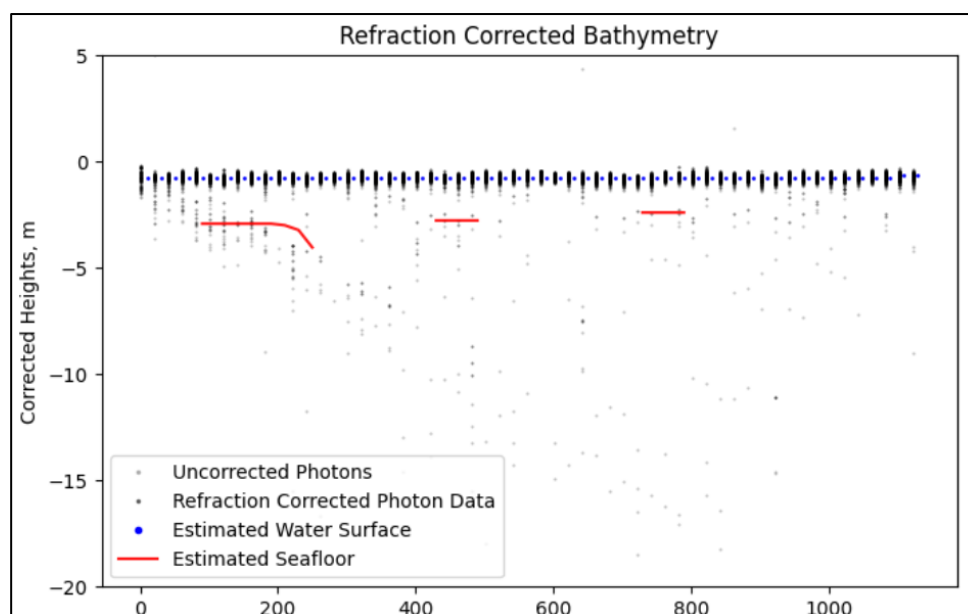


Figura 4-20 Batimetría estimada el 23 de febrero de 2023

A continuación, se va a analizar la batimetría a finales de agosto de 2021. Por la gráfica de la Figura 4-21, que muestran los fotones recibidos, ya se puede observar como en la entrada de playa, los fotones son mucho más fiables que en cualquier otra fecha, pero estos pierden intensidad a medida que se avanza mar adentro.

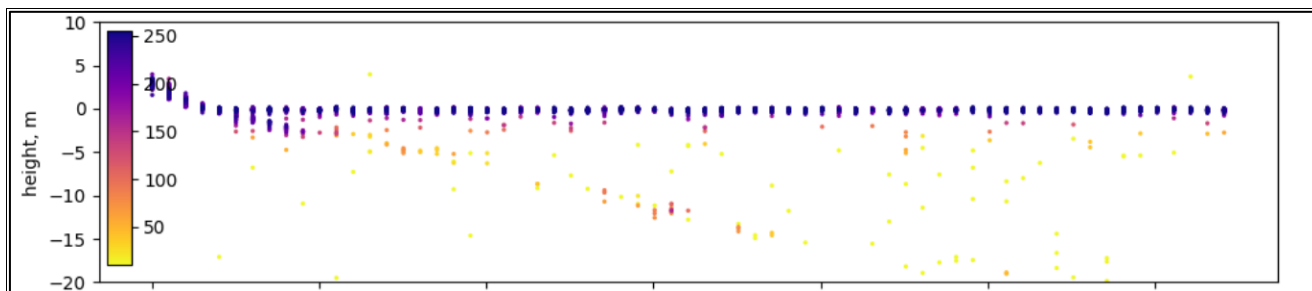


Figura 4-21 Fotones recibidos en la fecha del 27 de agosto de 2021

Tal y como muestra la Figura 4-22, que reafirma lo citado anteriormente, los fotones son mucho más fuertes a principio de la playa, en los primeros 200 metros, y estos van perdiendo intensidad. Pero se puede observar que, a unos 500 metros, la profundidad es de unos 10 metros bajo el nivel del mar. Muy parecido, por no decir igual, que la Figura 4-14. Por lo tanto, tanto en agosto de 2023 como en 2021, no varía demasiado la batimetría, aunque seguramente en agosto de 2021 habría una mayor mar de fondo y por eso el código no es capaz de obtener la batimetría de todo el fondo marino. En cambio, sí que es capaz de obtener una gran cantidad de fotones de gran calidad en los primeros 200 metros de playa.

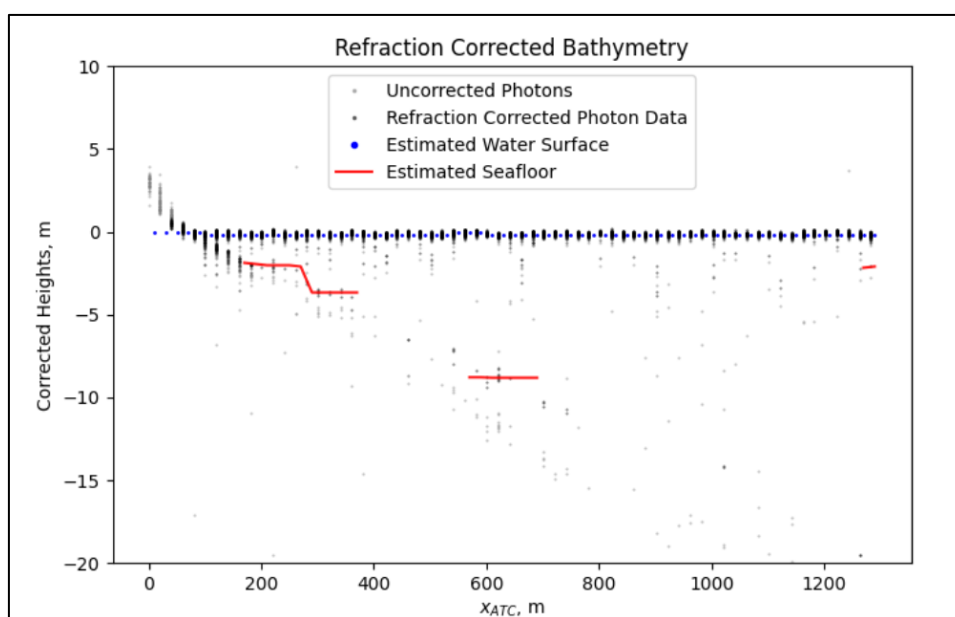


Figura 4-22 Batimetría estimada del 27 de agosto de 2021

Por lo tanto, se va a hacer lo mismo que al final del apartado 4.2.1 Resultados del producto ATL03. Se acotará la zona a 200 metros y a 3 metros de profundidad para que se disponga de un mayor detalle en los gráficos.

Como muestra la Figura 4-23, se puede ver una tendencia de los fotones con mejor calidad, en la cual se puede apreciar como el calado de un metro se produce a aproximadamente 50 metros de la playa.

Así, comparándolo con el primer estudio, parece que es muy similar con una diferencia de 20 metros. Esto puede deberse bien por la marea, que no se han tenido en cuenta, o simplemente por la apreciación que se ha realizado. De todas formas, el usuario puede hacerse una clara idea del gradiente de la playa con estos dos estudios. Es decir, se sabe que no es una playa con muy poco gradiente en la cual las tropas van a tener que desembarcar a más de 100 metros de la playa. Ni, por el contrario,

tampoco se trata de una playa con mucho gradiente donde los soldados vayan a desembarcar sin mojarse.

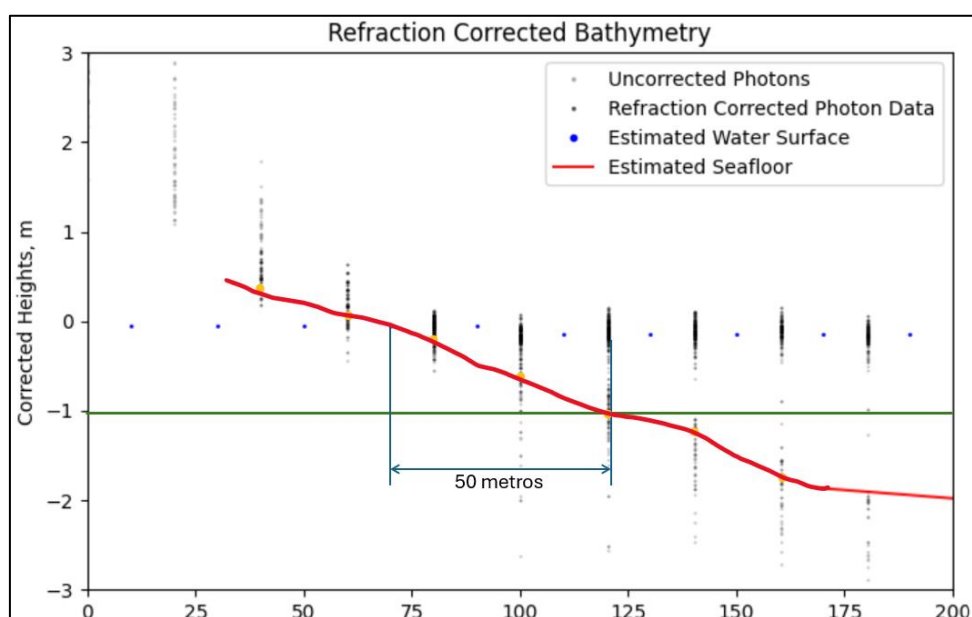


Figura 4-23 Estimación primeros 100 metros de playa en 2021

Por último, en la Figura 4-24, se pueden observar los fotones recibidos de la playa el día 1 de junio de 2019. La tendencia vuelve a ser la misma y por lo tanto podemos considerar que los datos de este satélite constituyen una fuente fiable, ya que en todas las fechas seleccionadas el gradiente de la playa tiende a ser el mismo. Incluso, a pesar de la época del año y de las mareas.

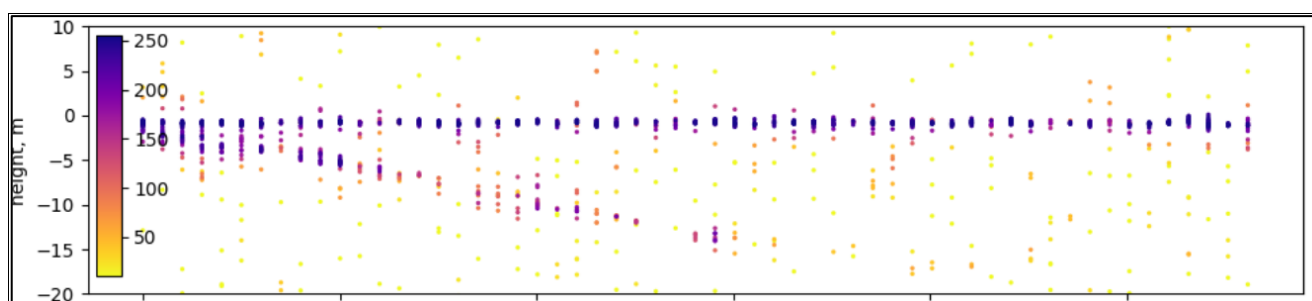


Figura 4-24 Fotones recibidos del 1 de junio de 2019

Además, en la Figura 4-25, se observa la estimación de la batimetría en los primeros 600 metros de costa. Esta estimación es muy similar a la Figura 4-14, con los mismos cambios de gradiente y sin ningún cambio brusco en ningún momento. Con sondas de 10 a 12 metros en los primeros 500 metros de costa. Y a pesar de no obtener toda la batimetría en un kilómetro, se puede ver que entre 2019 y 2023 no hay mucha diferencia y por lo tanto se puede conocer los primeros metros de costa, o por lo menos, tener una idea de ello bastante real.

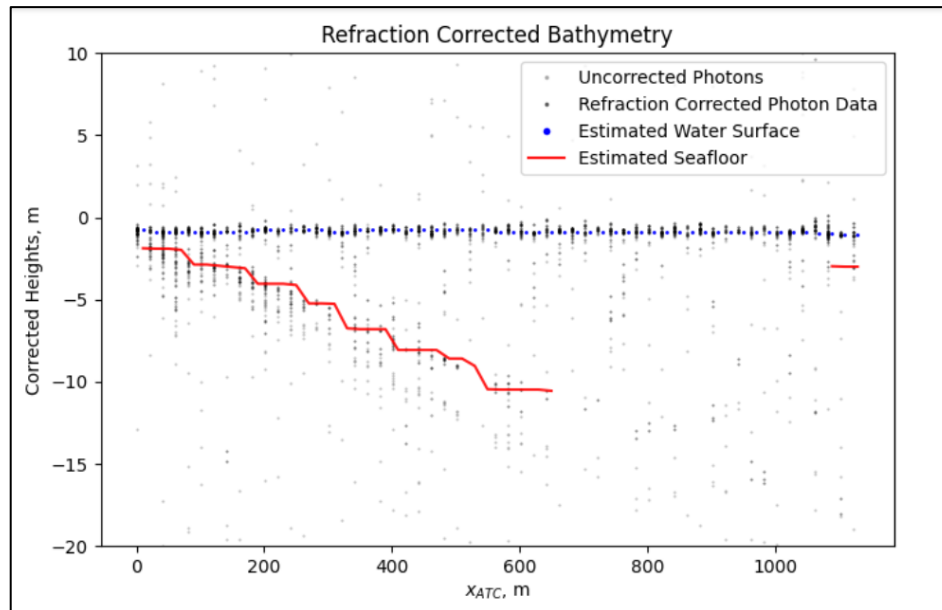


Figura 4-25 Batimetría estimada del 1 de junio de 2019

4.3 Comparación del código (ATL03) con QGIS (ATL13)

Por último, se va a hacer una comparación de uno de los haces del satélite con respecto al código, para ver las diferencias entre ambas zonas. Se utilizará el número de haz 809 del día 13 de mayo de 2023, tal y como muestra la Figura 4-26.

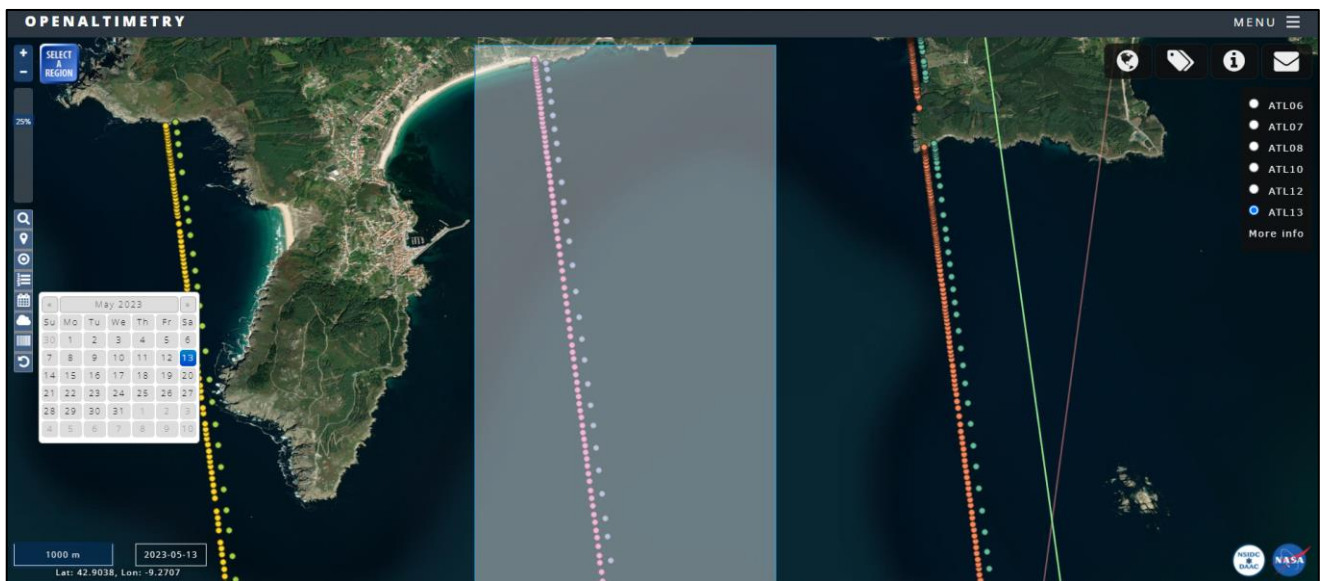


Figura 4-26 Haz para comparar la batimetría

En la Figura 4-27, se puede ver el perfil topográfico de ese haz. Como anteriormente, este haz no proporciona los datos de la profundidad del mar y por lo tanto solo muestra una línea recta que refleja el nivel del mar.

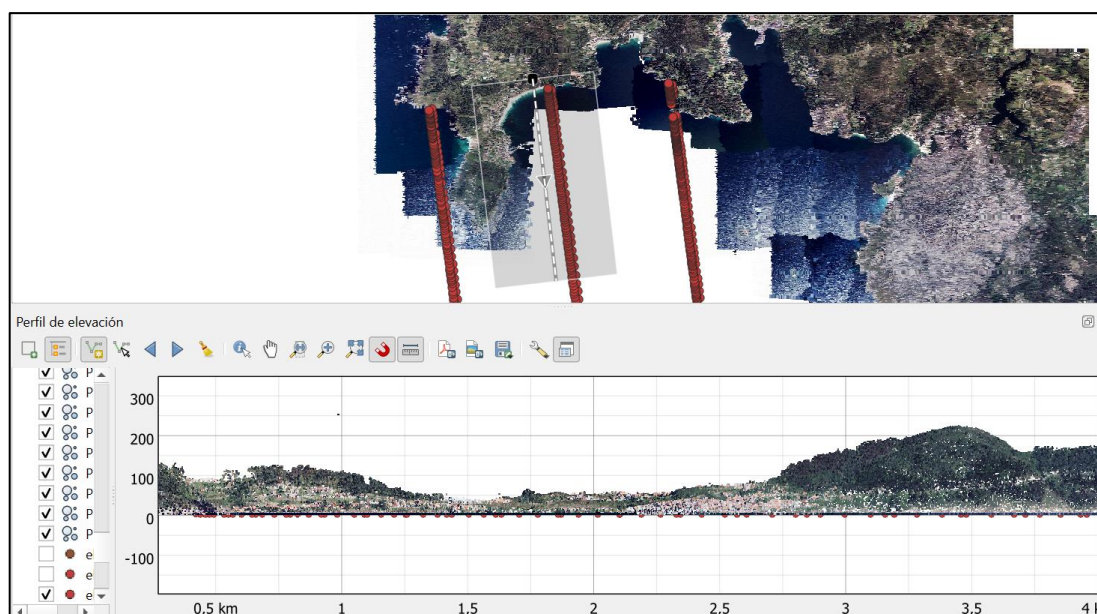


Figura 4-27 Perfil topográfico del haz 809 el 13 de mayo de 2023

Si se compara con la Figura 4-28, se puede ver como efectivamente a través del código se reflejan los fotones que son capaces de penetrar en el suelo marino. Tal y como muestra la carta náutica de la Figura 4-2, en apenas 100 metros hay un desnivel de casi 20 metros. Esto demuestra la hidrografía de las rías de Galicia. Dónde se pueden ver claramente una hidrografía con montañas altas cerca de la costa. Que continúan con la profundidad del mar, mucha profundidad en relativamente pocos metros de costa. Por lo tanto, la línea roja que estima la profundidad del suelo marino seguiría bajando hasta los 150 metros en apenas 5 kilómetros, tal y como demuestra la Figura 4-28.

El problema de este tipo de rías es que es muy impredecible poder conocer con profundidad la batimetría de estas zonas a través del satélite ya que normalmente no suele penetrar hasta los 50 metros de profundidad. Sin embargo, las playas del Retín que tienen un menor gradiente en sus primeros kilómetros, como se ha podido ver anteriormente, son perfectamente compatibles para poder hacer un estudio de su batimetría en la trayectoria que marca el satélite.

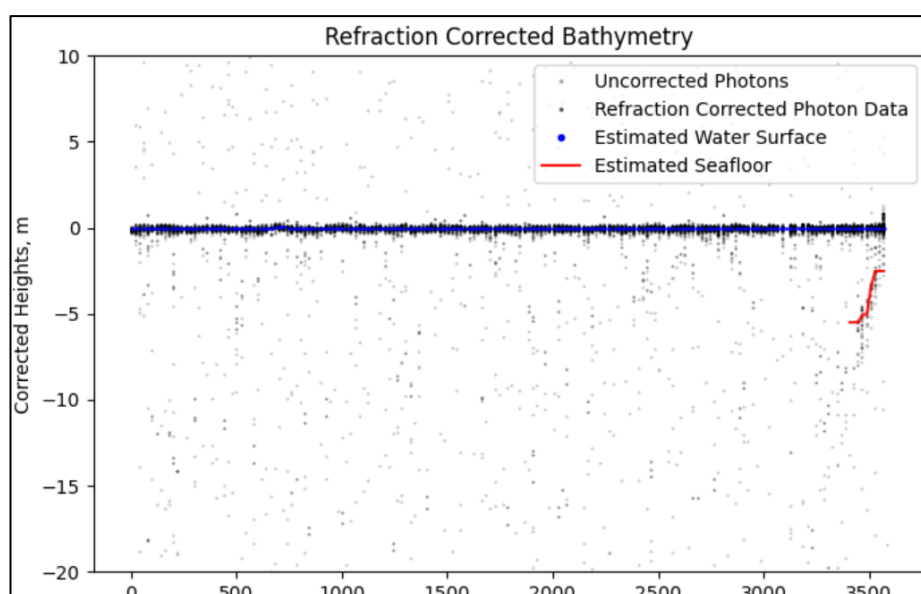


Figura 4-28 Batimetría haz 809 del 13 de mayo de 2023 en la ría de Corcubión

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Una vez realizado el estudio topobatimétrico de la zona de Corcubión y el canal de entrada de la playa del Retín para apoyar al desembarco en las operaciones anfibas, se pueden determinar las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se alcanzan los objetivos iniciales de familiarización con tres productos de datos del satélite ICESat-2 (ATL03, ATL08 y ATL03), accediendo a ellos a través de la herramienta Open Altimetry e interpretando sus distintos campos para poder realizar los análisis topobatimétricos posteriores.
- En segundo lugar, con respecto al estudio topobatimétrico de la Ría de Corcubión, se concluye que el ATL13 no recoge la batimetría de la zona, sino que ofrece datos de la altura del nivel del mar. Por lo tanto, con este tipo de producto no es viable poder hacer un estudio topobatimétrico ya que la información recogida no lo permite. Sin embargo, tiene su utilidad medioambiental ya que se puede conocer la altura de nivel del mar cada 91 días en un mismo lugar, permitiendo así un estudio multitemporal que recoja su variación a lo largo de los años debido al calentamiento global y el derretimiento de los polos.
- A través de los productos ATL08, se puede obtener la topografía del terreno cada 100 metros de manera muy precisa, donde sus alturas están referidas al elipsoide WGS 84. Por lo tanto, queda demostrada la utilización del satélite ICESat-2 para realizar levantamientos topográficos a gran escala en cualquier parte del mundo. En este mismo sentido, se prueba la precisión y resolución que ofrecen los datos satelitales ATL08 con los del PNOA, adquiridos a partir de vuelos fotogramétricos.
- A través del código [37], que utiliza todos los fotones del ATL03, se comprueba su utilidad para la obtención de la batimetría de una canal de entrada en playa, ya que, habiéndola comparado con la carta náutica, coincide con la profundidad del mar. Sin embargo, el satélite no es capaz de distinguir el tipo de suelo que presenta la costa, factor muy importante en la varada de las embarcaciones. Pero sí que permite conocer la orografía de las playas y conocer si existe algún bajo en el canal de estudio.
- Por lo tanto, se propone utilizar esta nueva técnica como apoyo al planeamiento de las operaciones anfibas sin la necesidad de exponer a personal y medios.

Pero teniendo en cuenta que no se puede conocer el tipo de suelo y que el canal de entrada en playa vendrá fijado por la trayectoria recorrida del satélite.

- En cuanto a la calidad de los datos, se comprueba que pueden llegar a ser muy sensibles y que dependerán de las condiciones meteorológicas, tanto de las nubes que puede haber en

el momento por el que pase el satélite, como del oleaje. Además, la turbidez del agua puede ser también un factor clave para que los fotones penetren el agua y permitan obtener la batimetría y funcione el código.

Por lo tanto, la obtención de datos batimétricos mediante el código es susceptible a factores que no dependan del usuario y que dependan de las condiciones medioambientales justo en el momento por el que pase el satélite.

5.2 Líneas futuras

En cuanto a las líneas futuras, se mantiene la primera idea de poder realizar un levantamiento de la batimetría con métodos de altimetría láser en zonas costeras para favorecer al planeamiento anfibio. Sin embargo, la densidad actual proporcionada por el sistema ATLAS del ICESat-2 es un factor limitante para el mapeo topobatimétrico de alta resolución, por lo que se propone el desarrollo de sistemas que sean capaces de combinar datos de distinta índole (satelital, aérea y terrestre), que maximicen las potencialidades de cada tipo de dato.

Existen, además, una gran cantidad de productos de datos derivados del láser ATLAS incorporado al satélite ICESat-2, según se recoge en la Tabla 2-1, y que podrían servir como fuente de datos para próximas investigaciones. Los campos de estudio propuestos son los siguientes:

- La misión principal de ICESat-2 es medir con precisión los cambios en la elevación del hielo en la Tierra, incluyendo los glaciares, las capas de hielo polar y el hielo marino, con el fin de comprender mejor cómo estos cambios están contribuyendo al aumento del nivel del mar y cómo están afectando a los ecosistemas terrestres y marinos. Es por eso por lo que se pueden utilizar otros tipos de productos de datos, que no sean el ATL13 o ATL03 para poder realizar estudios de carácter medioambiental, no ligados a la batimetría.
- Gracias al producto de datos ATL08, que se encarga de medir la vegetación, se puede llegar a conocer y monitorizar los procesos de deforestación y desertización en los distintos países o incluso, por el contrario, la reforestación que se están llevando a cabo en ellos.
- Además, se podría emplear como fuente de información para el estudio del terreno en zonas remotas de cualquier parte del mundo donde no se tenga información topográfica, sin la necesidad de tener que exponer personal ni medios en zonas de conflicto, por ejemplo.
- Por último, habiendo estudiado lo que es la altimetría láser, y en vista de los nuevos conflictos que están surgiendo en el mundo, con los drones como nuevo armamento de tecnología puntera, se podría llegar a desarrollar un dron, en el que se acople un altímetro láser para poder hacer un levantamiento topográfico de la costa. Este se podría emplear en zonas hostiles o potencialmente hostiles donde este dron no fuese interceptado por las defensas antiaéreas enemigas y pudiera llegar a realizar un estudio topobatimétrico que facilite el desembarco anfibio.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «ICESat-2». [En línea]. Disponible en: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov>. [Accedido: 4 de febrero de 2024].
- [2] «Homepage | National Snow and Ice Data Center». [En línea]. Disponible en: <https://nsidc.org/home>. [Accedido: 20 de febrero de 2024].
- [3] «Estrategia de tecnología e innovación para la Defensa ETID - 2020», Castellano. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>. [Accedido: 10 de abril de 2024].
- [4] Publicaciones de la Armada, Infantería de Marina. «D-RIM 331 La compañía y sección de fusiles de infantería de marina». Capítulo 2, "Operaciones Anfibias"
- [5] «Batallón de Cuartel General (BCG) - Infantería de Marina - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquesinfanteria/prefLang-es/01infanteria-marina-tercio-armada-tear--00zBatallonCuartelGeneral>. [Accedido: 12 de marzo de 2024].
- [6] J. G. León Hernández, E. A. Domínguez Calle, y G. Duque Nivia, «Avances más recientes sobre la aplicación de la altimetría radar por satélite en hidrología. Caso de la cuenca amazónica», *Ing. E Investig.*, vol. 28, n.º 3, pp. 126-131, sep. 2008, doi: 10.15446/ing.investig.v28n3.15131.
- [7] «CryoSat-2 startet zu eisiger Mission», n-tv.de. [En línea]. Disponible en: <https://www.n-tv.de/wissen/CryoSat-2-startet-zu-eisiger-Mission-article810844.html>. [Accedido: 4 de abril de 2024].
- [8] «Altimetría | Qué es, definición, historia, tipos, cómo calcular, aplicaciones, equipo». [En línea]. Disponible en: <https://www.euston96.com/altimetria> [Accedido: 23 de enero de 2024].
- [9] «Data Products | ICESat-2». [En línea]. Disponible en: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>. [Accedido: 19 de febrero de 2024].
- [10] «ICESat-2 Product Overviews», National Snow and Ice Data Center. [En línea]. Disponible en: <https://nsidc.org/data/icesat-2/products>. [Accedido: 5 de abril de 2024].
- [11] «Technical Specs | ICESat-2». [En línea]. Disponible en: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/specs>. [Accedido: 13 de marzo de 2024].

- [12] «Qué es la tecnología LiDAR y cómo puedo utilizarla - Digital Trends Español». [En línea]. Disponible en: <https://es.digitaltrends.com/inteligente/que-es-la-tecnologia-lidar>. [Accedido: 23 de enero de 2024].
- [13] «UAV LiDAR systems for Drone 3D laser mapping | YellowScan». [En línea]. Disponible en: <https://www.yellowscan.com>. [Accedido: 3 de abril de 2024].
- [14] «Lidar Aerotransportado». [En línea]. Disponible en: <https://www.topcadingenieria.com/index.php/servicios/lidar-aerotransportado>. [Accedido: 23 de enero de 2024].
- [15] «¿Qué es LiDAR? | IBM». [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/lidar>. [Accedido: 23 de enero de 2024].
- [16] «Introducción a la tecnología LiDAR | Forestry QGIS», Introducción a la tecnología LiDAR | Forestry QGIS. [En línea]. Disponible en: <https://forestryqgis.blogspot.com/2018/02/introduccion-la-tecnologia-lidar.html>. [Accedido: 4 de abril de 2024].
- [17] «32282D9A5D9D4B5CA84FC76F95DD0FD3.pdf». [En línea]. Disponible en: <https://www.uclm.es/misiones/culturadeporte/extensionuniversitaria/programajosesarago/-/media/32282D9A5D9D4B5CA84FC76F95DD0FD3.ashx>. [Accedido: 4 de abril de 2024].
- [18] «Batimetría - Definición Según Autores, Que Significa, Con Ejemplos. Actualizado 2024». [En línea]. Disponible en: <https://conceptualista.com/batimetria>. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [19] «IECA / Junta de Andalucía » Andalucía, la imagen cartográfica: Carta Pisana». [En línea]. Disponible en: <https://ws089.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/blog/2017/06/carta-pisana>. [Accedido: 4 de abril de 2024].
- [20] «Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf». [En línea]. Disponible en: https://moodle.upm.es/ocw/pluginfile.php/726/mod_label/intro/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [21] M. A. Perea-Ardila y F. Oviedo-Barrero, «Batimetría derivada por satélite (sdb): una aproximación a la cartografía batimétrica con imágenes multispectrales en aguas poco profundas de Bahía Solano, Colombia», *Rev. Cienc. Mar. Costeras*, vol. 12, n.º 1, pp. 107-124, 2020.
- [22] «¿Qué es una batimetría? Conoce los 3 tipos de mediciones». [En línea]. Disponible en: <https://www.arquitecturapura.com/construccion/topografia/batimetria-15792>. [Accedido: 4 de febrero de 2024].
- [23] M. Campillos, «¿Qué es una batimetría y cuáles son sus aplicaciones?», Comunidad ISM. [En línea]. Disponible en: <https://www.comunidadism.es/que-es-una-batimetria-y-cuales-son-sus-aplicaciones>. [Accedido: 4 de febrero de 2024].
- [24] «LIDAR Batimetría – Hidrografía y estudio del las características físicas y morfológicas del agua – Tecnoceano Ingeniería y Estudios Marinos». [En línea]. Disponible en: <https://tecnoceano.com/en/lidar-batimetria>. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [25] «Irish Project Features Hawk Eye II Bathymetric Lidar». [En línea]. Disponible en: <https://www.hydro-international.com/content/article/airborne-seabed-mapping>. [Accedido: 4 de abril de 2024].
- [26] «Sensores LiDAR batimétricos y UAV: ¿qué hay detrás de estas tecnologías?», ACI Corporation Esp. [En línea]. Disponible en: <https://acicorporation.com/espanol/sensores->

- lidar-batimetricos-y-uav-que-hay-detras-de-estas-tecnologias. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [27] «Inicio - IHM - Instituto Hidrográfico de la Marina - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Disponible en: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/cienciahm1/prefLang-es>. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [28] Jasinski, M., J. Stoll, D. Hancock, J. Robbins, J. Nattala, J. Morison, B. Jones, M. Ondrusek, T. Pavelsky, C. Parrish, and C. Carabajal (2023). ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Along Track Inland Surface Water Data, ATL13, Version 6. ICESat-2 Project, DOI: 10.5067/03JYGGZ0758UL.
- [29] Neuenschwander, A., K. Pitts, B. Jelley, J. Robbins, J. Markel, S. Popescu, R. Nelson, D. Harding, D. Pederson, B. Klotz, and R. Sheridan (2022). Ice, Cloud, and Land 25 Elevation Satellite (ICESat-2) Project Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for 26 Land - Vegetation Along-Track Products (ATL08), Version 6. ICESat-2 Project, DOI: 10.5067/8ANPSL1NN7YS.
- [30] J. Velasco, I. Molina, E. Martinez, A. Arquero, y J. F. Prieto, «Sea Bottom Classification by Means of Bathymetric LIDAR Data», *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 12, n.º 4, pp. 590-595, jun. 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.6868859.
- [31] Neumann, T. A., A. Brenner, D. Hancock, J. Robbins, A. Gibbons, J. Lee, K. Harbeck, J. Saba, S. Luthcke, and T. Rebold (2022). Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2) Project Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Global Geolocated Photons ATL03, Version 6. ICESat-2 Project, DOI: 10.5067/GA5KCLJT7LOT.
- [32] «Bienvenido al proyecto QGIS!». [En línea]. Disponible en: <https://qgis.org/es/site>. [Accedido: 3 de abril de 2024].
- [33] «Google Colaboratory». [En línea]. Disponible en: <https://colab.research.google.com>. [Accedido: 3 de abril de 2024].
- [34] «OpenAltimetry». [En línea]. Disponible en: <https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/index.html>. [Accedido: 20 de febrero de 2024].
- [35] S. J. S. Khalsa *et al.*, «OpenAltimetry - rapid analysis and visualization of Spaceborne altimeter data», *Earth Sci. Inform.*, vol. 15, n.º 3, pp. 1471-1480, sep. 2022, doi: 10.1007/s12145-020-00520-2.
- [36] O. A. C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN)», Centro de Descargas del CNIG. [En línea]. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es>. [Accedido: 18 de marzo de 2024].
- [37] «Shallow Water Bathymetry With ICESat-2 — ICESat-2 Hackweek 2023». [En línea]. Disponible en: https://icesat-2-2023.hackweek.io/tutorials/bathymetry/bathymetry_tutorial.html. [Accedido: 22 de marzo de 2024].
- [38] «Visualizador de la IdeIHM - Instituto Hidrográfico de la Marina». [En línea]. Disponible en: <https://ideihm.covam.es/visualizador/inicio>. [Accedido: 25 de marzo de 2024].
- [39] «Archivo meteorológico Barbate - meteoblue». [En línea]. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/weatherarchive/barbate_espa%C3%B1a_2521335?fcstlength=1m&year=2023&month=2. [Accedido: 24 de marzo de 2024].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

La introducción del satélite ICESat-2 como medio de obtención de datos de la batimetría aporta numerosos beneficios dentro del planeamiento de las operaciones anfibia. En el apartado **1.1 Introducción**, se comenta la necesidad de emplear este tipo de métodos de obtención ya que supone una mejora en la seguridad al no tener que exponer al personal en una zona de costa potencialmente hostil y desconocida.

Además, el hecho de no tener que exponer medios para el uso de levantamientos topobatimétricos de playas desconocidas, implica un gasto nulo en combustible y emisiones de carbono en la atmósfera. Por lo tanto, el empleo de este satélite como medio de obtención del gradiente de la playa supone un avance constructivo tanto a nivel económico como a nivel medioambiental al ser el acceso a los datos totalmente gratuito para cualquier usuario.

A pesar de que este Trabajo de Fin de Grado no está orientado al estudio del cambio climático, cabe destacar que la misión original de este satélite es la de medir con precisión la altura cambiante de las masas de hielo de la Tierra, fuertemente afectadas por el calentamiento global al que está sometido nuestro planeta. Para terminar, se recogen en este Anexo I los distintos aspectos de concienciación social y medioambiental del ICESat-2, y que ya fueron comentados brevemente en el apartado 2.1.2 Satélite ICESat-2:

- Estudio de los glaciares y casquetes polares: El satélite puede medir con precisión el grosor de los glaciares y casquetes polares, lo que permite a los científicos monitorear los cambios en estas masas de hielo y prever su impacto en el nivel del mar y el suministro de agua dulce.
- Monitorización de la vegetación: ICESat-2 puede medir la altura de la vegetación en diferentes regiones del mundo, lo que ayuda a los científicos a monitorear la salud de los ecosistemas terrestres, al mapeo de la biomasa forestal y a comprender cómo están respondiendo al cambio climático y otros factores ambientales.
- Estudio de la topografía terrestre: El satélite también proporciona mediciones precisas de la altura de la superficie terrestre, lo que es útil para una variedad de aplicaciones, como la gestión de recursos naturales, la planificación urbana y la evaluación de riesgos naturales como inundaciones y deslizamientos de tierra.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La idea de obtener datos del satélite ICESat-2 para realizar un estudio de la batimetría y facilitar el planeamiento de operaciones anfibia presenta varias reflexiones sociales y éticas importantes como:

- En primer lugar, aunque los datos del ICESat-2 son de acceso público, algunos países pueden tener restricciones o regulaciones internas sobre cómo se pueden utilizar esos datos, especialmente en lo que respecta a aplicaciones militares o estratégicas. Además, pueden existir acuerdos internacionales sobre el intercambio y el uso de datos espaciales que podrían afectar el acceso a los datos del ICESat-2 en ciertos contextos. Por lo tanto, se debe garantizar un acceso equitativo a los datos del satélite ICESat-2 mediante políticas de acceso abierto y colaborativo, donde los datos estén disponibles para investigadores de todo el mundo a través de plataformas y repositorios públicos.
- Además, es importante promover la capacitación y el desarrollo de capacidades en países y comunidades con menos recursos para asegurar que puedan utilizar y beneficiarse de estos datos.
- Se deben seguir principios éticos sólidos en todas las etapas del proceso de investigación, incluida la recopilación, análisis e interpretación de datos. Esto implica la adhesión a estándares de integridad académica, la divulgación transparente de métodos y resultados, y la consideración de posibles sesgos en el diseño y ejecución del estudio.
- Para ello, se deben implementar medidas de seguridad robustas para proteger los datos recopilados del satélite ICESat-2 contra accesos no autorizados y un uso indebido. Esto podría incluir el cifrado de datos, la gestión de accesos basada en roles y el cumplimiento de regulaciones de protección de datos a nivel nacional e internacional. Es por ello por lo que todo usuario que lleve a cabo una descarga de datos se habrá tenido que registrar en *EarthData*.
- Por último, se debe promover un enfoque ético y responsable en el uso de la tecnología satelital, que incluya la consideración de posibles impactos sociales, ambientales y éticos en la toma de decisiones. Esto podría implicar la realización de evaluaciones de riesgos y beneficios antes de la implementación de proyectos, así como el monitoreo continuo de su impacto a lo largo del tiempo.

ANEXO III: CÓDIGO PARA LA OBTENCIÓN DE LA BATIMETRÍA

BLOQUE 1

```
import os
import scipy
import skimage
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import geopandas as gpd
from tqdm import tqdm
import shapely
from mpl_toolkits.axes_grid1.inset_locator import inset_axes
```

```
from sliderule import sliderule, icesat2, earthdata
```

```
import ipyleaflet
from datetime import datetime, timedelta
from shapely import Polygon
```

BLOQUE 2

```
url = "slideruleearth.io"
icesat2.init(url, verbose=False)
asset = "icesat2"
```

BLOQUE 3

modify the following lines for custom tracks identified from Open Altimetry

```
target_date = '2023-05-13' # 'YYYY-MM-DD'
target_rgt = 809 # track ID
```

BLOQUE 4

set aoi_name to user defined if date/rgt specified using OpenAltimetry

aoi_name = 'user_defined' # options: user_defined, new_zealand, japan, north_carolina, eritrea, bahamas

```
aoi_data = {
    'user_defined': {
        'target_date': target_date,
        'target_rgt': target_rgt,
        'bbox_coords': [],
```

```
},
'new_zealand': {
  'target_date': '2022-07-05',
  'target_rgt': 214,
  'bbox_coords': [[[172.66, -40.63],
                    [172.66, -40.47],
                    [173.14, -40.47],
                    [173.14, -40.63],
                    [172.66, -40.63]]],
},
'japan': {
  'target_date': '2021-10-30',
  'target_rgt': 582,
  'bbox_coords': [[[127.67, 26.16],
                    [127.67, 26.77],
                    [128.24, 26.77],
                    [128.24, 26.16],
                    [127.67, 26.16]]],
},
'north_carolina': {
  'target_date': '2022-06-26',
  'target_rgt': 65,
  'bbox_coords': [[[-75.87, 34.82],
                    [-75.87, 36.17],
                    [-75.19, 36.17],
                    [-75.19, 34.82],
                    [-75.87, 34.82]]],
},
'eritrea': {
  'target_date': '2022-09-19',
  'target_rgt': 1363,
  'bbox_coords': [[[39.90, 15.47],
                    [39.90, 16.10],
                    [40.53, 16.10],
                    [40.53, 15.47],
                    [39.90, 15.47]]],
},
'bahamas': {
  'target_date': '2021-07-09',
  'target_rgt': 248,
  'bbox_coords': [[[-76.8, 23.27],
                    [-76.8, 23.84],
                    [-76.22, 23.84],
                    [-76.22, 23.27],
                    [-76.8, 23.27]]],
}
}
```

try:

```
aoi_info = aoi_data[aoi_name]
target_date = aoi_info['target_date']
```

```
target_rgt = aoi_info['target_rgt']
bbox_coords = aoi_info['bbox_coords']
```

```
except KeyError:
    raise RuntimeError("Invalid AOI name")
```

BLOQUE 5

function to store any bounds drawn by the user

```
def handle_draw(target, action, geo_json):
    if action == 'created':
        coords = geo_json['geometry']['coordinates'][0]
        bbox_coords.append(coords)
```

```
def reverse_coordinates(bbox_coords):
    reversed_coords = []
```

```
    for box in bbox_coords:
        reversed_box = []
        for point in box:
            reversed_box.append([point[1], point[0]])
        reversed_coords.append(reversed_box)
```

```
    return reversed_coords
```

setting up the map

```
m = ipyleaflet.Map(basemap=ipyleaflet.basemaps.Esri.WorldImagery,
    center=(0, 0),
    zoom=3,
    scroll_wheel_zoom=True)
```

simplifying user options - can be used to enable polygons, line drawings, etc

```
dc = ipyleaflet.DrawControl(circlemarker={}, polyline={})
```

defining bounding box/polygon properties

```
custom_shape_options = {
    "fillColor": "red",
    "color": "red",
    "fillOpacity": 0.5
}
```

```
dc.rectangle = {"shapeOptions": custom_shape_options}
dc.polygon = {"shapeOptions": custom_shape_options}
```

add pre-existing bounding box to map if it exists

```
if aoi_name == 'user_defined':
    bbox_coords = []
    print("Draw bounding box on map below...")
```

```
else:
```

```
poly_gdf = gpd.GeoDataFrame(geometry=[Polygon(bbox_coords[0])],
                                crs="EPSG:4326")

m.center=(poly_gdf.geometry[0].centroid.y, poly_gdf.geometry[0].centroid.x)
m.zoom = 8

poly_map = ipyleaflet.Polygon(
    locations=reverse_coordinates(bbox_coords),
    color="red",
    fill_color="red"
)

m.add_layer(poly_map);

dc.on_draw(handle_draw)
m.add_control(dc)

m

Draw bounding box on map below...

{"model_id":"2febb692e944402d8fcab6063d487ea7","version_major":2,"version_minor":0}
```

BLOQUE 6

```
# Print the extracted information
print('AOI Name:', aoi_name.upper())
print("Target Date:", target_date)
print("Target RGT:", target_rgt)
print("Bounding Box Coordinates:\n", np.round(bbox_coords, 2))
```

BLOQUE 7

```
# use the middle, strong beam for this demo
# for more on this, see the ATL03 user guide, or other hackweek documentation
beam_type = 'strong'
track_num = 2
```

BLOQUE 8

```
%%time

# Reformatting bounding box for query purposes
coords_arr = np.array(bbox_coords[0]) # use only the first polygon you draw
poly = []

for point in coords_arr:
    poly.append({
        'lat': point[1],
```

```

    'lon': point[0]
})

# sliderule parameters for querying photon data
parms = {

    "len": 20,
    "pass_invalid": True, # include segments which dont pass all checks
    "cnf": -2, # returns all photons

    # try other signal confidence scores! SRT_LAND, SRT_OCEAN, SRT_SEA_ICE, SRT_LAND_ICE,
    SRT_INLAND_WATER
    "srt": icesat2.SRT_LAND,

    # density based signal finding
    "yapc": dict(knn=0, win_h=6, win_x=11, min_ph=4, score=0),

    # extra fields from ATL03 gttx/geolocation or gttx/geophys_corr channels
    "atl03_geo_fields": ["ref_azimuth", "ref_elev", "geoid"],

    # extra fields via ATL03 "gttx/heights" (see atl03 data dictionary)
    "atl03_ph_fields": [], #

    # add query polygon
    "poly": poly,

}

# Formatting datetime query for demo purposes - 1 day buffer
day_window = 1 # days on either side to query
target_dt = datetime.strptime(target_date, '%Y-%m-%d')
time_start = target_dt - timedelta(days=day_window)
time_end = target_dt + timedelta(days=day_window)

# find granule for each region of interest
granules_list = earthdata.cmr(short_name='ATL03',
                              polygon=poly,
                              time_start=time_start.strftime('%Y-%m-%d'),
                              time_end=time_end.strftime('%Y-%m-%d'),
                              version='006')

print(granules_list)

# create an empty geodataframe
df_0 = icesat2.atl03sp(parms, resources=granules_list)

```

BLOQUE 9

```

# confirm that we got extra fields from ATL03 for each photon
print(f'Available photon-rate features: \n{df_0.columns.values}\n')

```

```
# inspect photon dataframe
df_0.head()
```

BLOQUE 10

```
# reducing the total photon data down to a single beam for demonstration purposes
# from the Grand Mesa SlideRule Example
```

```
def reduce_dataframe(gdf, RGT=None, GT=None, track=None, pair=None, cycle=None, beam="",
crs=4326):
    # convert coordinate reference system
    df = gdf.to_crs(crs)

    # reduce to reference ground track
    if RGT is not None:
        df = df[df["rgt"] == RGT]

    # reduce to ground track (gt[123][lr]), track ([123]), or pair (l=0, r=1)
    gtlookup = {icesat2.GT1L: 1, icesat2.GT1R: 1, icesat2.GT2L: 2, icesat2.GT2R: 2, icesat2.GT3L: 3,
icesat2.GT3R: 3}

    pairlookup = {icesat2.GT1L: 0, icesat2.GT1R: 1, icesat2.GT2L: 0, icesat2.GT2R: 1, icesat2.GT3L:
0, icesat2.GT3R: 1}

    if GT is not None:
        df = df[(df["track"] == gtlookup[GT]) & (df["pair"] == pairlookup[GT])]
    if track is not None:
        df = df[df["track"] == track]
    if pair is not None:
        df = df[df["pair"] == pair]

    # reduce to weak or strong beams
    # tested on cycle 11, where the strong beam in the pair matches the spacecraft orientation.
    # Need to check on other cycles
    if (beam == 'strong'):
        df = df[df['sc_orient'] == df['pair']]
    elif (beam == 'weak'):
        df = df[df['sc_orient'] != df['pair']]

    # reduce to cycle
    if cycle is not None:
        df = df[df["cycle"] == cycle]

    # otherwise, return both beams
    return df

df = reduce_dataframe(df_0,
                      RGT=target_rgt,
                      track=track_num,
```

```

        beam=beam_type,
        crs='EPSG:4326')

# add a column for along-track distance
df['along_track_meters'] = df['segment_dist']-np.min(df['segment_dist'])

# compute orthometric heights using the onboard geoid model (EGM08)
df['height_ortho'] = df['height'] - df['geoid']

```

BLOQUE 11

```

# get location of every 100th photon (to reduce data load)
ph_lon = df.geometry.x.values[::100]
ph_lat = df.geometry.y.values[::100]
ph_loc_list = [[y, x] for x, y in zip(ph_lon, ph_lat)]

ground_track = ipyleaflet.Polyline(locations=ph_loc_list,
                                    color='limegreen', weight=5)

m.add_layer(ground_track)

# see map above has been updated with the satellite ground track!

```

BLOQUE 12

```

# elevation range for plotting
ylim = [-100, 10]

# filter very shallow / deep data to refine bathymetry
min_bathy_depth = 0
max_bathy_depth = 30

```

BLOQUE 13

```

# Create figure and axes
fig, axs = plt.subplots(nrows=3, ncols=1, figsize=(10, 8), sharex=True)

#####
# ATL03 signal confidence plot
colors = {-1:['yellow', 'not_considered'],
          0:['grey', 'noise'],
          1:['red', 'buffer'],
          2:['green', 'low_conf'],
          3:['blue', 'med_conf'],
          4:['black', 'high_conf']}

for class_val, color_name in colors.items():
    ii = df['atl03_cnf']==class_val

```

```
    axs[0].plot(df['along_track_meters'][ii], df['height_ortho'][ii],
               'o', markersize=1, alpha=0.3, color=color_name[0],
               label=color_name[1])

axs[0].legend(loc=3, frameon=True, markerscale=5)
axs[0].set_xlabel('x_ATC, m')
axs[0].set_ylabel('height, m')
axs[0].set_title('ATL03 classification')

#####
# YAPC density based confidence plot
ii = np.argsort(df['yapc_score'])
sc = axs[1].scatter(df['along_track_meters'][ii], df['height_ortho'][ii],
                   2, c=df['yapc_score'][ii], vmin=10, vmax=255, cmap='plasma_r')
axs[1].set_ylim(ylim)
axs[1].set_ylabel('height, m')
axs[1].set_title('YAPC score')

# Add inset axes for colorbar
cax = inset_axes(axs[1], width="2%", height="90%", loc=2)

# Add colorbar to inset axes
cbar = fig.colorbar(sc, cax=cax, orientation='vertical')

#####
# Quality Photon Flag
colors = {0:['black', 'nominal'],
          1:['red', 'possible_afterpulse'],
          2:['green', 'possible_impulse_response_effect']}

for class_val, color_name in colors.items():
    ii = df['quality_ph']==class_val
    if class_val==0:
        axs[2].plot(df['along_track_meters'][ii], df['height_ortho'][ii],
                   'o', markersize=.5, alpha=0.3, color=color_name[0],
                   label=color_name[1])
    else:
        axs[2].plot(df['along_track_meters'][ii], df['height_ortho'][ii],
                   'o', markersize=1, alpha=1, color=color_name[0],
                   label=color_name[1])

axs[2].legend(loc=3, frameon=True, markerscale=5)
axs[2].set_ylabel('height, m')
axs[2].set_title('Photon classification')

for ax in axs:
    ax.set_ylim(ylim)

plt.tight_layout()
```

BLOQUE 14

```
# yapc_threshold = skimage.filters.threshold_otsu(df['yapc_score'])
# plt.hist(df['yapc_score'])
# plt.axvline(yapc_threshold)
```

```
yapc_threshold = 25
```

BLOQUE 15

```
# get photons with a minimum YAPC signal score
signal_photons_yapc = df['yapc_score'] > yapc_threshold
```

BLOQUE 16

```
# manually specify a water surface elevation and remove any land photons higher than that
# trim_photons_above = 5 # meters, orthometric height

# alternatively, if your track is mostly water, you can estimate the water surface as the most common
# photon elevation value
bin_edges_1 = np.arange(-50, 50, 0.1)
hist_1 = plt.hist(df['height_ortho'][signal_photons_yapc], bins=bin_edges_1)[0]

trim_photons_above = bin_edges_1[np.argmax(hist_1)] + 1 # buffer in meters for surface width /
# waves

plt.axvline(trim_photons_above, color='k')
plt.xlabel('Orthometric height (m)')
plt.ylabel('Count')
plt.yscale('log')
```

BLOQUE 17

```
# get dataframe of signal only
water_zone_photons = df['height_ortho'] < trim_photons_above
df_cleaned = df.loc[water_zone_photons & signal_photons_yapc]
```

BLOQUE 18

```
res_z = 0.1 # height resolution
res_at = 20 # along track resolution
```

BLOQUE 19

```
# define along track bin sizing

bin_edges_z = np.arange(ylim[0], ylim[1], res_z)
```

```
range_at = [0, #df_cleaned.along_track_meters.min(),
            df_cleaned.along_track_meters.max() + res_at]

bin_edges_at = np.arange(range_at[0], range_at[1], res_at)

bin_centers_z = bin_edges_z[:-1] + np.diff(bin_edges_z)[0] / 2

bin_centers_at = bin_edges_at[:-1] + np.diff(bin_edges_at)[0] / 2

hist_2 = np.histogram2d(df_cleaned.along_track_meters, df_cleaned.height_ortho,
                        bins = [bin_edges_at, bin_edges_z])[0]

hist_2 = hist_2.T # more intuitive orientation

# using a gaussian filter allows us to use finer binning resolution
sigma_at = 50 / res_at
hist_2 = scipy.ndimage.gaussian_filter1d(hist_2, sigma_at, axis=1)

sigma_z = .2 / res_z
hist_2 = scipy.ndimage.gaussian_filter1d(hist_2, sigma_z, axis=0)
```

BLOQUE 20

```
f, ax = plt.subplots(2, 1, figsize=(8, 5), sharex=True)

# plot the photon data
ax[0].plot(df['along_track_meters'],
           df['height_ortho'], '.', c='grey', markersize=1, alpha=0.5, label='All Photons')
ax[0].plot(df_cleaned['along_track_meters'],
           df_cleaned['height_ortho'], 'r.', markersize=1, alpha=0.5, label='Signal Photons')
ax[0].set_ylim(ylim)
ax[0].set_ylabel('height, m')
ax[0].set_xlabel('$x_{ATC}$, m');
ax[0].set_title('Estimate of Water Signal')
ax[0].legend(markerscale=5)

# plot the histogrammed data
orig = ax[1].imshow(hist_2, norm='log',
                    vmin=1e-2, vmax=10, # colormap bounds
                    cmap='viridis',
                    origin='lower',
                    interpolation_stage = 'rgba',
                    extent=[bin_edges_at[0], bin_edges_at[-1],
                            bin_edges_z[0], bin_edges_z[-1]],
                    aspect='auto')

ax[1].set_ylabel('height, m')
# f.colorbar(orig, ax=ax[1], label='Count')
ax[1].set_title('Binned Photon Data');
```

```
plt.tight_layout()
```

BLOQUE 21

```
n_inspection_points = 6 # automatically choose equally spaced locations to inspect

inspect_along_track_locations = np.linspace(bin_centers_at[0], bin_centers_at[-1],
                                             n_inspection_points + 2, # adjust for edges
                                             dtype=np.int64)[1:-1]

# round
# inspect_along_track_locations = np.round(inspect_along_track_locations, -3)

inspect_along_track_locations = [0, 100] # manually choose locations to inspect

kernel_size_meters = .5

### plotting

kernel_size = np.int64(kernel_size_meters / res_z)

fig, axes = plt.subplots(nrows=1, ncols=len(inspect_along_track_locations), figsize=(8,5),
sharey=True)

if len(inspect_along_track_locations) == 1:
    axes = [axes]

for i, ax in enumerate(axes):
    along_track_location_i = inspect_along_track_locations[i]

    waveform = hist_2[:, np.int64(along_track_location_i/res_at)]

    waveform_smoothed = np.convolve(waveform, np.ones(kernel_size)/kernel_size, mode='same')

    ax.plot(waveform, bin_centers_z, c='grey', alpha=.5, label='Binned Photon Data')

    ax.plot(waveform_smoothed, bin_centers_z, c='r', label='Smoothed Waveform')

    ax.set_title(f'{np.int64(along_track_location_i)}m')

# ax.set_xscale('log')

fig.supylabel('Elevation (m)')
fig.supxlabel('Photon Count')
```

```
fig.suptitle('Sample Waveforms From Along-track Locations')
plt.tight_layout()
```

BLOQUE 22

```
def extract_bathymetry(waveform, min_height=.25, min_prominence=.25):
```

```
    """
```

Extracts bathymetry information from a histogram of photon heights and simple assumptions of topographic features.

Parameters:

waveform (1D array-like): Input histogram of photon heights.

min_height (float, optional): Minimum height of peaks to be considered for bathymetry or water surface.

Defaults to 0.25.

min_prominence (float, optional): Minimum prominence of peaks to be considered for bathymetry or water surface.

Defaults to 0.25.

Returns:

water_surface_peak (int or None): Index of the peak representing the water surface, or None if no valid peaks are found.

bathy_peak (int or None): Index of the peak representing the subsurface bathymetry, or None if no valid peaks are found.

Notes:

Input data should be preprocessed to remove as much background noise, land, or vegetation returns as possible.

Author: Jonathan Markel, UT Austin

Date: 08/2023

```
    """
```

```
    peaks, peak_info_dict = scipy.signal.find_peaks(waveform,
                                                    height=min_height,
                                                    prominence=min_prominence)
```

```
if len(peaks) == 0:
```

```
    return None, None
```

```
# topmost return is the water surface
```

```
    water_surface_peak = peaks[-1]
```

```
# all other peaks are possible bathymetry
```

```
    bathy_candidate_peaks = peaks[:-1]
```

```
    bathy_candidate_peak_heights = peak_info_dict['peak_heights'][:-1]
```

```
    bathy_candidate_peak_prominences = peak_info_dict['prominences'][:-1]
```

```
if len(bathy_candidate_peaks) == 0:
```

```
return water_surface_peak, None
```

```
# get the most prominent subsurface peak
```

```
bathy_peak = bathy_candidate_peaks[np.argmax(bathy_candidate_peak_prominences)]
```

```
return water_surface_peak, bathy_peak
```

```
surface_idx, bathy_idx = extract_bathymetry(waveform_smoothed)
```

BLOQUE 23

```
def photon_refraction(W, Z, ref_az, ref_el,  
                    n1=1.00029, n2=1.34116):
```

```
'''
```

```
ICESat-2 refraction correction implemented as outlined in Parrish, et al.  
2019 for correcting photon depth data.
```

```
Highly recommended to reference elevations to geoid datum to remove sea  
surface variations.
```

```
https://www.mdpi.com/2072-4292/11/14/1634
```

```
Author:
```

```
Jonathan Markel
```

```
Graduate Research Assistant
```

```
3D Geospatial Laboratory
```

```
The University of Texas at Austin
```

```
jonathanmarkel@gmail.com
```

```
Parameters
```

```
-----
```

```
W : float, or nx1 array of float
```

```
Elevation of the water surface.
```

```
Z : nx1 array of float
```

```
Elevation of seabed photon data. Highly recommend use of geoid heights.
```

```
ref_az : nx1 array of float
```

```
Photon-rate reference photon azimuth data. Should be pulled from ATL03  
data parameter 'ref_azimuth'. Must be same size as seabed Z array.
```

```
ref_el : nx1 array of float
```

```
Photon-rate reference photon azimuth data. Should be pulled from ATL03  
data parameter 'ref_elev'. Must be same size as seabed Z array.
```

```
n1 : float, optional
```

```
Refractive index of air. The default is 1.00029.
```

```
n2 : float, optional
```

Refractive index of water. Recommended to use 1.34116 for saltwater and 1.33469 for freshwater. The default is 1.34116.

Returns

*dE : nx1 array of float
Easting offset of seabed photons.*

*dN : nx1 array of float
Northing offset of seabed photons.*

*dZ : nx1 array of float
Vertical offset of seabed photons.*

'''

compute uncorrected depths

D = W - Z

H = 496 # mean orbital altitude of IS2, km

Re = 6371 # mean radius of Earth, km

angle of incidence (wout Earth curvature)

theta_1_ = (np.pi / 2) - ref_el

ignoring curvature correction based on correspondence with the author

incidence correction for earths curvature - eq 13

*# delta_theta_EC = np.arctan(H * np.tan(theta_1_) / Re)*

angle of incidence

theta_1 = theta_1_ # + delta_theta_EC

angle of refraction

*theta_2 = np.arcsin(n1 * np.sin(theta_1) / n2) # eq 1*

phi = theta_1 - theta_2

uncorrected slant range to the uncorrected seabed photon location

S = D / np.cos(theta_1) # eq 3

corrected slant range

*R = S * n1 / n2 # eq 2*

*P = np.sqrt(R**2 + S**2 - 2*R*S*np.cos(theta_1 - theta_2)) # eq 6*

gamma = (np.pi / 2) - theta_1 # eq 4

*alpha = np.arcsin(R * np.sin(phi) / P) # eq 5*

beta = gamma - alpha # eq 7

cross-track offset

```
dY = P * np.cos(beta) # eq 8
```

```
# vertical offset
```

```
dZ = P * np.sin(beta) # eq 9
```

```
kappa = ref_az
```

```
# UTM offsets
```

```
dE = dY * np.sin(kappa) # eq 10
```

```
dN = dY * np.cos(kappa) # eq 11
```

```
return dE, dN, Dz
```

BLOQUE 24

```
# set up storage for binned and photon bathymetry data
```

```
water_surface = np.nan * np.ones_like(bin_centers_at) # elevation, EGM08
```

```
bathymetry_uncorrected = np.nan * np.ones_like(bin_centers_at)
```

```
bathymetry_corrected = np.nan * np.ones_like(bin_centers_at)
```

```
bin_centroid = np.empty_like(bin_centers_at, dtype=shapely.Point) # location of bin in lat / lon
```

```
df_cleaned['dz_refraction'] = 0 # refraction correction
```

```
# for each location along track (with a progress bar)
```

```
for i_at in tqdm(range(len(bin_centers_at))):
```

```
    waveform_i = hist_2[:, i_at]
```

```
# 1. ESTIMATE WATER/SEAFLOOR SURFACES
```

```
    surface_idx, bathy_idx = extract_bathymetry(waveform_i,
                                                min_height=0.1,
                                                min_prominence=0.1)
```

```
    if surface_idx is None:
```

```
        continue
```

```
# get the actual elevation
```

```
    water_surface_z = bin_centers_z[surface_idx]
```

```
    water_surface[i_at] = water_surface_z
```

```
# 2. REFRACTION CORRECT PHOTON HEIGHTS
```

```
# index subsurface photons in this along-track bin
```

```
    ph_refr_i = (df_cleaned.along_track_meters.values >= bin_centers_at[i_at] - res_at / 2) & \
                (df_cleaned.along_track_meters.values <= bin_centers_at[i_at] + res_at / 2) & \
                (df_cleaned.height_ortho.values <= (water_surface_z))
```

```
# no photons in this bin
```

```
    if np.sum(ph_refr_i) == 0:
```

```
        continue
```

```
z_ph_i = df_cleaned.height_ortho.values[ph_refr_i]
ref_az_ph_i = df_cleaned.ref_azimuth.values[ph_refr_i]
ref_elev_ph_i = df_cleaned.ref_elev.values[ph_refr_i]

# compute refraction corrections for all subsurface photons
_, _, dz_ph_i = photon_refraction(water_surface_z,
                                  z_ph_i, ref_az_ph_i, ref_elev_ph_i,
                                  n1=1.00029, n2=1.34116)

df_cleaned.loc[ph_refr_i, 'dz_refraction'] = dz_ph_i

# compute refraction correction for modeled bathymetry return
if bathy_idx is None:
    continue

bathymetry_uncorrected_i = bin_centers_z[bathy_idx]

ref_az_bin_i = np.mean(ref_az_ph_i)
ref_elev_bin_i = np.mean(ref_elev_ph_i)
_, _, dz_bin_i = photon_refraction(water_surface_z,
                                    bathymetry_uncorrected_i,
                                    ref_az_bin_i, ref_elev_bin_i,
                                    n1=1.00029, n2=1.34116)

bathymetry_corrected_i = bathymetry_uncorrected_i + dz_bin_i

# filter likely erroneous signal caused by wave / turbidity

if (water_surface_z - bathymetry_corrected_i) < min_bathy_depth:
    continue

elif (water_surface_z - bathymetry_corrected_i) > max_bathy_depth:
    continue

bathymetry_uncorrected[i_at] = bathymetry_uncorrected_i
bathymetry_corrected[i_at] = bathymetry_corrected_i

# geolocate this bin
bin_centroid[i_at] = df_cleaned.loc[ph_refr_i, 'geometry'].unary_union.centroid
```

BLOQUE 25

```
f = plt.figure(figsize=(8, 5))

## unrefracted photon elevations
plt.plot(df.along_track_meters, df.height_ortho, '.',
         c='grey', markersize=1, alpha=0.5, label='Uncorrected Photons')

plt.plot(df_cleaned.along_track_meters, df_cleaned.height_ortho + df_cleaned.dz_refraction, 'k.',
         markersize=1, alpha=0.5, label='Refraction Corrected Photon Data')
```

```
plt.plot(bin_centers_at, water_surface, 'b.',
         markersize=2, alpha=1, label='Estimated Water Surface')
```

```
plt.plot(bin_centers_at, bathymetry_corrected, 'r-',
         markersize=1, alpha=0.9, label='Estimated Seafloor')
```

```
plt.ylabel('Corrected Heights, m')
plt.xlabel('$x_{ATC}$, m');
plt.ylim(ylim)
plt.title('Refraction Corrected Bathymetry');
plt.legend(markerscale=3)
plt.show()
```

BLOQUE 26

```
good_data = ~np.isnan(bathymetry_corrected)

df_out = gpd.GeoDataFrame(np.vstack([water_surface[good_data],
                                     bathymetry_corrected[good_data]]).T,
                          columns=['water_surface_z', 'bathymetry_corr_z'],
                          geometry=bin_centroid[good_data],
                          crs=df_cleaned.crs)

df_out['depth'] = df_out.water_surface_z - df_out.bathymetry_corr_z

df_out.head()
```

BLOQUE 27

```
# inspect data on an interactive map
plot_color_depth = df_out.depth.quantile(0.99) # percentile defines maximum depth for colormap

# sort for better color visibility when plotting
df_vis = df_out.sort_values('bathymetry_corr_z', ascending=False)

df_vis.explore(tiles='Esri.WorldImagery',
               column='depth',
               cmap='inferno_r',
               vmax=plot_color_depth, # minimum depth for plotting color
               vmin=min_bathy_depth)
```