



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización batimétrica en aguas someras mediante
fotogrametría subacuática*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Manuel González Baiges

DIRECTORES: Iván Puente Luna

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Caracterización batimétrica en aguas someras mediante
fotogrametría subacuática*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La determinación de información batimétrica de detalle es clave para actividades cercanas a la costa y estudios hidrológicos, así como para aplicaciones en ingeniería costera, procesos sedimentarios, cartografía arqueológica o investigación biológica. Además, resulta de especial interés en las misiones de reconocimiento de fondos que realizan las unidades de Infantería de Marina como parte de las operaciones anfibias y que, en la actualidad, se realizan de forma manual con buceadores. En este trabajo se utiliza un vehículo de superficie no tripulado (*Unmanned Surface Vehicle* o *USV*) de bajo coste, que integra cámara fotográfica y sistema de posicionamiento y cuya finalidad será la elaboración de modelos fotogramétricos subacuáticos a escala que permitan la obtención de información tridimensional precisa y ortoimágenes. La metodología se ensayará en dos casos de estudio distintos, y en base a los resultados obtenidos se estudiarán las posibilidades y limitaciones derivadas de esta técnica.

PALABRAS CLAVE

USV, Fotogrametría subacuática, Batimetría, GoPro Hero 5, Operaciones anfibias

AGRADECIMIENTOS

Una vez he llegado a este gran hito en la Escuela Naval Militar quería acordarme primero en especial de mi familia y mi novia, por todo su apoyo incondicional y por motivarme día tras día durante estos cinco años y estar ahí en los momentos más duros.

Quería agradecer también al profesor Iván Puente Luna en su trabajo guiándome y ayudándome durante todo el tiempo, también por su paciencia y por animarme cuando las cosas no acababan de salir bien. Acordarme también de todo el que me ha ayudado ilustrándome y aportándome información para este trabajo, en especial al personal militar que dedicó su tiempo en mostrarme cómo se realizan los reconocimientos de playa en la actualidad.

Por último, dar las gracias a todos mis compañeros de la promoción 422-152 y a mis amigos más cercanos que han estado a mi lado desde el primer día. Si tuviera que quedarme con algo de todo lo que nos enseñan, sería el compañerismo; todos ellos han sido y serán mi familia.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
Lista de abreviaturas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Introducción	9
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Objetivos	11
2 Estado del arte	13
2.1 Reconocimiento de playas en el ámbito militar	13
2.1.1 Reconocimiento de combate nocturno.....	14
2.1.2 Reconocimiento submarino	15
2.1.3 Reconocimiento hidrográfico	16
2.1.4 Mensaje SURFREP e información necesaria	17
2.2 Batimetría: definición y origen	18
2.2.1 Batimetrías mediante sonar.....	20
2.3 Otros métodos para obtener cartografía batimétrica	21
2.3.1 Métodos por teledetección	21
2.3.2 Método mediante lidar batimétrico.....	22
2.3.3 Batimetrías mediante procedimientos fotográficos	24
2.4 Batimetría mediante fotogrametría subacuática.....	25
2.4.1 Fenómenos dependiendo del tipo de lente.....	27
2.4.2 Vehículos de Superficie No Tripulados (USV)	30
3 Desarrollo del TFG.....	33

3.1 Equipos empleados	33
3.1.1 USV	34
3.1.2 GoPro HERO 5.....	35
3.2 Trabajo de campo.....	36
3.2.1 Identificación de las zonas de estudio	36
3.2.2 Sincronización de la señal GPS	38
3.2.3 Proceso de toma de imágenes	39
3.3 Procesamiento Fotogramétrico <i>SfM</i>	41
3.3.1 Ajustes y orientación fotográficas	41
3.3.2 Generación de la nube de puntos densa	43
3.3.3 Generación de la malla y texturas.....	44
3.3.4 Generación del MDE y los ortomosaicos	46
3.3.5 Modelado con curvas de nivel	47
4 Resultados	49
4.1 Zona de Pruebas I.....	49
4.1.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa	49
4.1.2 Nube de puntos densa	51
4.1.3 Generación de la malla y la textura	52
4.1.4 MDE, Ortofoto y modelo con curvas de nivel.....	55
4.2 Zona de Pruebas II	56
4.2.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa	56
4.2.2 Nube de puntos densa	59
4.2.3 Generación de la malla y textura	60
4.2.4 MDE, Ortofoto y modelo con curvas de nivel.....	62
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	66
6 Bibliografía.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Reconocimiento de playa [3]	10
Figura 2-1 Levantamiento del reconocimiento [1]	14
Figura 2-2 Reconocimiento de combate nocturno [1]	15
Figura 2-3 Reconocimiento submarino [1]	16
Figura 2-4 Reconocimiento hidrográfico [1]	17
Figura 2-5 De derecha a izquierda los buques operativos actuales: el Antares A-23, el Tofiño A-32 y el Malaspina A-31 [10]	20
Figura 2-6 Levantamiento batimétrico [11]	21
Figura 2-7 Lidar batimétrico [7]	23
Figura 2-8 Levantamiento batimétrico mediante procedimientos fotográficos [18]	24
Figura 2-9 <i>Structure from Motion</i> y refracción de la luz en la interfaz del aire y el agua [22]	25
Figura 2-10 Fotogrametría aplicada al pecio de Bou Ferrer [26]	27
Figura 2-11 Efecto de una lente plana [16]	27
Figura 2-12 En un lente plano, el campo de visión máximo está limitado por la reflexión interna total [16]	28
Figura 2-13 Efectos de la lente tipo cúpula [16]	29
Figura 2-14 Proyectado de la superficie de Petzval [16]	29
Figura 2-15 Apache 6 CHCNAV [32]	31
Figura 2-16 <i>DEFENSOR II</i> [34]	32
Figura 3-1 Acople inicial de la cámara al <i>USV</i> [Elaboración propia]	34
Figura 3-2 <i>USV</i> utilizado para el levantamiento batimétrico [Elaboración propia]	34
Figura 3-3 <i>GoPro Hero 5 Black Edition</i> : cámara utilizada para la experimentación [36]	35
Figura 3-4 Zona de Pruebas I: Piscina de la ENM [Elaboración propia]	37
Figura 3-5 Zona de Pruebas II: zona industrial de la ENM [Elaboración propia]	37
Figura 3-6 Localización y dimensionamiento de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	38
Figura 3-7 Señal GPS de la <i>GoPro</i> en modo foto secuencial [Elaboración propia]	38
Figura 3-8 Proceso de toma de imágenes en la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	39
Figura 3-9 Plan de captura de las imágenes en la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	40
Figura 3-10 Plan de captura de imágenes en la Zona de pruebas II [Elaboración propia]	40
Figura 3-11 Tomas fotográficas desde distintos puntos de vista [37]	41
Figura 3-12 Proceso de orientación de fotografías mediante <i>Agisoft Metashape</i> [Elaboración propia]	42
Figura 3-13 Proceso para generar nube de puntos densa [Elaboración propia]	43
Figura 3-14 Proceso de limpieza de puntos externos a nuestro modelo definitivo [Elaboración propia]	44

Figura 3-15 Proceso para generar la malla a partir de la nube de puntos densa [Elaboración propia]	45
Figura 3-16 Proceso para crear textura de la malla [Elaboración propia]	45
Figura 3-17 Proceso para crear el ortomosaico [Elaboración Propia]	46
Figura 3-18 Proceso de crear MDE [Elaboración propia]	47
Figura 3-19 Proceso de crear curvas de nivel [Elaboración propia]	47
Figura 4-1 Fotografías solapadas una vez han sido orientadas [Elaboración propia]	50
Figura 4-2 Detalle fotografías realizadas en la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	50
Figura 4-3 Nube de puntos dispersa Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	51
Figura 4-4 Nube de puntos densa Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	51
Figura 4-5 Malla modelo sombreado de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	52
Figura 4-6 Malla modelo solido de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	53
Figura 4-7 Malla del modelo alámbrico de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	53
Figura 4-8 Malla con el nivel de confianza del modelo de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	54
Figura 4-9 Modelo texturizado de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]	55
Figura 4-10 Ortomosaico de la Zona de Pruebas I	56
Figura 4-11 Posicionamiento GPS de los puntos de captura de cada imagen [Elaboración Propia]	57
Figura 4-12 Fotografías orientadas modelo de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	57
Figura 4-13 Detalle fotografías realizadas en la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	58
Figura 4-14 Nube de puntos dispersa Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	58
Figura 4-15 Dimensiones de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	59
Figura 4-16 Nube de puntos densa de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	59
Figura 4-17 Malla modelo sombreado de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	60
Figura 4-18 Malla modelo solido de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	60
Figura 4-19 Malla del modelo alámbrico de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	61
Figura 4-20 Malla nivel de confianza del modelo Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	61
Figura 4-21 Modelo texturizado de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	62
Figura 4-22 MDE de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]	62
Figura 4-23 MDE caracterizado con curvas de nivel [Elaboración propia]	63
Figura 4-24 Proyección curvas de nivel sobre malla texturizada [Elaboración propia]	63
Figura 4-25 Ortomosaico referenciado con curvas de nivel	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Formato mensaje SURFREP [1]	18
Tabla 2-2 Formato de mensaje BSIR [1].....	18
Tabla 3-1 Prestaciones del JABO 2AL USV	35
Tabla 3-2 Prestaciones de la cámara <i>GoPro Hero 5 Black Edition</i>	36

LISTA DE ABREVIATURAS

ASC: Autonomus Surface Craft
ALB: Aerial Lidar Bathymetry
ALBTS: Airborne Laser Bathymetry and Topography System
BSIR: Beach Reconnaissance
BHI: Bureau Hydrographique International
CAI: Correlación automática de imágenes
CHARTS: Compact Hydrographic Airborne Rapid Total Survey
EAARL: Experimental Advanced Airborne Research LIDAR
ENM: Escuela Naval Militar
EO: Electro Ópticos
EXIF: Exchangeable Image File Format
FAO: Fuerza Anfibia Operativa
FGNE: Fuerza de Guerra Naval Especial
FOV: Field of View
FLOAN: Flotilla de Aeronaves
GPS: Sistema de Posicionamiento Global
GCS: Ground Control System
IHM: Instituto Hidrográfico de la Marina
IR: Infrarrojo
ISR: Identificación Vigilancia y Reconocimiento de objetivos de interés
LBL: Sistema de Línea Base Larga
LIDAR: Laser Imaging Detection and Ranging
LADS: Laser Airborne Depth Sounder
MDE: Modelo Digital de elevación
NCDU: Naval Combat Demolition Units
OTH: Over the Horizon
OHI: Organización Hidrográfica Internacional
SAR: Search and Rescue
SAR: Synthetic Aperture Radar
SBL: Sistema Línea base corta
SDB: Batimetría derivada de Satélite
SHOLAS: Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey
SIFT: Scale Invariant Feature Transform
SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre
SURF: Speed Up Robust Features

SURFREP: Surf Report

SfM: Structure from Motion

TAR: Target Acquisition Reconnaissance

UAS: Unmanned Aerial System

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

USV: Unmanned Surface Vehicle

USBL: Sistema Linea Base Ultracorta

UDT: Underwater Demolition Teams

UOE: Unidad de Operaciones Especiales

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En el ámbito de las operaciones anfibas tiene una gran importancia el estudio del terreno, y en particular de las playas donde van a varar las distintas embarcaciones y lanchas de desembarco. La caracterización batimétrica previa al desembarco es por tanto de gran interés ya que permite conocer si el terreno cumple las restricciones definidas por las condiciones de calado de las embarcaciones empleadas por la Infantería de Marina, así como para establecer las distintas canales de entrada a la playa. Con frecuencia, la obtención de todos estos datos se lleva a cabo de manera manual, tanto por la unidad de operaciones especiales de la Armada FGNE (Fuerza de Guerra Naval Especial) como por las distintas unidades de reconocimiento que posee la Infantería de marina.

Es por ello por lo que se tiene que contextualizar las necesidades que requieren este tipo de operaciones y la información que resultaría de interés para los servicios de inteligencia.

Este trabajo de investigación propone la aplicación de un USV de bajo coste como medio de obtención de datos hidrográficos para el posterior estudio y caracterización de aguas someras, a través de la aplicación de la fotogrametría en el ámbito subacuático. Con este sistema los usuarios serán capaces de obtener más información de una manera más sigilosa, rápida y precisa del entorno marítimo donde se van a realizar estas operaciones anfibas.

Estos sistemas no tripulados son ya operados por diferentes países y cada vez es mayor su aplicación en el ámbito de defensa. En particular, y dentro de las diferentes ramas que constituyen nuestras Fuerzas Armadas, el fácil encontrarse con que se están potenciando estas nuevas técnicas en distintos ámbitos, como la aplicación de los UAV en la obtención de inteligencia y el reconocimiento del terreno para el planeamiento y conducción de operaciones. La Armada también posee propuestas de medios USV por lo que este proyecto podría aumentar las capacidades a nivel de inteligencia de la Armada y, por ende, de la Infantería de Marina de cara al futuro.

1.2 Planteamiento del problema

El presente estudio se sitúa en el marco de las operaciones anfibas, y por eso, es necesario en primer lugar introducir qué 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” D-RIM-311

Con este trabajo se persigue modernizar una de las etapas necesarias durante una operación anfibia mediante la cual se realiza un estudio de la playa. Este procedimiento se encuentra en la fase de

“Preparación”, en la que se realizan todas las acciones necesarias para conformar la zona previa a un desembarco anfibio.

Durante esta fase aparecen unidades tanto de operaciones especiales como de reconocimiento que son las encargadas de llevar a cabo el reconocimiento de la playa donde se va a desembarcar, así como de los fondos de esta para ver el lugar óptimo para realizar la varada de las embarcaciones, ver Figura 1-1.

El motivo principal de los reconocimientos de playas es recoger la mayor cantidad de información posible sobre las condiciones hidrográficas, topográficas y militares de una playa enemiga sobre la que se va a realizar una operación anfibia proyectando una fuerza anfibia. El origen, de esta actividad tiene lugar durante la Segunda Guerra Mundial y los primeros en ponerlo en práctica fueron los EE.UU.

Al principio eran unidades independientes los grupos de voluntarios llamados *Naval Combat Demolition Units (NCDU)* estaban constituidos cada uno por un oficial y cinco hombres; la misión de estas unidades era abrir, por medio de explosivos llevados a nado hasta la playa, una serie de canales libre de obstáculos entre las defensas de playas de modo que pudieran pasar las primeras olas de desembarco.

Una vez establecida una cabeza de playa, los NCDU limpiaban completamente de obstáculos la playa y posteriormente, abrían canales más profundas para facilitar el acceso a la playa de las grandes barcas que transportaban el material pesado destinado al apoyo logístico. Este personal sufrió 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*”, asignándosele esta misión de Reconocimiento [1].

En España esta misión se le asignaba a la UEBC (Unidad Especial de Buceadores de Combate), unidad que a partir del 2009 se fusiona 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 y la Compañía de Reconocimiento y Adquisición de Blancos (TAR) del Batallón de Cuartel general son los encargados de llevar a cabo estas operaciones [2].



Figura 1-1 Reconocimiento de playa [3]

Sin embargo, este procedimiento en la actualidad sigue siendo muy tedioso y lento; de ahí que surja la necesidad de aplicar los medios actuales de USV (Unmanned Surface Vehicle) para la obtención de inteligencia e información de la zona donde se va a realizar el desembarco de una manera más eficiente.

1.3 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo fin de grado consiste en desarrollar un sistema de caracterización batimétrica en zonas de aguas someras basado en la combinación de un *Unmanned Surface Vehicle* (USV) y la fotogrametría subacuática, 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.

Para alcanzar el objetivo principal se plantean los siguientes objetivos intermedios:

- Introducir al alumno en la fotogrametría subacuática como una técnica de topografía alternativa a las aprendidas en clase.
- Manejo de un USV y una cámara *GoPro* de bajo coste para la adquisición de una secuencia de imágenes de manera remota.
- Familiarizarse con el programa de procesamiento fotogramétrico *Agisoft Metashape* y sus distintos modos de procesamiento de imágenes, que permiten la elaboración del modelo batimétrico final.
- Aumentar las capacidades en el empleo de los USV a la hora de adquirir imágenes del medio marítimo y su manejo de manera remota.
- Desarrollar capacidad de flexibilidad y aprendizaje en utilización de los distintos programas y equipos empleados.
- Reforzar conocimientos sobre el levantamiento del terreno, el empleo de sistemas de coordenadas y otros conceptos fundamentales de la topografía.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se introduce, en primer lugar, la manera en que hoy en día, en España, la Brigada de Infantería de Marina “Tercio de Armada” reconoce el fondo marino próximo a la costa, como apoyo a las operaciones anfibia relacionadas con la proyección del poder naval sobre tierra. Además, se recoge una visión general del término *batimetría*, así como de los métodos fundamentales de observación para obtener cartografía batimétrica. Por último, se hace especial hincapié en la fotogrametría subacuática, como técnica seleccionada para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado.

2.1 Reconocimiento de playas en el ámbito militar

Militarmente, el reconocimiento consiste en la búsqueda y recopilación de información sobre el enemigo, junto con las condiciones ambientales que le rodean, como parte de la inteligencia militar. Dentro de este amplio término, que engloba muchos ejemplos (helicópteros de reconocimiento, puestos de observación, etc.), se encuentra el reconocimiento anfibio, con especial hincapié en las playas [1].

Asimismo, denominaremos reconocimientos de Playas, a las operaciones encaminadas a obtener todos los datos posibles sobre playas de desembarco que la célula de Inteligencia de una Fuerza Anfibia Operativa estime necesario obtener. Los datos de interés a obtener dependiendo del tipo de reconocimiento que se realice son:

Reconocimiento Hidrográfico:

- Sondas (desde el veril de 7 metros hasta la playa).
- Obstáculos naturales: rocas, bancos, algas, barreras de arena, etc.,
- Tipos de fondo: arena, rocas, algas, cascajo, etc.
- Corrientes.
- Tipo de rompiente.
- Vegetación marítima.
- Composición de la playa.
- Anchura, cobertura y accesos naturales desde la playa hasta la espalda de esta (Back Of Beach).

Reconocimiento Militar:

- Obstáculos artificiales en el agua y en seco.
- Minas.
- Emplazamiento de armas y sensores.
- Actividad de tropas y vehículos.
- Cualquier información susceptible de uso militar.

En general, hay que observar y anotar en la tablilla de inteligencia o retener en la memoria, toda clase de datos que el jefe del Equipo crea de interés para el planeamiento y ejecución de un desembarco anfibio.

En todo tipo de reconocimiento ofensivo de playas, es muy importante que cada buceador sepa identificar posteriormente sobre la carta, plano o fotografía aérea, el punto exacto en que llegó a la playa. El buceador llevará su tablilla de inteligencia preparada de antemano. El cuadriculado de la tablilla será diferente según el tipo de reconocimiento, ver Figura 2-1.

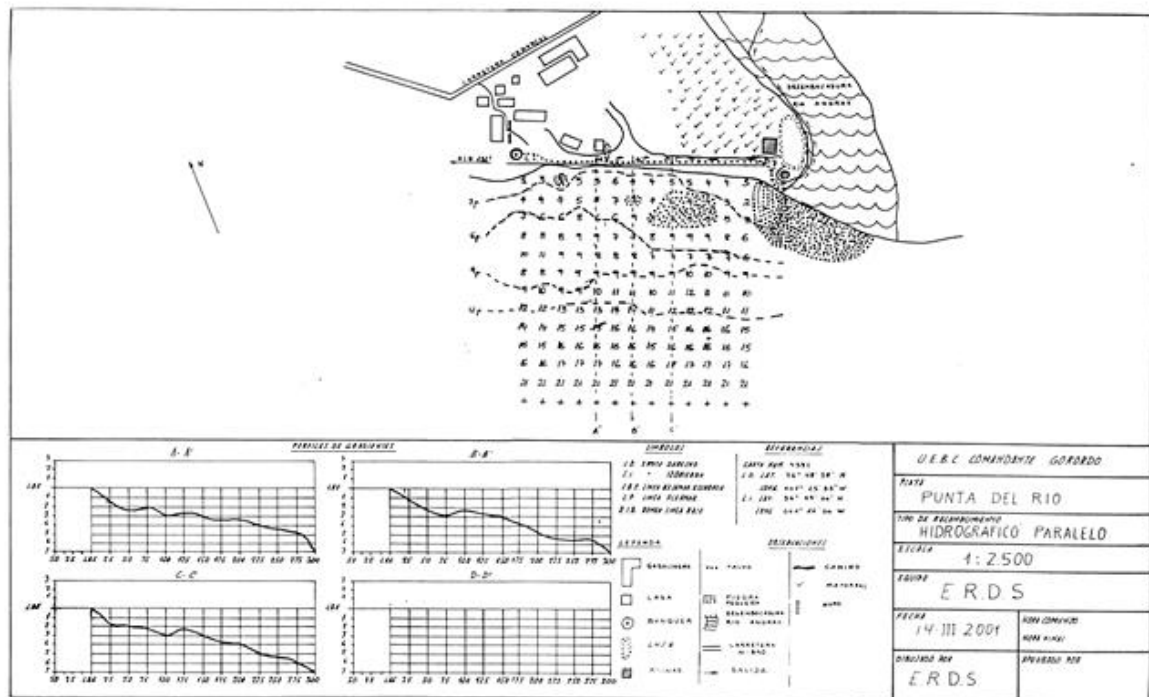


Figura 2-1 Levantamiento del reconocimiento [1]

2.1.1 Reconocimiento de combate nocturno

Este tipo de reconocimientos se realizan cuando se requiere información de una playa que se encuentra ocupada por el enemigo sin que nuestras unidades sean detectadas y se quiera mantener el secreto del lugar donde se va a realizar el desembarco. Es un reconocimiento que no requiere de apoyo por parte de los buques y muy difícil de ser detectado, sin embargo, tiene poca precisión al realizarse en un ambiente hostil, ver Figura 2-2 [4].

La ejecución de este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

- Se parte desde una distancia a playa desde el veril de 7m, dependiendo de la longitud se colocarán un número determinado de buceadores. Las embarcaciones lanzan al equipo de reconocimiento a una distancia de playa de 500m.
- El jefe de equipo y el cartógrafo llegaran a playa, buscan situarse en la zona de la costa. Una vez realizado el primer reconocimiento visual se establecerá lo que se conoce como una línea sonda, cabo que discurre desde el fondo en dirección perpendicular a la orilla, en la cual cada buceador ira ocupando una posición con una distancia entre ellos de unos 25m.
- Una vez establecida la línea sonda se comenzará a batir la playa en un sentido haciendo paradas cada 25 m donde los buceadores subirán a superficie para corregir la enfilación y proseguir con el reconocimiento.

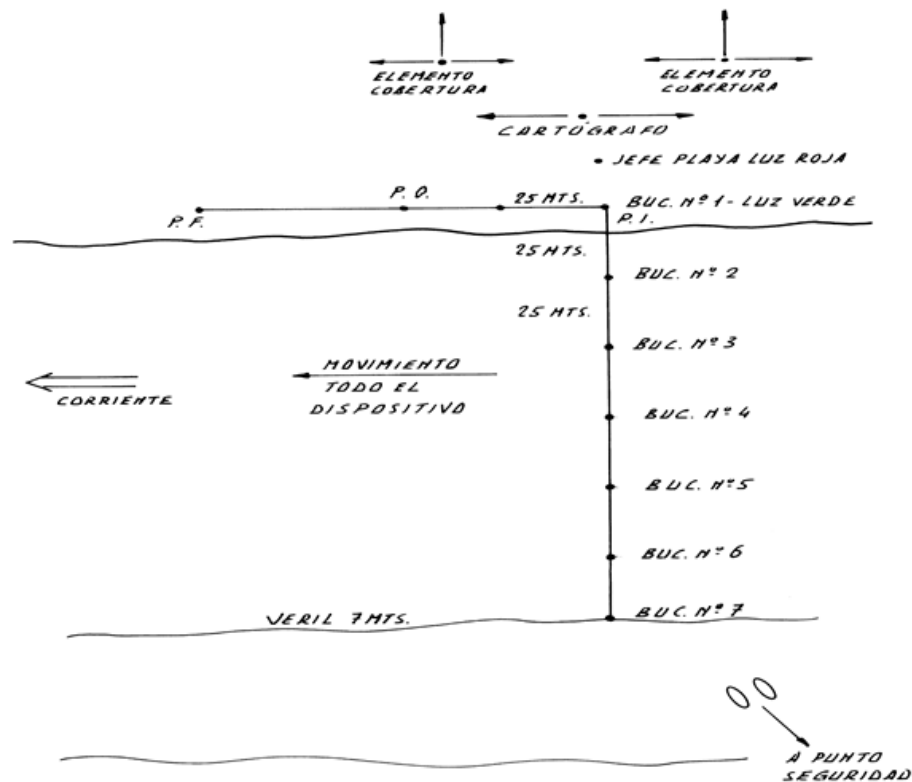


Figura 2-2 Reconocimiento de combate nocturno [1]

2.1.2 Reconocimiento submarino

Este procedimiento se utiliza en caso de tener que reconocer una playa que se encuentra ocupada y controlada por el enemigo, su ejecución está sujeta al máximo secreto y por ello el buque nodriza desde el que parten los buceadores a poder ser debería de tratarse de un submarino, acondicionado para el empleo de buceadores de combate.

Este tipo de operación requiere de un adiestramiento elevado, es un proceso inexacto, lento y difícilmente el regreso a la posición donde fue el lanzamiento del buque nodriza una vez se finalice el reconocimiento, ver Figura 2-3.

La ejecución de este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

- Una vez son lanzados por el buque nodriza el equipo de buceadores se dirigirán en rumbo y distancia al punto inicial del reconocimiento. Una vez lleguen a la línea del veril de 7 m el jefe de equipo, si la situación táctica lo permite, saldrá a la superficie para establecer un punto característico en la línea de costa y establecer una demora a playa.
- Un primer binomio bucease con el rumbo determinado con el chicote de un cabo el cual depositan al llegar al veril de 1m de profundidad, este es lo que se conoce como cabo carretel.
- Por binomios reconocerán tanto de ida como de vuelta el cabo carretel anotando en sus tablillas cada obstáculo que se pueda distinguir durante el reconocimiento del fondo.

Es necesario destacar de este reconocimiento su dificultad, tanto en el desarrollo como en la posibilidad de encontrarnos distintos obstáculos, por lo que deberá ser llevado a cabo por personal muy cualificado

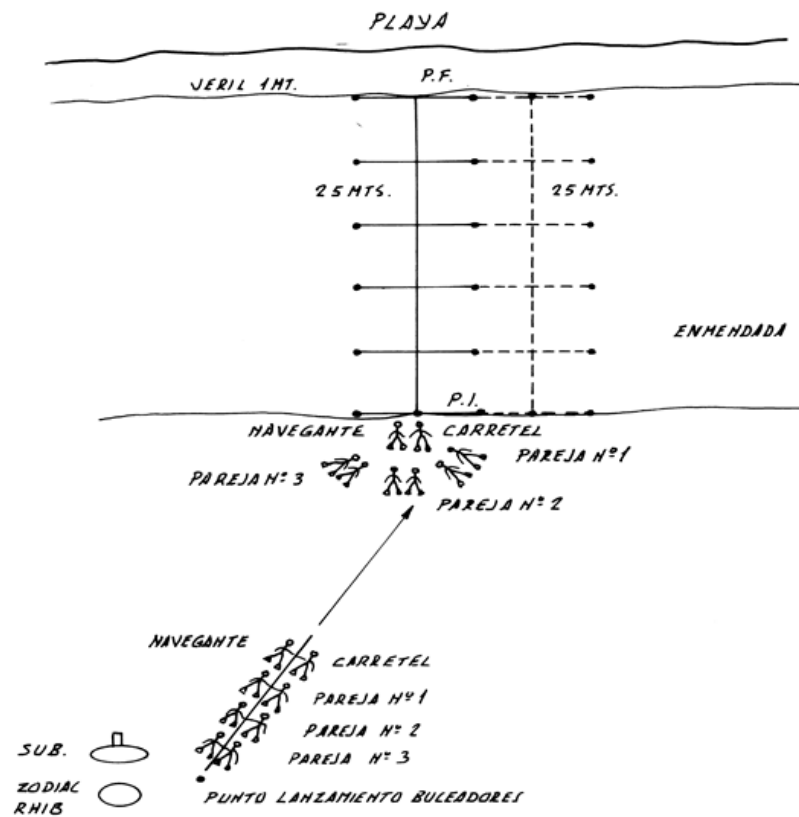


Figura 2-3 Reconocimiento submarino [1]

2.1.3 Reconocimiento hidrográfico

Este no es un reconocimiento de combate el realizarse en condiciones de una playa controlada por fuerzas propias y se efectúa en sentido inverso de tierra al mar. Es una operación de carácter más administrativo, el cual se realiza tras el desembarco principal y se trabaja sin hostilidad. Este tipo de reconocimientos es de mayor precisión y exactitud [5].

Este tipo de reconocimientos se realiza en tiempo de conflictos para establecer canales de entrada para buques logísticos de mayor calado que las lanchas de desembarco, levantar carta hidrográfica desde el veril de los 7 m hasta la línea de marea alta y localizar proyectiles, minas que queden por desactivar, ver Figura 2-4.

Existen tres métodos principales para realizar este reconocimiento:

- Por buceadores con sonda. Es el método más rápido al cubrir tantas líneas como numero de buceadores se tengan.
- Por embarcaciones y el uso de escandallos. Esto se emplea si las condiciones del agua son extremas en cuanto a temperatura o carencia de buceadores.
- Por embarcaciones dotadas de un sonar de eco. Este es el método más exacto pues es un pulso continuo y da el perfil exacto del fondo.

La ejecución de este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

- Se fijará el punto inicial el cual se posicionará por medio de GPS. Se materializa lo llamado como línea base. Es una línea paralela al mar que discurre por la orilla de la playa, esta línea será la referencia para todo el reconocimiento. Esta línea tendrá unas marcas cada 25 m.
- A partir de la línea base se establece la línea de agua en la que los buceadores nadan alejándose de la orilla hasta que el primer buceador se encuentre en el veril de 7m.
- Una vez se tienen a los buceadores en posición se manda sondear y realizada la sonda toda la línea de agua es trasladada por el equipo en tierra hasta la siguiente marca de la línea base. Los buceadores nadan en la misma dirección y se alinean de nuevo. Se repite la operación cuantas veces sea necesario hasta el final de la playa a reconocer.

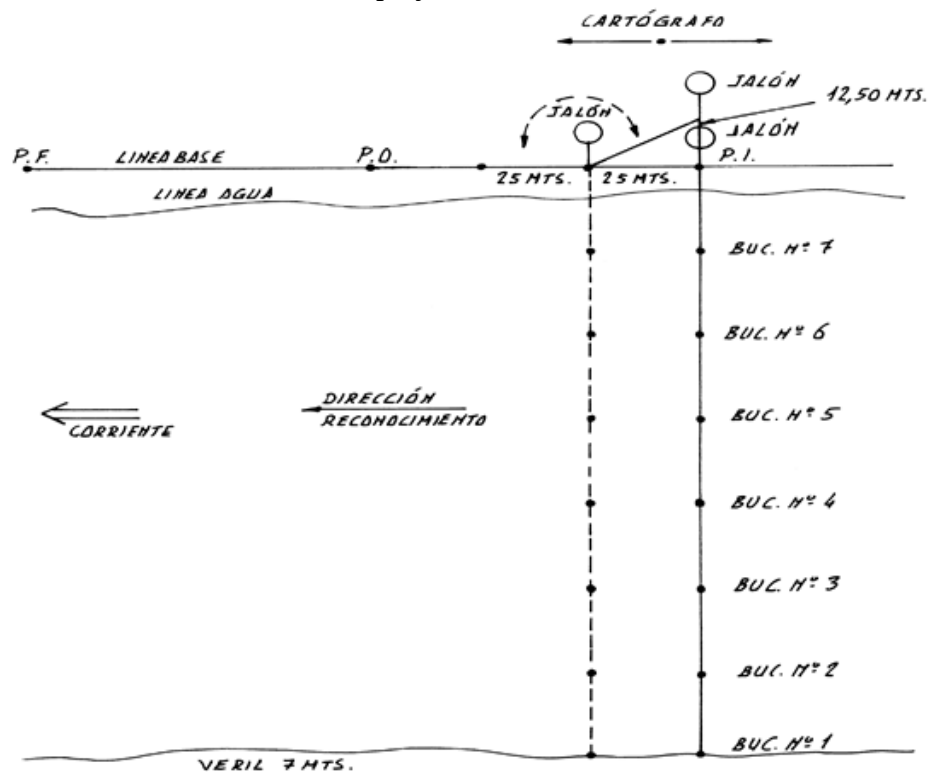


Figura 2-4 Reconocimiento hidrográfico [1]

2.1.4 Mensaje SURFREP e información necesaria

Los equipos de reconocimiento una vez han realizado toda la inspección del fondo emiten un mensaje al buque con toda la información necesaria para inteligencia y que se necesita para realizar el desembarco anfibio. En este punto se puede destacar la utilización de dos mensajes principalmente que son:

SURFREP (SURF REPORT)

A	Unidades a utilizar si son metros, yardas, pies etc.
B	GFH (Grupo Fecha Hora) una vez finalizado la observación
C	Altura media de la rompiente expresada hasta la décima de metro
D	Altura máxima de la rompiente
E	Periodo. El tiempo que pasa entre crestas con un punto fijo como referencia
F	Tipo de rompiente: Derramante, Cayente o Ascendente

G	Angulo que forma la rompiente con la línea de playa
H	Corriente expresada en nudos y su dirección
I	Líneas y ancho de la rompiente (Surf zone)
K	Viento en playa. Visibilidad. Altura de la rompiente secundaria.

Tabla 2-1 Formato mensaje SURFREP [1]

Una vez se realiza un SURFREP se puede mandar otro tipo de mensaje que es el BSIR (Beach Reconnaissance) este mensaje recoge otro tipo de información más al detalle y un análisis del fondo de la playa. En el momento que lo realizan se hace de una manera más exhaustiva y se hace un análisis del fondo más en detalle [6].

BSIR (Beach Reconnaissance)

A	Nombre y localización de la playa
B	Numero de la carta.
C	Coordenadas de la playa (Latitud y Longitud).
D	Equipo que realiza el reconocimiento.
E	Hora y fecha de reconocimiento (Comienzo y fin).
F	Demora de línea de sonda número.
G	La traficabilidad de la playa si hace falta esterillas para los vehículos
I	Gradiente de la playa
J	Corriente demora y velocidad
K	Localización y descripción de obstáculos
L	Localización y descripción de la artillería
M	Recomendaciones. Instrucciones especiales
N	Observaciones
O	Croquis de la playa

Tabla 2-2 Formato de mensaje BSIR [1]

2.2 Batimetría: definición y origen

En ámbitos civiles, cuando se habla de batimetría, se puede definir como la ciencia que se encarga de estudiar la forma y la composición del fondo marino incluyendo tanto a las grandes masas de agua, como los océanos y mares, como a los ríos, lagos y cualquier otra formación geográfica relacionada con el ámbito acuático. Se puede definir también como la cartografía de los fondos, como si estos fueran un terreno seco en la superficie.

La batimetría según la Real Academia Española quedaría definida como:

Estudio de las profundidades oceánicas mediante el trazado de mapas de isóbatas, así como de la distribución de animales y vegetales marinos en sus zonas isobáticas.

La batimetría resulta análoga a lo que sería la altimetría en el ámbito terrestre, pero aplicado al ambiente submarino. Se realiza un estudio del relieve del fondo marino dando datos para la posterior realización de un levantamiento hidrográfico [7]. Es el ámbito que estudia la profundidad del fondo marino y realiza los llamados mapas batimétricos que son planos donde se muestra el relieve marino con sus diferentes cotas y curvas de nivel que lo definen; estos mapas también pueden aportar información que sirva de ayuda a la navegación. La batimetría quedaría definida cuando se levantan todas las coordenadas (X, Y, Z) de manera que se describan los fondos marinos con su contorno y las distintas formaciones que se pueden encontrar en el mismo [8]. Sin embargo, existen diferencias con relación a los levantamientos topográficos, principalmente relacionadas con la inestabilidad de los instrumentos de medición a causa de los movimientos de la masa de agua, y que influyen en la precisión de las batimetrías. Pero, además, en este tipo de trabajos será necesaria una embarcación con suficiente estabilidad para amortiguar posibles vibraciones.

El estudio del fondo marino mediante levantamientos batimétricos es de especial importancia para producir cartas náuticas y dar apoyo a la navegación desde la antigüedad. También cobra especial relevancia a la hora de realizar obras marítimas, véase diques, puertos, espigones, muelles etc. También es fundamental para el estudio previo a la realización de un dragado.

La necesidad del estudio del fondo marino se remonta a muchos años atrás. La primera carta de navegación data del siglo XII, la conocida como “carta pisana”, en la que ya comenzaban a aparecer datos con señalizaciones de las rocas que podían ser un peligro para la navegación. En esta época, ciudades como Venecia y Mallorca contaban ya con personal dedicado a la cartografía, haciendo estudios para delimitar principalmente el mar mediterráneo; toda esta información era recogida en manuales que se conocían como “cartas portulanas”.

Para conocer lo que serían los orígenes de la batimetría hay que remontarse a las primeras técnicas que utilizaban nuestros antepasados; lo primero que utilizaban para la medición del fondo marino era un instrumento llamado “escandallo” que tenía un peso y una cuerda con nudos que marcaban la profundidad a la que se encontraba, también contenía un hueco en la punta con el que era capaz de tomar muestras del fondo.

En España, se creó en 1789 el Depósito Hidrográfico, que se transformó en 1944 en el actual Instituto Hidrográfico de la Marina (I.H.M), organismo oficial español en materias de hidrografía, oceanografía y cartografía náutica, dependiente del Estado Mayor de la Armada. En la actualidad, el I.H.M representa a España en la Organización Hidrográfica Internacional (O.H.I.), que es la responsable a nivel internacional de las tareas de coordinación de la cartografía marítima, y que fue establecida en 1921 con la creación del antes llamado *Bureau Hydrographique International* (B.H.I) o el Departamento Hidrográfico Internacional.

Precisamente, es en el año 1789 cuando Vicente Tofiño elaboró el 1^{er} Atlas Marítimo de España, formado por cartas esféricas, planos de puertos, rías o fondeaderos y donde el principal elemento representado es la línea de costa [9].

En el año 1927 se crea la sección V – Servicio Hidrográfico de la Armada en el Observatorio de Marina de San Fernando en Cádiz, y esta época coincide con la construcción de dos buques planeros, el *Tofiño* y el *Malaspina*, que tras realizar importantes labores cartográficas en las Islas Canarias y en las colonias africanas, cesaron su actividad en la década de 1970.

La Armada cuenta con una serie de buques orientados a la investigación oceánica e hidrográfica. De estos cabe destacar el *BIO Hespérides* (A-33) destinado para investigaciones en la campaña antártica y apoyo logístico a las bases españolas en la zona.

Para el ámbito de la hidrografía, la Armada cuenta con dos clases de buque diferentes entre sí: la clase *Malaspina*, por el buque que le da nombre a la clase el *Malaspina* (A-31) 1975 y por su gemelo el *Tofiño* (A-32) 1975; y la clase *Castor*, constituida por el *Castor* (A-21) y el *Pollux* (A-22), ambos dados

de baja entre el 2003 y el 2004, el *Antares* (A-23) 1974, único que queda operativo en la actualidad, y el *Rigel* (A-24), dado de baja en 2013 (véase Figura 2-5).

Estos buques los utiliza la Armada en labores científicas e hidrográficas, por lo que su aspecto es similar al de un buque civil con colores blancos y ausencia de armamento. Los principales cometidos asignados a estos buques son levantamientos hidrográficos, actualización de derroteros, libros de faros, cálculo del cero hidrográfico y la exploración del lecho marino.

Hay que destacar que los buques *Malaspina* (A-31) y *Tofiño* (A-32) cuentan con dos buques auxiliares para su empleo en zonas de aguas someras, equipados con el sistema de sonda Geoswath 500 para cobertura del lecho de puertos, canales de acceso y fondeaderos [10].



Figura 2-5 De derecha a izquierda los buques operativos actuales: el Antares A-23, el Tofiño A-32 y el Malaspina A-31 [10]

2.2.1 Batimetrías mediante sonar

Actualmente la técnica batimétrica más popular y conocida es aquella que utiliza un sónar situado en la quilla de un buque, que lanza una onda acústica al fondo marino a través de la que se obtienen datos para realizar un mapa batimétrico. Esta tecnología se basa en calcular el tiempo que tarda esta onda acústica en recorrer la distancia existente entre el punto de partida y el fondo marino y regresar al casco, de manera que es posible obtener información de la profundidad marina. En esta técnica se utiliza una onda de sonido para evitar el fenómeno de la refracción que sufre la luz en este medio [7].

Cuando se habla de sónares hay que recalcar que en la actualidad se pueden encontrar dos tipos de sónar:

- **Monohaz (*Single-Beam Echo Sounder – SBES*)** aquel que envía una onda de manera que realiza un estudio del fondo de manera discreta y se realiza un levantamiento hidrográfico conocido como levantamiento por perfiles, usado antiguamente sobre todo en los orígenes del sónar.
- **Multihaz (*Multi-Beam Echo Sounder – MBES*)**: son aquellos que emiten un abanico de ondas en varias direcciones de manera que cubren una mayor zona del fondo marino, ver Figura 2-6.

Los ecosondas multihaz permiten cubrir gran parte del fondo marino y una gran cantidad de información adicional con la que se es capaz de determinar la composición del fondo marino. Con este tipo de ecosondas se puede realizar batimetrías a una gran profundidad y con unos grados de turbidez elevados. La desventaja de este sistema es su coste. Por otro lado, se encuentra la otra opción que utilizaría ecosondas monohaz, que constituyen un buen equilibrio entre calidad y coste.

Esta metodología tiene también una serie de desventajas. Como ya se ha mencionado una de ellas es el costo debido a que se tiene que montar el ecosonda sobre una embarcación y obtener bastantes puntos para que hacer un levantamiento batimétrico con calidad. También este método está supeditado a las condiciones meteorológicas como son el oleaje, la marea, turbidez etc. Por último, una de las limitaciones es el acceso a las zonas poco profundas, a las que la embarcación no puede acceder por su calado y que suponen un riesgo a la navegación [8].

A parte de estos sónares, los buques están equipados con sensores adicionales como sistemas GPS (Sistema de Posicionamiento Global), que permiten compensar el movimiento del buque, su inclinación y el efecto de las mareas, además de otros sistemas para el cálculo de la velocidad del sonido en el agua, la conductividad y la presión. Toda esta información es procesada por un programa que con el conjunto de datos es capaz de realizar un levantamiento hidrográfico y generar un mapa batimétrico.

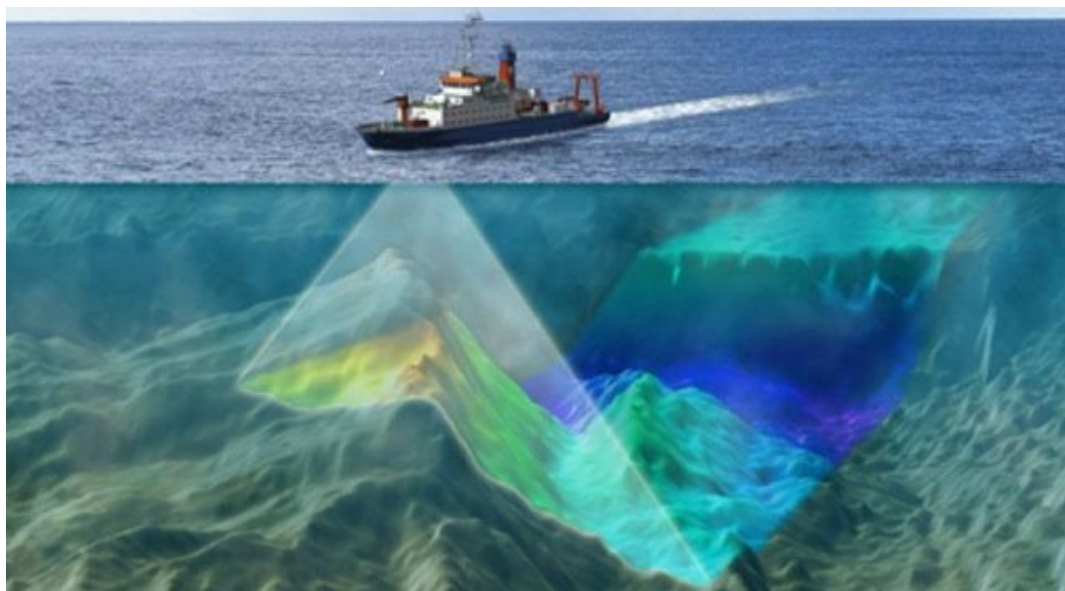


Figura 2-6 Levantamiento batimétrico [11]

2.3 Otros métodos para obtener cartografía batimétrica

Tradicionalmente, las técnicas batimétricas convencionales incluyen ecosondas a bordo de embarcaciones o batimetrías por *lidar* aerotransportado. Las batimetrías por sónar tienen una elevada exactitud y pueden medir considerables profundidades, mientras que con el *lidar* aerotransportado se consiguen mayores coberturas, aunque las condiciones de vuelo pueden restringir su uso. Además, hay que destacar avances en campos como la fotogrametría y los sistemas de teledetección, así como en las tecnologías *lidar* y *radar*. Estas técnicas actuales son mucho más eficientes que el sistema por ecosondas acústicas.

En esta parte se tratan las diferentes técnicas utilizadas actualmente para realizar levantamientos hidrográficos, estas técnicas son las diferentes posibilidades que se pueden encontrar en la actualidad para la obtención de datos del fondo marino.

2.3.1 Métodos por teledetección

La batimetría por teledetección utiliza la información proporcionada por distintos satélites, combinados habitualmente con equipamiento radar y cámaras multiespectrales 2D para la estimación de

las profundidades en aguas costeras, debido al potencial de estos sensores en capturar información de grandes extensiones de forma continua. Además, su coste es reducido y no tienen restricciones de tiempo o espacio, o restricciones de seguridad que limitan la operación de aeronaves o barcos, de manera que mejoran las desventajas de los métodos convencionales. Por ejemplo, destacan en este campo el LANDSAT-8, SENTINEL-2, el SPOT o RADARSAT.

El satélite RADARSAT, puesto en órbita en 1994, es un proyecto canadiense que porta un radar de apertura sintética (SAR), con el objetivo de estudiar la navegación en el Océano Atlántico. Las imágenes radar tienen la ventaja de no verse influidas por la luminosidad ni por la nubosidad de la zona. Un inconveniente para este método es que las ondas que trabajan en el rango de las microondas tienen poco poder de penetración por lo que está solo recomendado para aguas someras.

En cambio, la determinación de la batimetría por imágenes multiespectrales (denominada también como Batimetría Derivada por Satélite – SDB, por sus siglas en inglés) se basa en la hipótesis de que la cantidad de energía radiada reflejada por columna de agua está ligada a la profundidad. Además, la corrección atmosférica se considera un paso crítico en aquellos datos obtenidos por sensores remotos, como es el caso. Un leve error en esta corrección puede conducir a cambios significativos en la radiación desde el agua [12] [13].

Por tanto, esta técnica va a depender, no solo de las condiciones atmosféricas, sino también de cómo se propaga la luz en el agua, de manera que deben tenerse en cuenta otros aspectos de las propiedades ópticas del agua, como el coeficiente de atenuación y dispersión, afectados por la turbidez y calidad del agua. Con esta técnica se determinan resultados bastante satisfactorios en mares con poca profundidad. Para aplicar esta alternativa para la estimación de profundidades en aguas costeras, se suelen emplear las bandas roja, azul, verde e IR del Landsat-8 y Sentinel-2, cuyas imágenes multiespectrales presentan una resolución espacial de 30 y 10 m, respectivamente.

Otro satélite utilizado para estos fines es el SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Se trata de una iniciativa francesa lanzada en 1986, 1990 y 1993, con bandas en el espectro visible y en el infrarrojo próximo. Tiene una órbita menor que el Landsat, por lo que se consigue una mayor resolución. Permite obtener imágenes estereoscópicas combinando dos imágenes de la misma área adquiridas en diferentes fechas y diferentes ángulos. Permite obtener mapas de la temperatura de la superficie del agua, monitorización de zonas costeras, dinámica de arroyos en la costa, cartografía de sedimentos costeros, etc.

2.3.2 Método mediante lidar batimétrico

Las exploraciones batimétricas que utilizan la energía de un láser para penetrar la columna de agua han sufrido, en los últimos veinte años, una gran evolución hasta tal punto que este método basado en *LIDAR (Light Detection and Ranging)* proporciona en la actualidad una alternativa viable y económica a los métodos acústicos.

La batimetría *LIDAR* aerotransportada (o ALB – *Aerial Lidar Bathymetry*) persigue medir la profundidad del fondo marino mediante la utilización de un láser aerotransportado, normalmente sobre aviones, helicópteros o UAVs. Algunos ejemplos son el Scanning Hydrographic Operational Airborne LIDAR Survey (SHOLAS), el Compact Hydrographic Airborne Rapid Total Survey (CHARTS), el Laser Airborne Depth Sounder (LADS), el Experimental Advanced Airborne Research LIDAR (EAARL) o el Hawk Eye II Airborne Laser Bathymetry and Topography System (ALBTS). Este último sistema consta de un láser topográfico en longitudes de onda de 1064 nm (infrarrojo) y que se utiliza para la medición altimétrica del suelo terrestre y un láser hidrográfico que opera a 532 nm (verde), que permite la medición del suelo sumergido. Ambos sensores trabajan simultáneamente con una frecuencia de pulsación de 4 kHz en batimetría y de 64 kHz en topografía [14].

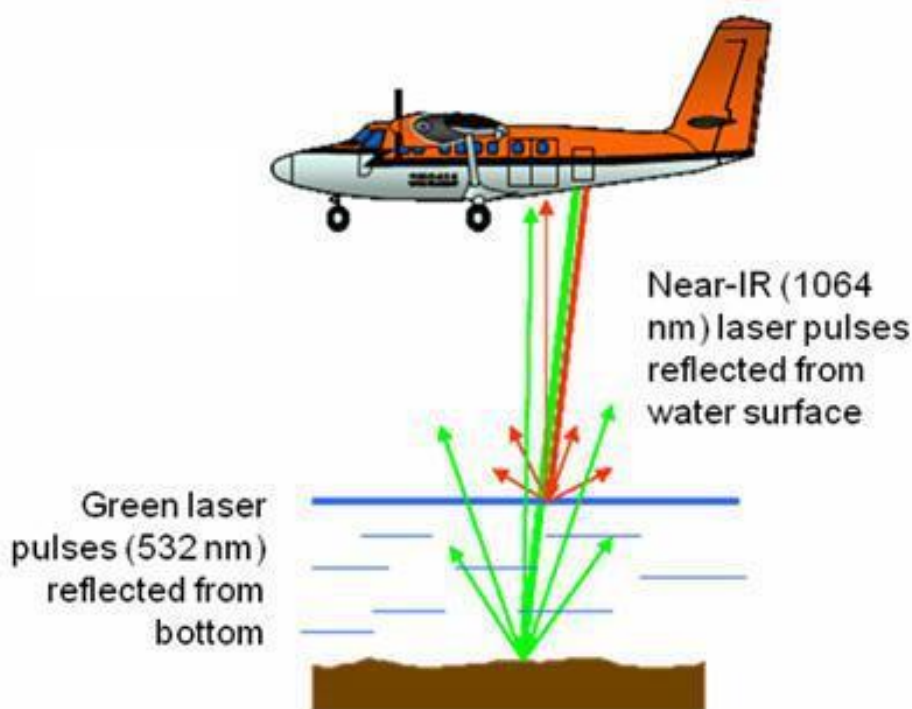


Figura 2-7 Lidar batimétrico [7]

El principio de funcionamiento de un *lidar* es similar al de los métodos acústicos: consiste en emitir pulsos de láser en cortos intervalos de tiempo sobre el área de estudio y recibir una señal reflejada. Estas señales emitidas presentan distintas frecuencias: unas trabajan en el rango de las ondas infrarrojas, que no son capaces de atravesar la superficie del mar, pero sí permiten establecer la elevación del terreno; otras son de luz verde, atraviesan el lecho marino y se propagan hasta el fondo, donde rebotan. Estos pulsos son captados por el láser escáner que mediante el tiempo que tarda en llegar la onda es capaz de saber la profundidad a la que se encuentra el fondo. Al poseer dos tipos de pulsos de diferente frecuencia, este sistema es capaz de realizar vuelos tierra-mar situando tanto las elevaciones en la parte costera-terrestre además de obtener datos de las distintas profundidades.

La implementación de la luz verde en los sistemas *lidar* es debido a que se quiere maximizar la profundidad a la que se quiere penetrar con el sistema. En el caso de que se utilizasen ondas con frecuencias más elevadas no serían favorables ya que serían absorbidas por el agua y se tienen ondas con frecuencias más pequeñas aparecerían problemas por la fuerte dispersión provocada por el agua y no tendría capacidad de penetración a esas profundidades.

Sus ventajas frente a otras tecnologías como el sónar son que la tecnología *lidar* es capaz de llegar a zonas de aguas poco profundas en las que las embarcaciones equipadas con los sistemas citados anteriormente no serían capaces de llegar, ya sea por su propio calado o por la morfología de la zona costera. Es por tanto el complemento perfecto para la batimetría de zonas de aguas muy someras (entorno 10m) de difícil acceso. En comparación con el radar, estos sistemas permiten un grado de detalle superior al trabajar desde la banda ultravioleta a la infrarroja [15].

Pese a ser una tecnología de implementación reciente, tiene una gran precisión, fiable y eficacia, aunque sigue en estudio y potenciando aspectos como serían la óptica y los distintos tipos de láser que están disponibles en el mercado [8]. Sin embargo, también tiene inconvenientes: las adquisiciones con sistemas *lidar* son muy costosas y están sujetas a imprecisiones en aguas turbias.

Este sistema también posee limitaciones al depender de las condiciones en las que se encuentre el agua de manera que tiene alcances que rondan entre los 2 m-50 m de profundidad dependiendo de la turbidez de la zona, material del fondo y el estado del mar. Por ello este sistema queda sobre todo aplicado a zonas costeras y ciencias que requieran datos con velocidad y próximos al litoral.

2.3.3 Batimetrías mediante procedimientos fotográficos

Las técnicas fotogramétricas que requieren que los rayos ópticos pasen a través de múltiples medios ópticos con diferentes índices de refracción se denominan "fotogrametría multimedia" en la literatura fotogramétrica. Esta denominación se originó en una época en la que el término "multimedia" era completamente desconocido en su significado contemporáneo como uso combinado de medios digitales como texto, imágenes, películas animación y audio. La fotogrametría multimedia se ve influida por la refracción de los rayos ópticos en la transición entre medios ópticos con diferentes índices de refracción, que pueden ser modelados por la Ley de Snell [16].

En el caso de la fotobatimetría, es una técnica que permite obtener modelos del fondo marino en zonas costeras a partir de imágenes estereoscópicas, siempre que la profundidad sea limitada (hasta 12 m) y la transparencia del agua sea suficiente (aguas con poca turbidez). El procedimiento consiste en estudiar las variaciones en el espectro visible de una serie de fotografías que se pueden obtener desde un aeroplano o un UAS con cámara de calidad media y un sistema de posicionamiento. La obtención de las fotografías se realiza con películas que permiten tener un alto grado de contraste monocromático para poder determinar las distintas profundidades. La transición aire-agua puede ser modelada sobre la base de la Ley de Snell. La mayoría de las implementaciones suponen que la superficie del agua es horizontal y plana, y que las olas en la superficie del agua provocan errores significativos.

Las imágenes se obtienen en diferentes condiciones de tiempo y durante un marco temporal que permite combinar las distintas variables (momento en el que se toma la foto, nubes, sedimentos, visibilidad etc.) y sacar una media para determinar las condiciones estables del fondo marino.

Todas las fotografías de la zona donde se han realizado los vuelos se digitalizan de manera que se solapan estadísticamente. El resultado es una imagen sintética que permite asociar claridad-profundidad. Y estas fotografías no solo proporcionan gran cantidad de información del fondo marino, sino también sobre diferentes puntos de acceso a la costa, puntos de desembarco, existencia de islas y arrecifes, etc. [17].

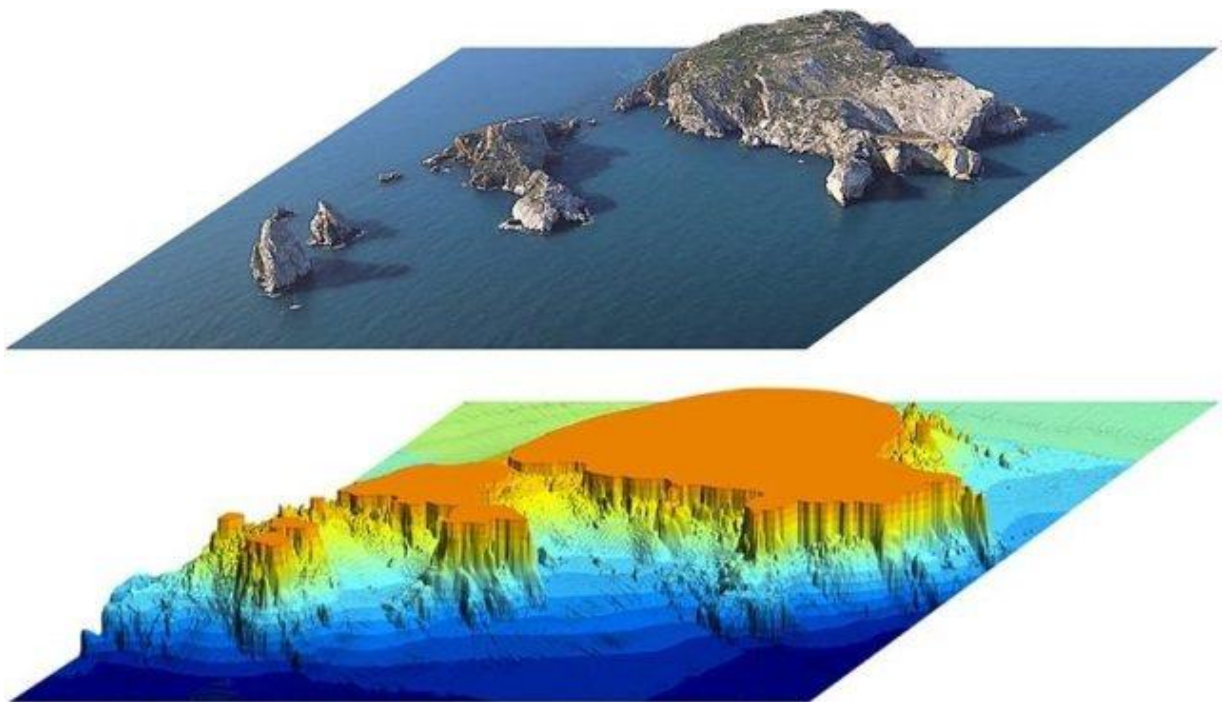


Figura 2-8 Levantamiento batimétrico mediante procedimientos fotográficos [18]

2.3.3.1 Aplicación de los UAV al ámbito de la batimetría

Cada vez es más usual ver la aplicación de los UAV para el cálculo de batimetrías. Y en muchos de los estudios revisados [19], la técnica que se utiliza para ello es la que se conoce como *Structure from Motion (SfM)*. Este procedimiento fotogramétrico trata conjuntos de imágenes desordenadas y heterogéneas para estimar modelos 3D sin conocimiento previo de los parámetros de la cámara. Sin embargo, el *SfM* tiene sus orígenes en el campo de la visión artificial y el desarrollo de los algoritmos automáticos de correlación automática de imágenes (CAI) y difiere fundamentalmente de la fotogrametría convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación y deformaciones de la misma se resuelven mediante cálculos computacionales. En geociencias, la producción de MDE de alta resolución es una de las principales aplicaciones de la fotogrametría *SfM* [20] [21].

Cuando un UAV que porta una cámara sobrevuela la superficie del agua, se capturan sucesivas imágenes superpuestas, y posteriormente, a través de la detección de características de los puntos de interés (*feature points*) con contraste o textura distintivos en las imágenes secuenciales, se extraen automáticamente y se emparejan solapándose entre sí [22]. Para encontrar la correspondencia entre imágenes, se utilizan detectores de características tan conocidos como SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform* o *Transformación de características invariantes de escala*) o SURF (*Speed-Up Robust Features* o *Funciones Robustas Aceleradas*). Cabe señalar que la principal barrera de cualquier levantamiento batimétrico preciso con cualquier técnica fotogramétrica consiste en corregir la refracción de la luz cuando atraviesa dos medios distintos (aire y agua, en este caso), lo que ocasiona profundidades de la columna de agua que parecen más pequeñas de lo que en realidad son.

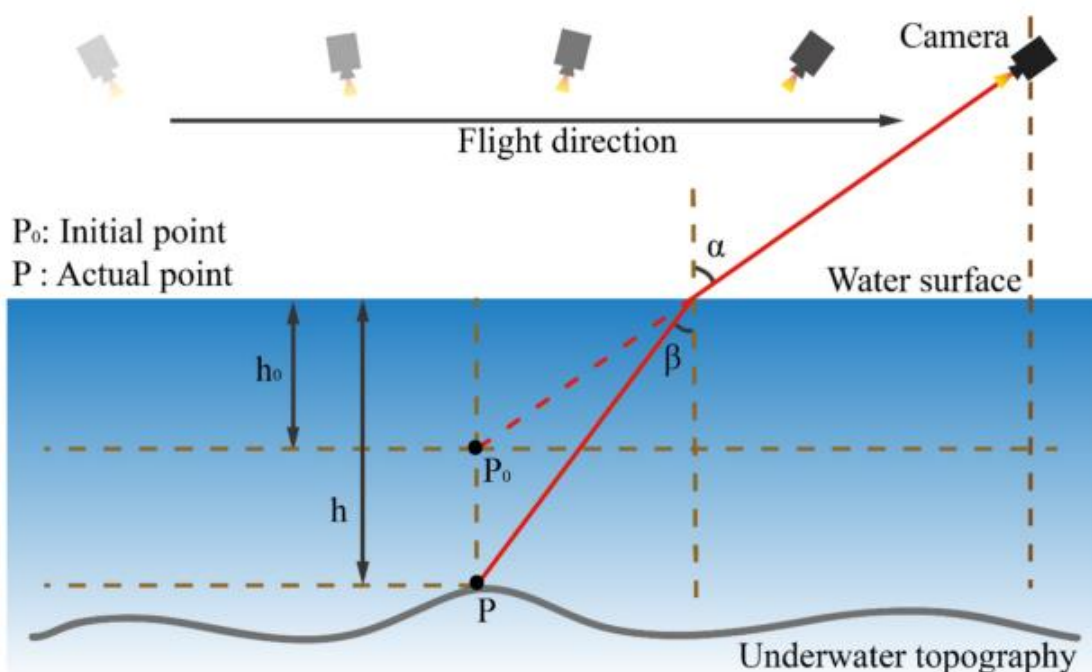


Figura 2-9 *Structure from Motion* y refracción de la luz en la interfaz del aire y el agua [22]

2.4 Batimetría mediante fotogrametría subacuática

A pesar de ser el medio acuático un entorno hostil, tanto para los seres humanos como para los sensores ópticos, la batimetría subacuática mediante fotogrametría puede ser factible en numerosas situaciones. En la actualidad, cada vez son más las aplicaciones en las que se pueden emplear esta

técnica. Esto se debe principalmente a las mejoras en los softwares de procesamiento de datos, así como a los avances técnicos que se implementan en los diferentes aparatos de buceo, los equipos fotográficos y los vehículos, tanto submarinos como de superficie, que pueden ser pilotados o con funcionamiento remoto.

La existencia de numerosos centros de buceo ha propiciado un mayor interés por el conocimiento sobre el medio subacuático. De hecho, este conocimiento general sobre la exploración y documentación subacuática ha crecido de manera exponencial en los últimos años y cada vez son más los usuarios que demandan soluciones de bajo coste, rápidas y sencillas de medición 3D.

Desde los inicios de la fotografía submarina, en la década de 1850 por el pionero William Bauer, se puso de manifiesto la necesidad de estudiar y modificar diversos parámetros al equipo fotográfico de cara a la obtención de fotografías subacuáticas.

Así, el conocimiento del equipo fotográfico y su comportamiento en diferentes condiciones es el primer paso que hay que investigar. Ya sea en aguas someras o profundas, la mayoría de las aplicaciones fotogramétricas subacuáticas tienen que enfrentarse a un entorno óptico difícil debido a los reflejos de las ondas del agua, la absorción de la luz y la turbidez. El agua es un medio completamente diferente del aire y la primera diferencia esencial reside en la densidad del medio. El agua de mar es casi 800 veces más densa que el aire, lo que influye en la formación de imágenes bajo el agua, ya que se altera la trayectoria de los rayos ópticos. A esto hay que añadir que la densidad del agua de mar no es constante a través de las distintas profundidades, siendo una función de la temperatura, la salinidad y la presión. Además, una menor claridad y menores puntos singulares bajo el agua, una iluminación cambiante, la presencia de algas o plancton y de partículas suspendidas en el agua que se mueven, convierten a esta técnica en un proceso más desafiante.

Asimismo, en el aire se puede conocer datos precisos de la posición a partir de un GPS que ayudan al software a ubicar cada imagen en el modelo. En cambio, bajo el agua, el sistema GPS no funciona por lo que, si la cámara se embarca en un sistema submarino, requerirá el uso de un equipamiento extra más costoso, como es el caso de los sistemas de posicionamiento acústico submarino – USBL (sistema de línea de base ultracorta), SBL (sistema de línea de base corta) o LBL (sistema de línea de base larga) – que se utilizan para rastrear vehículos submarinos.

A pesar de todos los factores limitantes mencionados, que dificultan al software fotogramétrico la orientación relativa de las imágenes, el principio de la fotogrametría subacuática es el mismo que el de la fotogrametría aérea o terrestre. Su objetivo es obtener un modelo tridimensional creado a partir de diferentes fotos de la superficie del fondo bajo el agua, tomadas desde diferentes puntos de vista. Estas imágenes pasan a ser procesadas por un software específico que busca puntos comunes entre ellas, de manera que a partir de estos puntos el programa calcula las distintas posiciones relativas de las imágenes y las posiciona en un eje de coordenadas tridimensional. Sin embargo, trabaja la mayor parte de las veces con distancias cercanas y muy cercanas, generalmente máximas del orden de unos pocos metros.

Uno de los ámbitos que más se ha visto beneficiado por el importante desarrollo de la fotogrametría, una mejora en la precisión y rapidez de la toma de datos y en el tratamiento informático posterior son las intervenciones arqueológicas subacuáticas, donde se encuentran varios trabajos que utilizan esta técnica [17] [23] [24]. Sin embargo, su ámbito de aplicación queda relegado, por el momento, a aguas poco profundas, ya que la profundidad es el principal factor limitante de este método [25] [26].



Figura 2-10 Fotogrametría aplicada al pecio de Bou Ferrer [26]

2.4.1 Fenómenos dependiendo del tipo de lente

La fotogrametría tiene una serie de limitaciones al estar trabajando en otro medio distinto del aire por ello se producen una serie de fenómenos que afectan a la captación de imágenes. Este tipo de técnicas se realizan con cámaras recubiertas de carcasas estancas que protegen la cámara de filtraciones de agua que puedan perjudicar el funcionamiento de este instrumento.

Se puede determinar que la carcasa de vidrio o plástico constituye la interfaz o frontera entre dos medios que serían el acuático y el aire, estos caracterizados por tener índices de refracción distintos, mayores para el agua al ser esta más densa que el agua. Esto provoca que los rayos de luz procedentes del objeto en el agua se desvíen de su trayectoria original al atravesar la interfaz y llegar al sensor de la cámara. En concreto, cada rayo se desvía tendiendo a acercarse hacia la normal de la superficie límite según la ley de Snell [27].

Este fenómeno provoca que se reduzca el campo de visión (FOV) de la cámara hacia el objetivo, véase Figura 2-11.

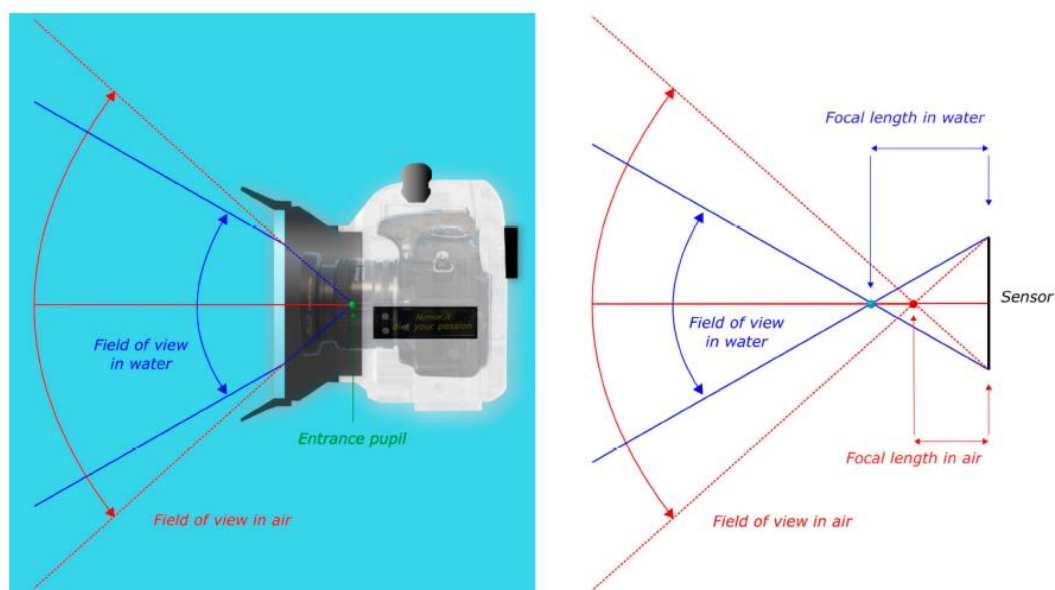


Figura 2-11 Efecto de una lente plana [16]

Se puede ver que, al contar con una superficie plana de carcasa, el campo de visión se estrecha y la distancia focal aumenta. Los rayos ópticos (en rojo) procedentes de la cámara al pasar a través de la interfaz plana se desvían aproximándose hacia la normal de la superficie plana, estrechando así el campo de visión. Este fenómeno puede considerarse como un aumento de la distancia focal nominal.

Este tipo de lentes planas poseen una serie de limitaciones de manera que acotan el campo de visión máximo. Un rayo de luz que entra en el campo de visión y atraviesa cruzando la interfaz de agua /aire por el vidrio está sometido a un índice de reflexión debido a que pasa de un medio con un índice de refracción mayor a otro con uno menor. Si se aplica la ley de Snell se puede calcular el ángulo crítico que lleva a un campo de visión máximo para cada lente plana (véase Figura 2-12) donde se puede ver que conforme aumenta el ángulo de entrada, el ángulo refractado se aleja de la normal hacia la superficie, en el momento que este ángulo coincida con el crítico, el rayo no entrará en la carcasa al estar sujeto a la reflexión interna total.

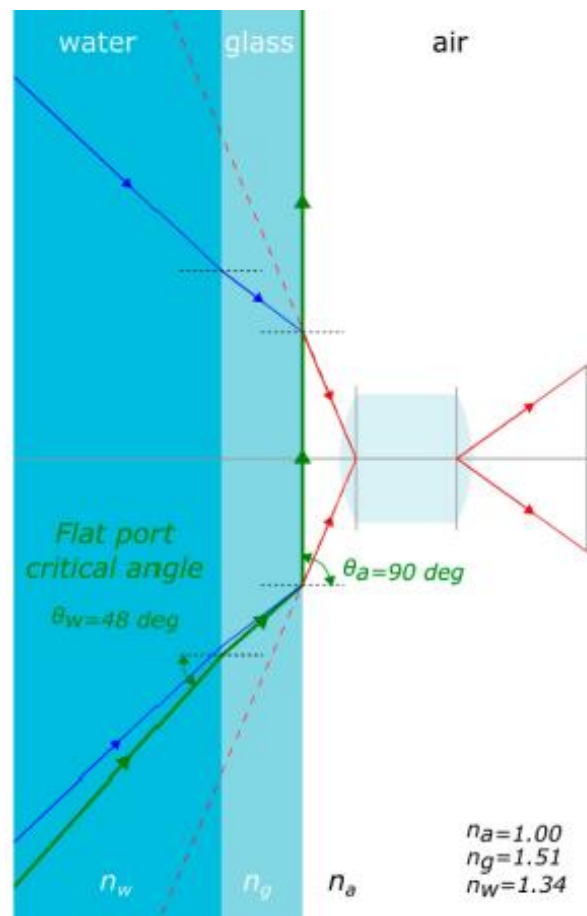


Figura 2-12 En un lente plano, el campo de visión máximo está limitado por la reflexión interna total [16]

Las lentes en forma de cúpula solucionan los problemas que aparecen con las lentes planas, pues con ellas se conserva el campo de visión y la distancia focal. Sin embargo, surgen otros impedimentos [27].

Entre otros, cuando utilizamos este tipo de lentes divergentes, tanto la distancia focal como la distancia a la imagen son negativas, de modo que se forma una imagen que se llama virtual y es más pequeña que el objeto, de manera que los sensores que se encuentran tras la cúpula no enfocarán el objeto real sino la imagen virtual, que se encuentra a una distancia menor que el propio objeto (Figura 2-13).

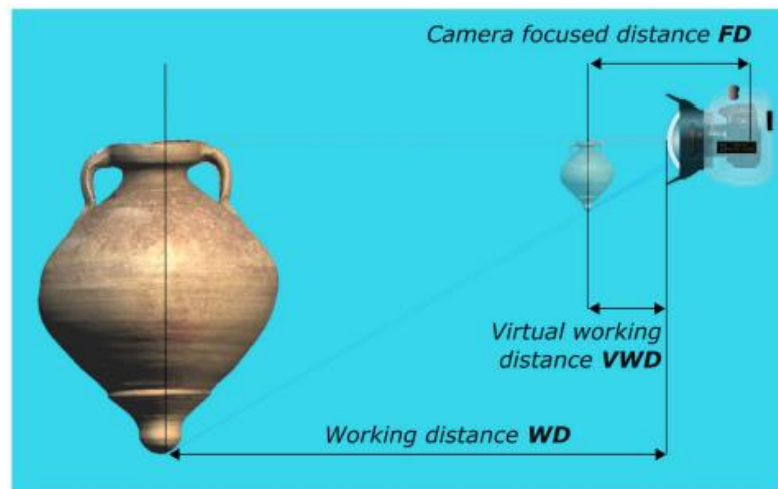


Figura 2-13 Efectos de la lente tipo cúpula [16]

Además, con estas lentes, aquellos rayos de luz que atraviesan por la zona periférica no convergen en el mismo punto que lo hacen los otros rayos de luz que atraviesan por la zona central. El resultado de este fenómeno es que no hay un único plano de imagen y se puede producir una imagen borrosa.

Otro efecto no deseable con este tipo de lentes de cúpula es que los objetos planos se proyectan en una superficie parabólica conocida como superficie de Petzval, véase Figura 2-14. El resultado de esto es que el objeto puede que no aparezca completamente enfocado o uniformemente nítido en toda la imagen.

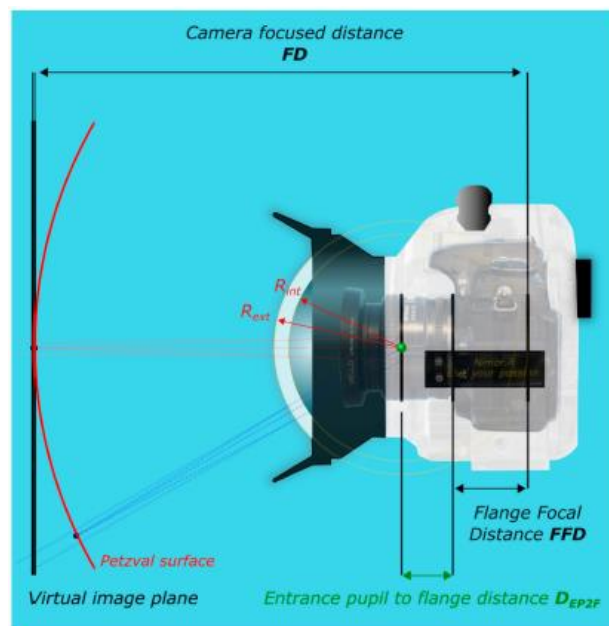


Figura 2-14 Proyectoado de la superficie de Petzval [16]

Un objetivo es un sistema compuesto por muchas lentes a través de las cuales el haz de rayos que entra en el objetivo converge y diverge a su paso. La cantidad de rayos que entran en el objetivo se controla mediante un diafragma conocido como tope de apertura. La pupila de entrada representa el centro de perspectiva del objetivo y puede verse como la imagen virtual del agujero materializado por el diafragma visto desde la parte frontal de la lente. La cámara GoPro Hero (hasta la versión 2) sufría de imágenes desenfocadas cuando se colocaba bajo el agua debido al pequeño radio de su puerto de cúpula y la imposibilidad de enfocar la imagen virtual debido al enfoque fijo. Esto era un gran problema para una cámara tan compacta, por lo que en las posteriores versiones se adoptó un puerto plano, reduciendo así el campo de visión.

2.4.2 Vehículos de Superficie No Tripulados (USV)

Los vehículos de superficie no tripulados (*USV* o *Unmanned Surface Vehicles*), también llamados *ASC* (*Autonomous Surface Craft*), son embarcaciones que operan en la superficie marítima de manera autónoma, sin una dotación que los controle físicamente. Estas embarcaciones no tripuladas son controladas por operarios tanto de manera remota desde tierra u otra embarcación a distancia.

Los *USV* son cada vez más utilizados por oceanógrafos con funciones similares a las de una boya meteorológica pero mucho más económicos y con capacidad de movimiento. Este tipo de embarcaciones se utilizan para realizar batimetrías, levantamientos hidrográficos y mapeado del fondo marino. Estos sistemas remotos son utilizados por biólogos para el seguimiento de grandes mamíferos para su estudio, así como por arqueólogos para el estudio de pecios y hallazgos que se encuentren en el fondo del océano [28].

En el ámbito de la defensa este tipo de vehículos han sido uno de los recursos que más se ha venido potenciando en los últimos años. En cuanto a los cometidos que se les asignan a estos drones están las labores de vigilancia y apoyo, apoyo logístico a zonas de operaciones, lucha contra el terrorismo y piratería, como sistema complementario de localización para rescate marítimo y blancos en movimiento para ejercicios de adiestramiento.

En cuanto a las ventajas y características funcionales que pueden aportar estos sistemas frente a los drones convencionales o *UAV* cabe destacar:

- Los *USV* cuentan con más autonomía que el resto de los drones, llegando a ser de varias horas en algunos prototipos. Si se compara esta característica frente a los *UAV* convencionales, que de media pueden aguantar 20 min, los *USV* pueden estar operando un promedio de 8 horas. Destaca además su capacidad para ser alimentados mediante las energías mareomotriz y solar, ya que, al estar equipados con placas fotoeléctricas, les da una autonomía prácticamente ilimitada a estos sistemas.
- Tienen gran capacidad de carga frente a los *UAV*, cuya restricción de carga es de unos 25 kg para el despegue. Los *USV* poseen una normativa más laxa en este sentido permitiendo que se equipen con mayor número de sensores, cámaras, electrónica, etc. y limitados solamente por el diseño que tenga cada aparato.
- La capacidad de operar en cualquier tipo de aguas sin limitación alguna, solamente de las capacidades que posee este según su tamaño, forma y diseño. Una característica destacable de cara a este trabajo de investigación es que son sistemas sigilosos, altamente maniobrables y rápidos, cualidades esenciales para un ambiente hostil y de riesgo para el ser humano [29].

2.4.2.1 Aplicación de los *USV* al ámbito de la batimetría

Los drones han supuesto en la actualidad un gran avance en muchas ciencias dentro de nuestra sociedad, y han conseguido desempeñar una serie de cometidos que facilitan y ahorran trabajo en muchas investigaciones. Por ejemplo, en el campo de la topografía, los drones son capaces de realizar en un solo día, trabajos que consumirían un gran periodo de tiempo, siendo capaces de obtener información de un gran número de hectáreas [30]. Con estos sistemas se han conseguido muchas ventajas para la topografía de manera que:

1. Aumentan la productividad y disminuyen el coste que supondría cubrir una superficie del terreno.
2. Acceso instantáneo a los datos obtenidos por el drone.
3. Se tiene una precisión al milímetro de las zonas cubiertas por estos sistemas.
4. Reducción del tiempo para el levantamiento topográfico de manera exponencial.

5. Variedad en los productos obtenidos, desde ortofotos, modelos digitales el terreno, mapas topográficos etc.

En el ámbito de la batimetría, su uso estará determinado por factores como la profundidad de la zona que se quiere estudiar, así como la cantidad de sedimentos que pueden aparecer o la visibilidad del agua en la zona. La batimetría mediante el uso de un *USV* optimiza mucho el proceso de toma de datos, de manera que es capaz de llegar a zonas donde al humano le sería imposible llegar debido a su orografía o al riesgo que supondría acceder a esa zona del terreno. Estos sistemas dan la capacidad de obtener información de la zona de manera remota, precisa y continua, ver Figura 2-15.

Las ventajas de utilización de estos sistemas en las batimetrías son muchas; además de las comentadas anteriormente, se cuenta con otras como la facilidad de botadura de los drones desde cualquier orilla, la optimización del tiempo y su alta maniobrabilidad.

El levantamiento batimétrico consta de dos partes: una primera en la que se sitúa el *USV* mediante sistemas de posicionamiento y una segunda en la que se realizan las mediciones necesarias del fondo.

El uso del *USV* es cada vez más usual en el ámbito de la topografía; además, esta plataforma es compatible con los diferentes medios batimétricos para realizar un levantamiento hidrográfico citados anteriormente. Toda esta tecnología es muy usada también en el ámbito de las obras marítimas, dragado de ríos, instalación de tuberías submarinas y perforaciones [31].



Figura 2-15 Apache 6 CHCNAV [32]

2.4.2.2 Partes de un USV

Los *USV* que son utilizados para las batimetrías suelen tener una estructura común partiendo de un casco de fibra de carbono, siendo así portables por el usuario y con poco peso. Muchos prototipos usan un casco similar al de un trimarán, con un casco principal y dos estabilizadores a ambos lados de este, lo que proporciona una mayor estabilidad a la hora de realizar batimetrías y una mejor maniobrabilidad con oleaje en la mar.

En cuanto a los distintos sensores que puede llevar el dron se encuentran los siguientes:

- Sensores meteorológicos: estos pueden ser desde anemómetros para la determinación de la velocidad y dirección de este, termómetros incorporados que indican la variación de la temperatura en el ambiente, humedad y la presión mediante el uso de barómetros.
- Sensores de agua o marinos: en los que el dron es capaz de obtener información adicional de la zona donde está trabajando, como la salinidad, el pH u oxígeno que posee el agua.
- Un ecosonda multihaz, que emite ondas de sonido para obtener datos del fondo marino. En particular, este tipo de *sonar* posee un sensor que mide la velocidad del sonido en el agua, de manera que provoca que las mediciones sean más precisas. Tiene además un sensor que emite estas ondas de sonido y suele estar equipado con un receptor curvo capaz de tener mayor recepción de las distintas ondas de sonido [32].
- Otras tecnologías complementarias, como pueden ser un sistema para mantener la dirección y un rumbo constante pese a las condiciones de la mar; un sistema *lidar* de manera que con una sola pasada es capaz de hacer un levantamiento 3D preciso tanto del fondo marino (ecosonda) y de la costa que lo rodea (*lidar*) de manera que se ahorra tiempo de procesamiento significativo al realizar ambos levantamientos - topográfico y batimétrico - de manera simultánea.

2.4.2.3 Empleo de los USV en las Fuerzas Armadas

En el territorio nacional el empleo de drones está menos desarrollado en comparación con otros países. Sin embargo, cada vez son más la cantidad de propuestas que posee la Armada Española de numerosas empresas para implementar diferentes tipos de *USV*.

Uno de los proyectos destacados es el *DEFENSOR*, desarrollado por la empresa “Breogán Ingeniería S.L.”. Se trata de un vehículo multipropósito con cometidos de misiones de vigilancia, obtención de información y defensa. Este sistema tiene distintos modelos como el *DEFENSOR I*, para realizar misiones de vigilancia y observación del entorno marítimo; o el *DEFENSOR II*, que es una mejora del modelo anterior, portando armamento ligero orientado a operaciones de defensa y protección. Este *USV* (véase Figura 2-16) posee un modelo SAR para la búsqueda de personal en la mar [33].



Figura 2-16 *DEFENSOR II* [34]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Equipos empleados

Para el levantamiento batimétrico se utilizarán un *USV* de bajo coste y una cámara sumergible para la toma de imágenes, acoplada al mismo. Una vez elegida la cámara y el *USV* se realizaron pruebas de manera independiente para confirmar que ambos sistemas eran viables de manera individual antes de su acople. En el caso de que no fuesen capaces de desempeñar las funciones necesarias para la fotogrametría, se habrían sustituido por otros medios.

En relación con la cámara, se realizaron pruebas tanto en condiciones ideales (pruebas en piscina) como en un entorno realista, donde se vería afectada por la falta de visibilidad, luminosidad y estabilidad. Esta primera fase de toma de fotografías se realizó de manera manual con personal a nado desde la superficie del mar. Una vez realizada la captura de imágenes fueron procesadas en el programa de fotogrametría con la finalidad de analizar la viabilidad de este sistema para nuestro modelado final.

En el caso del *USV* se realizaron pruebas de flotabilidad, estabilización y navegabilidad en los dos escenarios reseñados anteriormente. Hay que destacar que se realizaron modificaciones en el equilibrado del mismo a modo de corrección en la trayectoria ya que tenía tendencia a caer a babor. En las pruebas de mar se obtuvo una idea de la estabilidad que es posible alcanzar con este dispositivo para la toma de fotos, concluyendo que permitiría ser una plataforma bastante estable para realizar la captura de las distintas imágenes.

De esta manera se confirmó que ambos sistemas eran viables por lo que se procede a su acople en la parte posterior de la quilla del *USV*. Esta fue la posición inicial de la cámara, debido a que no afectaba a la flotabilidad del dispositivo y ofrecía un ángulo de la cámara de 45°, beneficioso para la toma de las fotografías, ya que se conseguía observar mayor profundidad en las imágenes y facilitaba encontrar puntos de solape, véase la Figura 3-1. Sin embargo, tras una serie de fallos en la señal GPS, que se explicarán más en profundidad en el punto 3.2.2. *Sincronización de la señal GPS*, se decidió resituar la cámara en la parte posterior del *USV*, concretamente en el espejo de popa.



Figura 3-1 Acople inicial de la cámara al USV [Elaboración propia]

3.1.1 USV

El USV utilizado será una lancha radio control de bajo coste, en concreto el JABO-2AL (ver Figura 3-2). Se trata de una embarcación teledirigida orientada en un principio para la pesca recreativa y para portar cebo para peces en su parte posterior.

Es necesario reseñar que este modelo no cuenta con sonar de pesca, pues esta función solo la posee el modelo JABO-2BL. Este sistema de 615 mm de eslora y de 265 mm de manga (Figura 3-2) está propulsado por dos motores eléctricos conectados a dos turbinas y alimentado a su vez por una batería recargable que le da una autonomía de hasta unas cinco horas. Tiene una velocidad máxima de tres nudos y posee a su vez un volquete utilizado para llevar cebo de pesca. El control se efectúa mediante un mando a distancia que emite a 27 MHz, sin ser capaz de dar marcha atrás [35]. Cuenta con una antena receptora y un foco en la parte superior del mismo.



Figura 3-2 USV utilizado para el levantamiento batimétrico [Elaboración propia]

Dimensiones	620x263x180mm
Peso	2,6 kg
Fuente de alimentación	Batería de Litio Recargable 10ª, 5-3 h de autonomía
Velocidad	1.54 m/s
Distancia de control	Max 300 m
Capacidad Tolva de Cebo	1kg
Sistema de alimentación	Motores dobles 380

Tabla 3-1 Prestaciones del JABO 2AL USV

3.1.2 GoPro HERO 5

La cámara utilizada es una *GoPro HERO 5 Black Edition* (Figura 3-3). Esta cámara de acción permite al usuario trabajar en distintos ambientes y con ella se consigue también una gran calidad de imagen en un sistema compacto. Cabe destacar que esta cámara deportiva es una de las mejores del mercado hasta el año 2018 con un gran avance en video y la capacidad de ser sumergible hasta los 10 m sin carcasa, ventaja principal para este proyecto.

Conviene mencionar la incorporación en este modelo de un sistema *GPS*, que facilita las posiciones por coordenadas donde se han realizado las diferentes fotografías, así como de la capacidad de estabilización de la imagen y la amplitud del *FOV (Field Of View)*. Desafortunadamente, cabe destacar también que este *GPS* tiene la limitación de que solo puede sumergirse hasta una profundidad de 15 cm para no perder la señal.



Figura 3-3 GoPro Hero 5 Black Edition: cámara utilizada para la experimentación [36]

Esta cámara posee distintos modos de trabajo (foto secuencial, video, ráfaga, foto etc.). En el caso de esta investigación se ha realizado la toma de imágenes en modo foto secuencial de manera que se soluciona el problema de tener que acoplarle un disparador a la cámara. En concreto se ha programado la *GoPro* para que realice una foto cada segundo con un *FOV* amplio para intentar alcanzar la máxima amplitud en la captura de imágenes. El *FOV* tan amplio que posee la cámara es uno de los elementos más determinantes para la toma de imágenes durante el presente estudio.

A continuación, se anexa un cuadro con las características en detalle de la cámara empleada.

Sensor	Sony 12MPx
Angulo de Lente	170°
Dimensiones	62x44,6x33,7mm
Peso	117 gramos
Batería	1220mA
Video	4K a 30fps nativo 1080p a 120fps
Otros	Pantalla Táctil Wifi Capacidad Sumergible hasta 10 m Bluetooth GPS Control por voz

Tabla 3-2 Prestaciones de la cámara *GoPro Hero 5 Black Edition*

3.2 Trabajo de campo

3.2.1 Identificación de las zonas de estudio

Los levantamientos batimétricos se van a realizar en dos zonas determinadas, de manera que una vez superadas las condiciones de la primera se pasarían a realizar las mediciones en la segunda. Esta segunda zona fue seleccionada por su cercanía a la Escuela Naval Militar (ENM), pero a su vez más realista con respecto al modelo batimétrico. Con ello se pretende recrear una simulación de un estudio previo que se realice en una playa en la fase de preparación antes de una operación anfibia. A continuación, se determinará con un mayor grado de detalle cada lugar de estudio.

- **Zona de Pruebas I:** La primera captura de imágenes se ha realizado en la piscina de la Escuela Naval Militar (Figura 3-4). Se ha decidido ensayar en este lugar ya que reúne, *a priori*, unas condiciones ideales de navegación ya que la climatología no tiene efecto y se trabaja en un ambiente controlado en el caso de que suceda algún imprevisto durante el periodo de adquisición.



Figura 3-4 Zona de Pruebas I: Piscina de la ENM [Elaboración propia]

- **Zona de Pruebas II:** Situada en el sector Noroeste de la ENM, delimitada por el baluarte de la zona industrial haciendo esquina con el CASI (Centro de Adiestramiento de Seguridad Interior), ver Figura 3-5. La elección de esta zona se debe a que es un lugar ideal que está compuesto por una gran cantidad de formaciones rocosas, a su vez se forma una pequeña playa pegada a la zona del muro y las profundidades de la zona se corresponden con aguas someras, que es el criterio principal que debe respetar este estudio.



Figura 3-5 Zona de Pruebas II: zona industrial de la ENM [Elaboración propia]

En esta área es posible simular lo que podría ser el estudio previo para realizar en cualquier zona litoral previo a un desembarco, para a partir de las diferencias de cotas, realizar un mapa batimétrico. Las dimensiones de nuestra zona de estudio son de 190 x 260 m de manera que queda limitada en un cuadrante como se puede apreciar en la Figura 3-6.

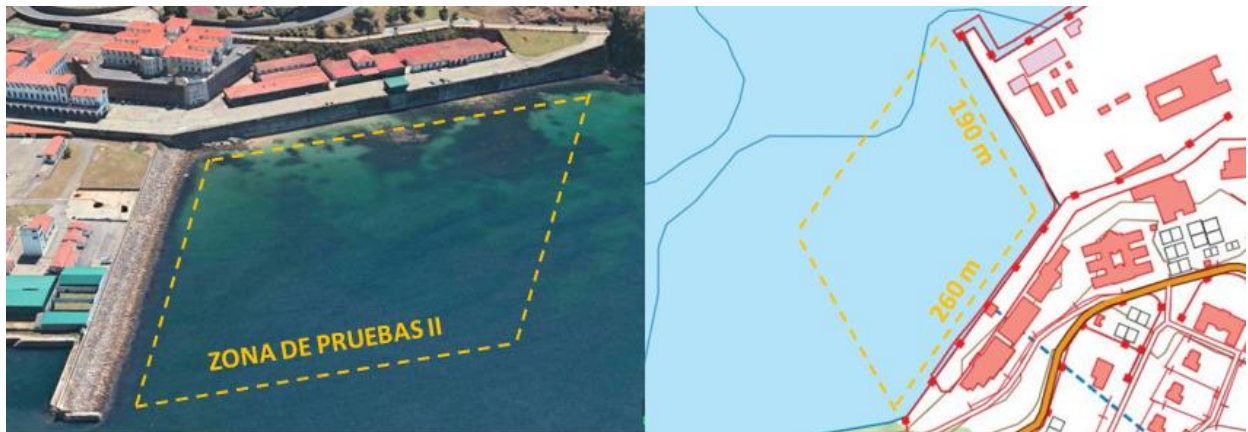


Figura 3-6 Localización y dimensionamiento de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

3.2.2 Sincronización de la señal GPS

Para realizar la toma de mediciones primero se tiene que sintonizar la cámara con la señal GPS de manera que cuando ésta realice las fotografías sea capaz de geolocalizarlas. La cámara, como se ha indicado en el apartado anterior, posee GPS incorporado de modo que cuando realiza la captura de imágenes en modo automático introduce en el archivo EXIF de cada imagen datos de la localización donde han sido tomadas. El archivo EXIF es aquel que contiene los metadatos de las distintas imágenes que de manera automática asocia la *GoPro* con las imágenes generadas. Estos archivos cuentan con una gran variedad de información desde el momento en el que se toma la imagen, GPS, características fundamentales de la cámara, dimensiones etc.

Hay que señalar que en un principio se tiene que situar la cámara en un punto que se encuentre en el exterior alejado de estructuras y en una zona libre de masas cubridoras. Se activa en las configuraciones de la cámara la capacidad de GPS y una vez capte la señal aparecerá en la esquina superior izquierda con un símbolo blanco (ver Figura 3-7), de modo que cuanto más tiempo se encuentre sintonizando con la señal, más precisa será la ubicación de la imagen.



Figura 3-7 Señal GPS de la *GoPro* en modo foto secuencial [Elaboración propia]

Es conveniente anotar que a la hora de realizar la captura de imágenes de la Zona de Pruebas I, el GPS no funcionó durante las mediciones debido a que esta se encontraba cubierta dentro de un polideportivo. En concreto, la señal en esta zona era muy débil por lo que solo fue capaz de geolocalizar algunas imágenes, lo que sirvió como referencia para orientar las demás.

Tras realizar pruebas en la mar se llegó a la conclusión de que la cámara perdía la señal una vez se encontraba a una profundidad mayor a 15 cm. Este motivo trajo como consecuencia una nueva ubicación para la cámara en la embarcación, pasando a estar situada en la zona del espejo de popa. Esta ubicación era ideal ya que las turbinas no generaban distorsión en las imágenes obtenidas y la señal GPS era más potente en esta zona al ir la cámara en el límite de la superficie del mar.

3.2.3 Proceso de toma de imágenes

Los modelos derivados de la fotogrametría subacuática, que es la técnica empleada para realizar el levantamiento batimétrico de ambas zonas de estudio, dependen fuertemente de la calidad de la toma de imágenes, por lo que esta parte del proceso se considera fundamental para obtener un buen resultado. Asimismo, al ser un procedimiento que está muy ligado a las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio, la meteorología tiene también un protagonismo determinante en esta parte del desarrollo para obtener una buena captura de imágenes.

Para este estudio, el proceso de toma de imágenes se ha llevado a cabo en dos pasos, como bien se explicaba en puntos anteriores. En una primera fase, la toma de fotografías se ha realizado de manera manual para determinar si las capacidades de la cámara eran óptimas para la fotogrametría; y en un segundo lugar, el levantamiento se ejecutó con la ayuda del USV, ofreciendo una mayor precisión a la hora de capturar las imágenes. A su vez, al repetir este proceso en ambas zonas de pruebas se obtienen mejoras durante la adquisición de las imágenes y se identifican las dificultades de cada una de las fases de este estudio.

- **Zona de Pruebas I:** Las condiciones para realizar la toma de imágenes eran ideales ya que era un espacio cerrado sin verse afectado por las condiciones meteorológicas ni del terreno. Es preciso señalar que las condiciones de luminosidad eran perfectas al estar iluminada toda la zona con focos de gran potencia, ver Figura 3-8.



Figura 3-8 Proceso de toma de imágenes en la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

La captura de fotografías en esta área se llevó a cabo en dos pasadas, ver Figura 3-9. Una primera se realizó en sentido longitudinal y una segunda en sentido transversal a la piscina.

De esta manera se tienen dos ángulos diferentes de visión lo que permite al software de fotogrametría encontrar un mayor solape. Se fotografiaron un total de 668 fotografías de esta zona.

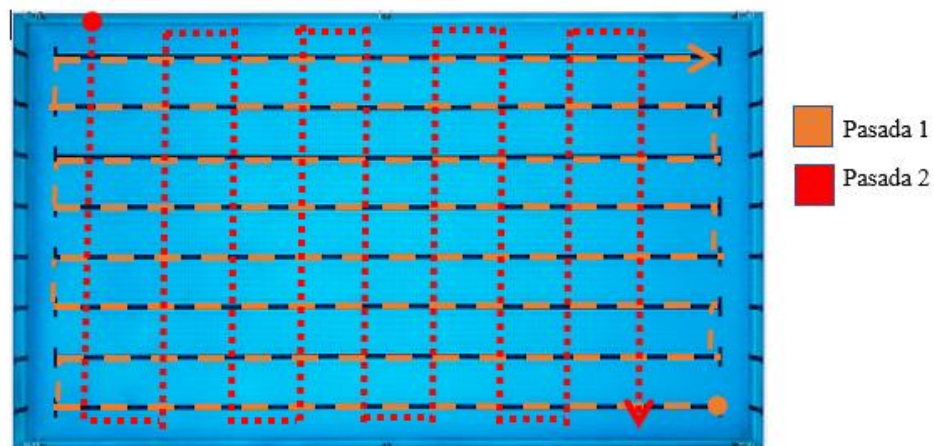


Figura 3-9 Plan de captura de las imágenes en la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

- **Zona de Pruebas II:** La dificultad en la toma de fotografías aumentó debido a la corriente y al oleaje que afectaba negativamente a la estabilidad del USV. Además, es necesario comentar que la captura de las imágenes se tuvo que realizar en días diferentes debido a la escasa luminosidad y visibilidad que presentaba el mar en una primera toma, lo que dificultaba bastante la generación del modelado de la zona. En cuanto a las batidas realizadas para cubrir esta zona, se siguió la planificación recogida en la Figura 3-10. De esta manera se consigue un gran solape entre imágenes. Se tomaron finalmente un total de 914 fotografías para su posterior procesamiento.



Figura 3-10 Plan de captura de imágenes en la Zona de pruebas II [Elaboración propia]

3.3 Procesamiento Fotogramétrico SfM

El funcionamiento de los softwares fotogramétricos ha evolucionado a lo largo de los años aumentando su complejidad. En sus orígenes se basaban en modelos estereográficos, generados a partir de dos imágenes tomadas desde diferentes puntos de vista. En los últimos años se ha tendido a evolucionar en la toma de imágenes desde diferentes puntos de visión para reconocer puntos homólogos y modelar el terreno, ver Figura 3-11. Para un mismo punto que se quiera procesar se tiene que realizar como mínimo dos fotografías desde puntos de vista diferentes de manera que se intersequen. Por regla general, cuantas más imágenes se empleen en la reconstrucción del modelo, más preciso será este. Sin embargo, se tiene que puntualizar que un exceso de fotografías de una zona con aspecto similar puede producir un resultado impreciso [37].

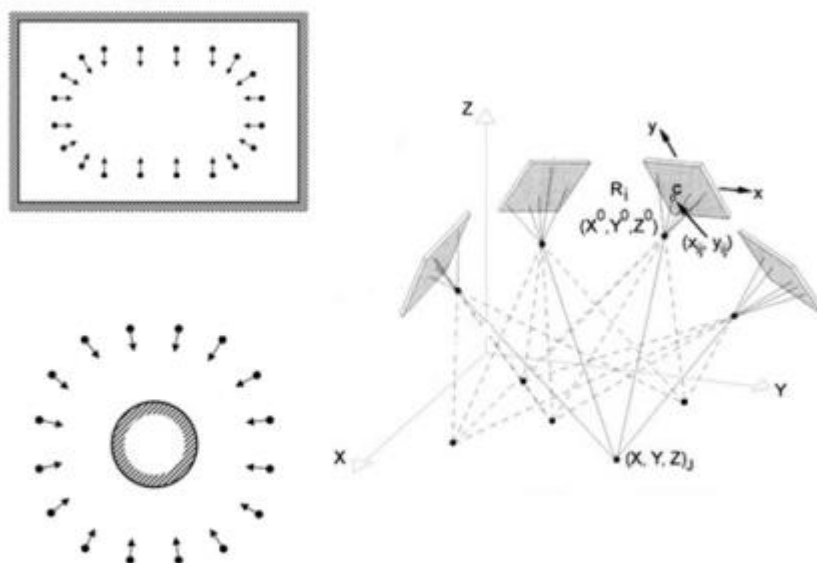


Figura 3-11 Tomas fotográficas desde distintos puntos de vista [37]

Para el procesamiento fotogramétrico existen muchos softwares diferentes, pero para esta investigación se ha empleado el programa *Agisoft Metashape 1.8.2 Professional Edition*. Este sistema es una herramienta integral que permite realizar todos los pasos requeridos de la fotogrametría e ir generando los distintos resultados a partir de la toma de una serie de imágenes.

Se trata de un programa potente, de fácil utilización para el usuario gracias a una interfaz amigable con un flujo de trabajo intuitivo. Esta herramienta es capaz de realizar correcciones de manera automática a las deformaciones y distorsiones que puedan existir en las imágenes del objeto a estudiar. Además, con esta aplicación no se requiere una calibración previa de la cámara antes de su uso, por lo que se puede emplear cualquier plataforma. Los resultados generados son muy precisos con un gran grado de detalle, siempre y cuando las imágenes tengan una calidad suficiente.

3.3.1 Ajustes y orientación fotográficas

El primer paso de cualquier proceso fotogramétrico consiste en buscar la orientación de las fotografías, siendo este el punto crítico y más problemático de la fotogrametría. Este proceso es el denominado orientación relativa o “*matching*”, el programa realiza esta alineación mediante una serie de algoritmos matemáticos internos. En este punto se tienen que detectar y solapar miles de puntos característicos de cada imagen de manera precisa. Cuando son detectados, se correlacionan entre sí con

los homólogos de las imágenes, determinando la posición y orientación de las cámaras con respecto a las demás [38].

Por eso, es interesante destacar que si se conocen las coordenadas desde donde se han realizado las diferentes fotografías, se facilita al programa este proceso, al existir ya unas posiciones estimadas de las cámaras. Por eso, el principal problema en la Zona de Pruebas I fue que no había cobertura GPS suficiente al encontrarse en el interior del polideportivo por lo que la orientación de las fotografías se ha realizado por puntos homólogos entre imágenes.

Para realizar este primer paso, se insertan las imágenes que se han tomado de las distintas zonas, de modo que cuanto mayor calidad y resolución tengan las fotografías, más se acelera el proceso. Una vez que han sido importadas todas las imágenes en el *Agisoft Metashape* se procede a su orientación. Desde la zona de *Flujo de trabajo* de la interfaz del programa se selecciona *Orientar fotos*. En este momento aparece un menú desplegable con diferentes campos para seleccionar los distintos parámetros de orientación de las imágenes. El primero hace referencia a la precisión de la alineación de imágenes, donde se tienen cinco opciones o niveles: *Máxima*, *Alta*, *Media*, *Baja* y *Mínima*. Todos ellos están relacionados con el tiempo de procesado de las imágenes, siendo los valores más bajos de precisión los que permiten generar estimados de las posiciones de las cámaras en tiempos más reducidos. En un segundo punto se encuentra el tipo de orientación que se quiere llevar a cabo: *Estimado*, *Secuencial* y *Origen*. La selección de un modo u otro dependerá de cómo se han tomado las imágenes. Por último, el usuario también debe decidir una serie de opciones avanzadas como, por ejemplo, el número de puntos de paso por foto o el número de puntos clave por foto, o incluso si se quiere poner algún límite de puntos por píxel. Una vez que han sido definidos estos parámetros, comenzaría el proceso de orientación, ver Figura 3-12.

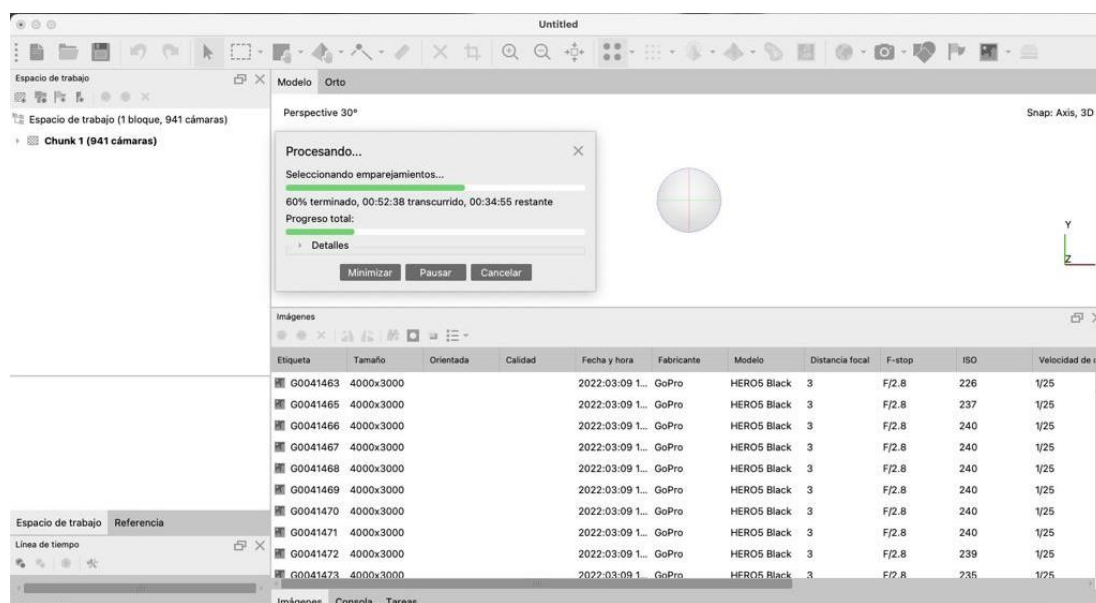


Figura 3-12 Proceso de orientación de fotografías mediante *Agisoft Metashape* [Elaboración propia]

Durante este proceso, se puede dar el caso de que haya algunas imágenes que no se han orientado N/A. Se seleccionan estas imágenes y se repite el proceso de alineación de imágenes. En este caso se selecciona el modo de orientación *Estimado* ya que de esta manera el software busca puntos homólogos con las imágenes que se encuentran ya orientadas, facilitando así su solape.

Hay que recordar también que con este sistema no se tienen que introducir los parámetros de orientación de la cámara por el usuario para la orientación interna, ya que estos datos los obtiene el sistema directamente del archivo EXIF asociado a cada una de las fotografías, siendo esta una de las grandes ventajas del uso de esta aplicación.

3.3.2 Generación de la nube de puntos densa

Una vez se ha realizado la orientación de las distintas cámaras y su posición, se realiza una intersección de trayectorias en profundidad de cada cámara dando como resultado un punto denso. Se genera de esta manera la nube de puntos densa constituida por miles de puntos 3D, que son muy similares en forma a los distintos modelos originales [39].

Al igual que en el proceso anterior desde el desplegable de *Flujo de trabajo* se selecciona el paso de *Crear nube de puntos densa*. En este punto aparece una ventana en la que se determinan los distintos parámetros para crear esta nube de puntos densa. En primer lugar, se tiene que determinar la resolución del modelo; este punto es clave a la hora de generar nubes de puntos y mallas 3D. Se tienen distintos modos que abarcan desde calidad *Máxima* hasta *Mínima*. Esta calidad aumentará de manera exponencial el tiempo de procesado. Para este trabajo, se ha decidido adoptar una calidad *media*, como solución de compromiso entre calidad y tiempo de procesado. También existen una serie de ajustes avanzados en los que se determina el nivel de filtrado que se quiere realizar de la nube de puntos dispersa, ver Figura 3-13.

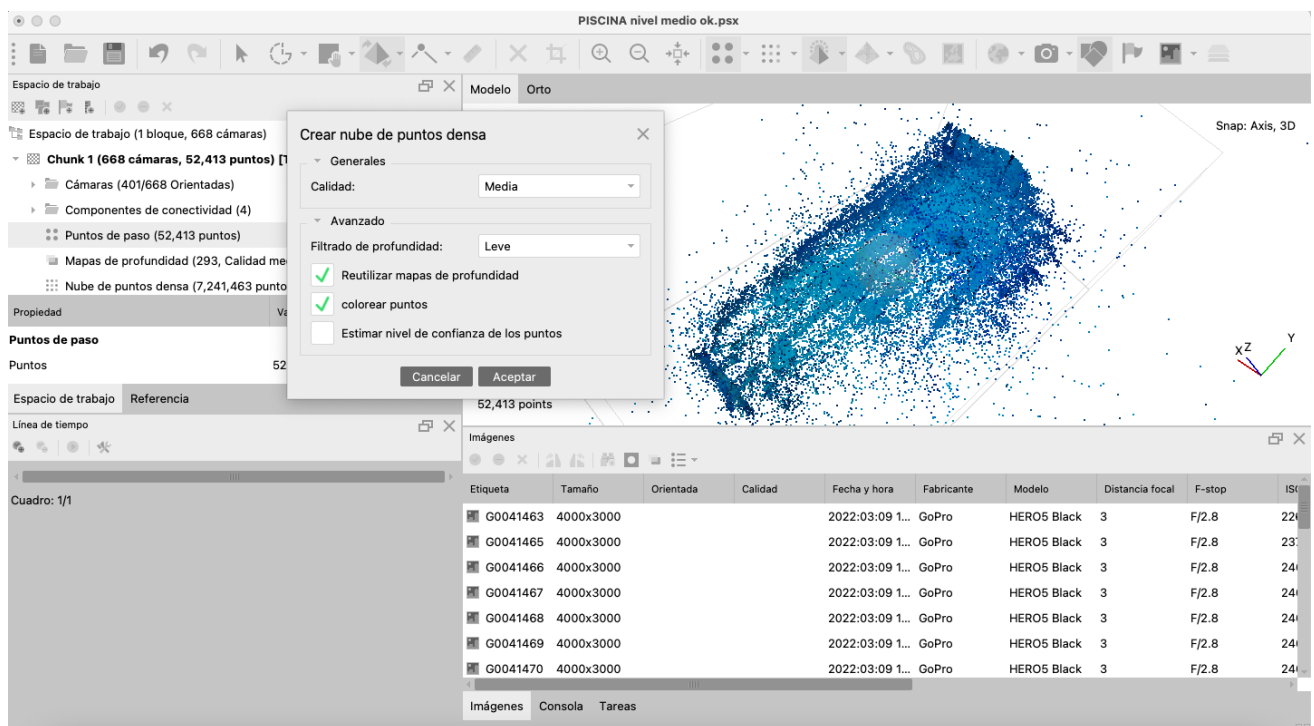


Figura 3-13 Proceso para generar nube de puntos densa [Elaboración propia]

En este punto se realiza una limpieza de la zona de trabajo y se elimina cualquier posible píxel que el programa haya generado de manera errónea. Se realiza una *Selección de forma libre* de los distintos puntos que no se corresponden con el modelo de la zona de estudio (Figura 3-14). Con el levantamiento de la nube de puntos densa ya se aprecia el contorno y la forma de nuestra zona con mayor nitidez, ya que, al acercarnos a esta, se aprecia que está formada por millones de puntos.

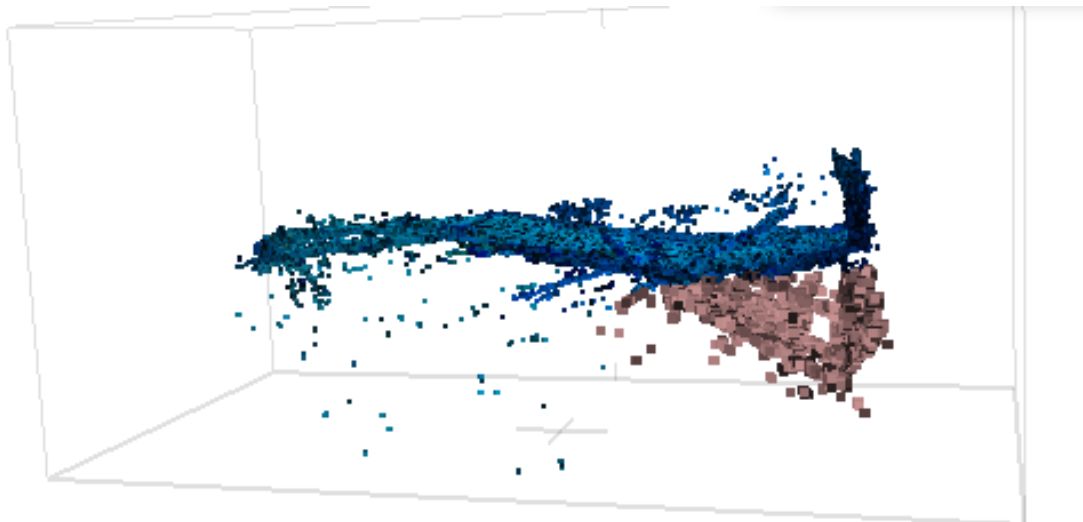


Figura 3-14 Proceso de limpieza de puntos externos a nuestro modelo definitivo [Elaboración propia]

3.3.3 Generación de la malla y texturas

La dispersión generada en la nube de puntos es mínima; sin embargo, continúa sin tener un cuerpo sólido claramente definido, para lo cual es necesario generar un modelado de malla. Basándose en la información aportada por la nube de puntos, *Agisoft Metashape* puede generar un modelo poligonal de malla. El funcionamiento de este proceso se basa en la aplicación de una serie de algoritmos de triangulación, cuya resolución del resultado vendrá relacionada con la precisión en las nubes de puntos generadas con anterioridad [40] [41].

Para la creación de la malla, el programa ha realizado cálculos para crear aristas y caras y con ello el objeto comienza a definir un contorno claro y una superficie. La malla genera tres tipos de modelado: *Sombreado*, *Sólido* y *Alambre*. Cada uno de estos modelos ofrecen al usuario una determinada información (Figura 3-15). Además, el programa fotogramétrico devuelve un análisis del *nivel de confianza* obtenido para cada modelo.

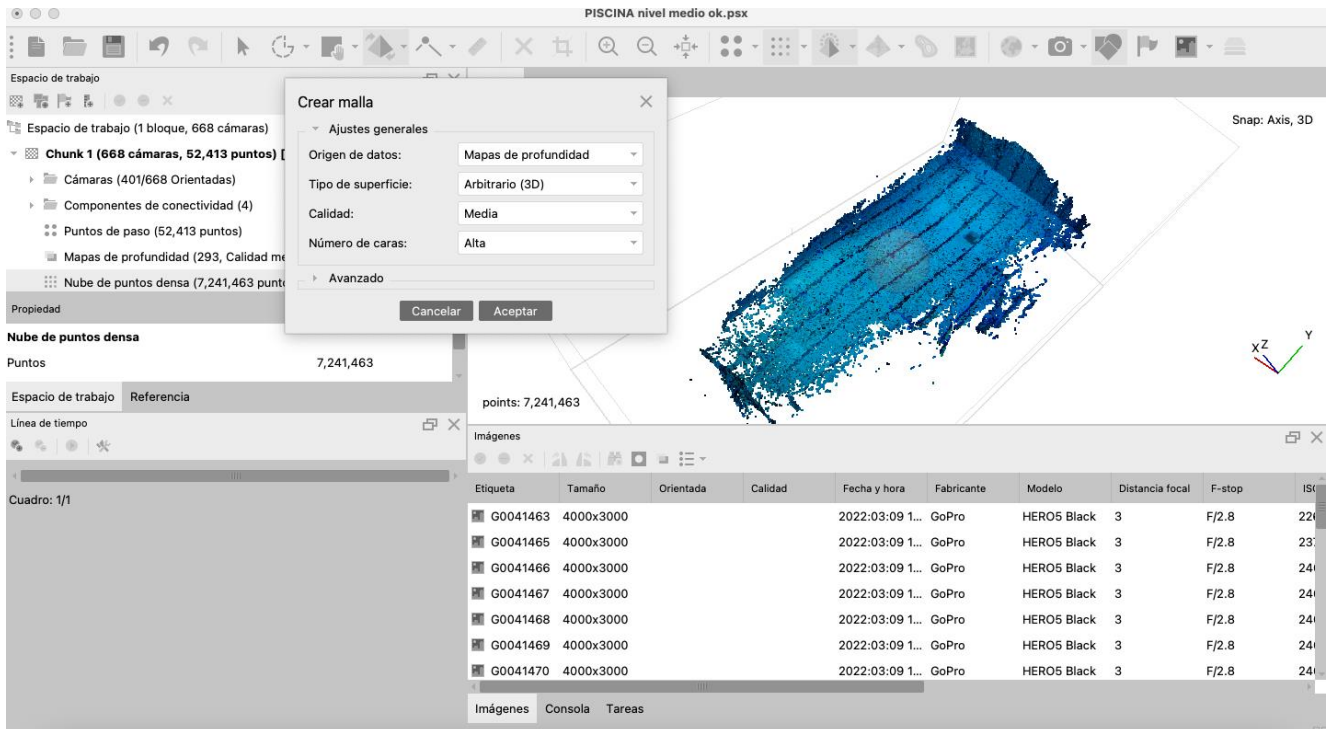


Figura 3-15 Proceso para generar la malla a partir de la nube de puntos densa [Elaboración propia]

Para finalizar, una vez obtenida la malla se genera la textura y de esta manera se terminaría el modelado 3D. La proyección de texturas sobre el modelo se ejecuta mediante un proceso por coordenadas, donde las fotos alineadas se proyectan sobre las respectivas caras del modelo. Este proceso se realiza sobre el modelo sólido generado en el punto anterior. Esto dota al modelo de gran realismo y calidad al modelo final [42], ver Figura 3-16.

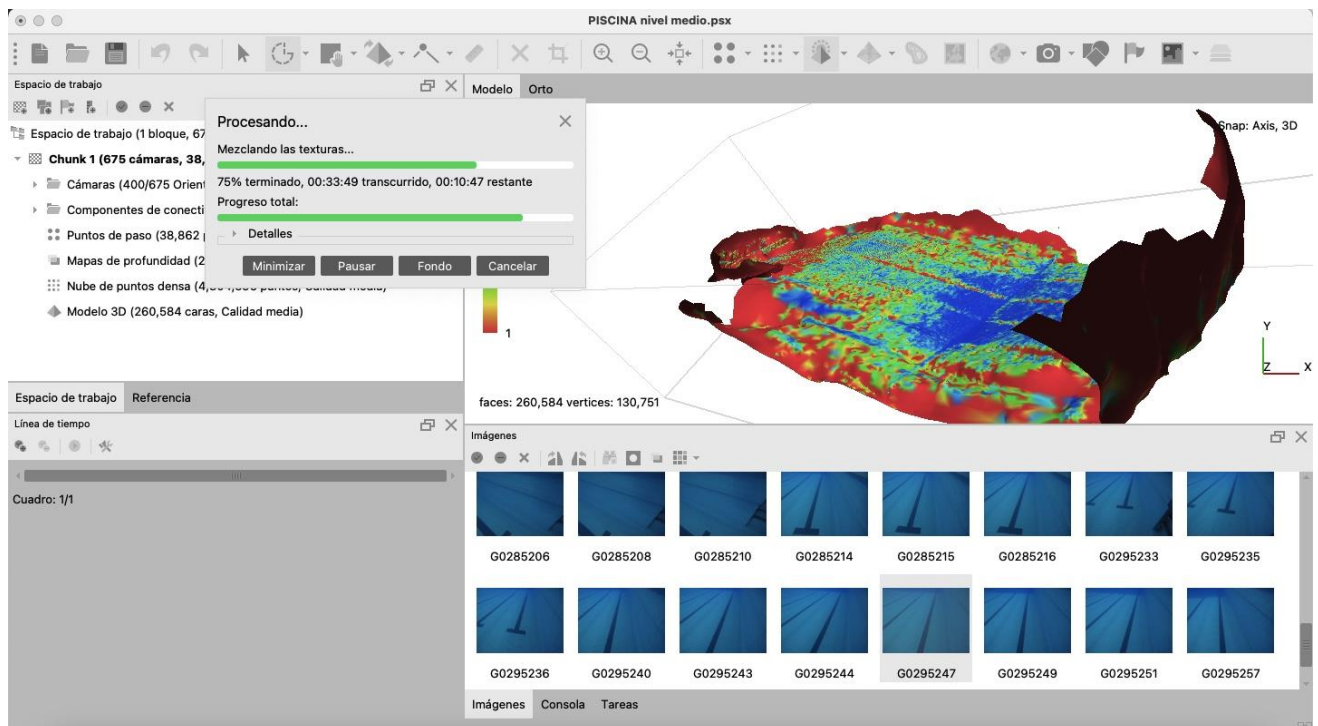


Figura 3-16 Proceso para crear textura de la malla [Elaboración propia]

3.3.4 Generación del MDE y los ortomosaicos

A partir de este modelo tridimensional se pueden realizar los ortomosaicos, ver Figura 3-17. Estas imágenes se proyectan ortogonalmente sobre el modelo obtenido, eliminando la perspectiva y permitiendo así realizar estudios y mediciones en magnitud verdadera, sin deformaciones, que por el contrario si genera la vista en perspectiva.

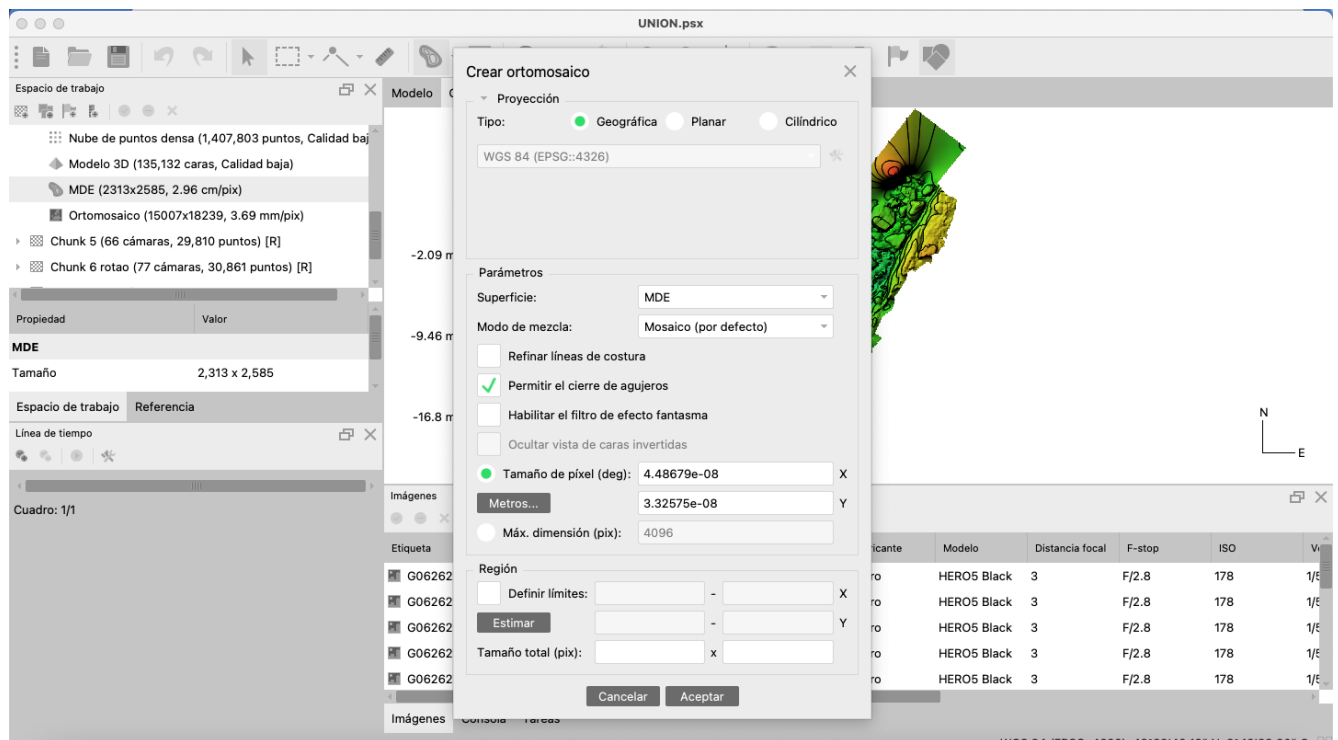


Figura 3-17 Proceso para crear el ortomosaico [Elaboración Propia]

También se puede determinar un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), como refleja la Figura 3-18. Estos modelos son la base fundamental a la hora de determinar la batimetría, esto es, la orografía del fondo marino, así como los distintos tipos de levantamientos resultado del análisis del programa. Para generar estos modelos es necesario georreferenciarlos en algún punto [43]. Para la generación de este MDE se definirán un sistema de coordenadas, los límites de la zona de estudio, el origen de los datos y su resolución.

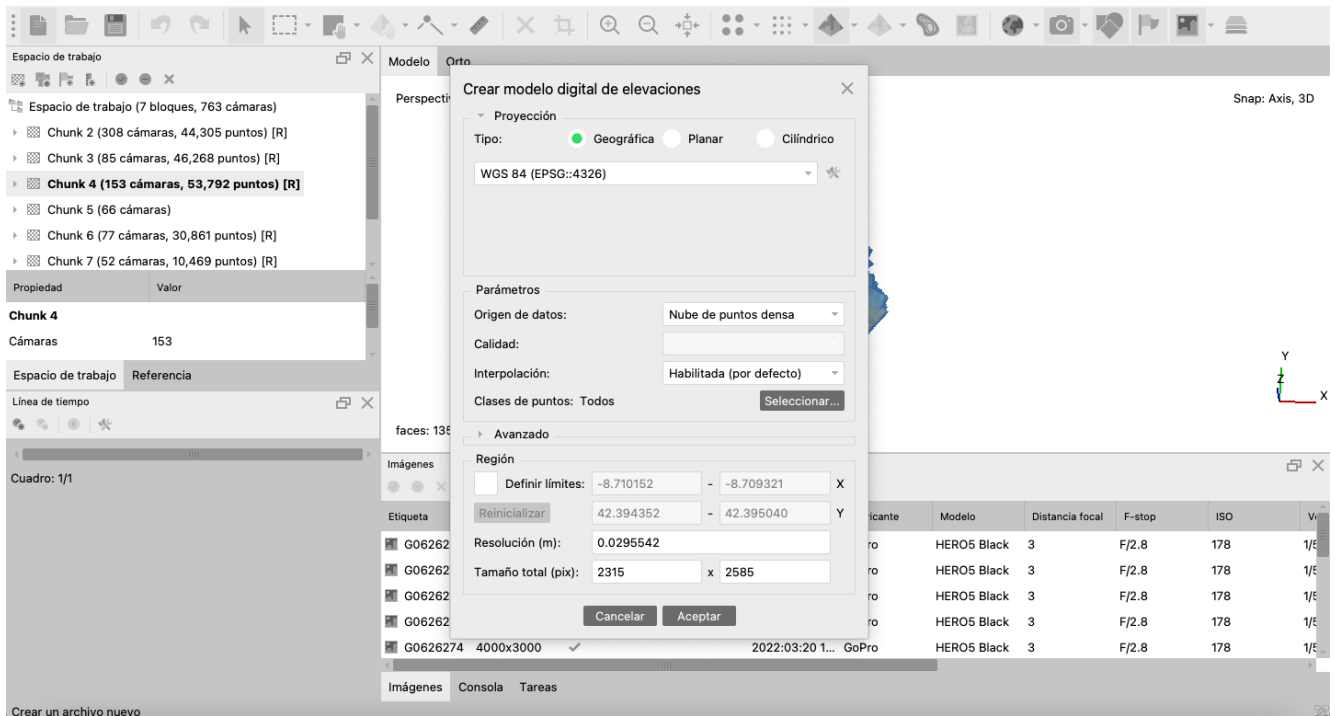


Figura 3-18 Proceso de crear MDE [Elaboración propia]

3.3.5 Modelado con curvas de nivel

Una vez que se construye el MDE, el siguiente paso consistirá en obtener el curvado de dicho modelo, ver Figura 3-19. Mediante la ventana *Herramientas* se selecciona *Generar curvas de nivel*, y en este momento aparece una pestaña en la que el usuario debe determinar los parámetros que definen las curvas de nivel, esto es, las cota máxima y mínima, que vienen por defecto calculadas a partir de los datos de altitud obtenidos en el MDE y la equidistancia entre las distintas curvas de nivel.

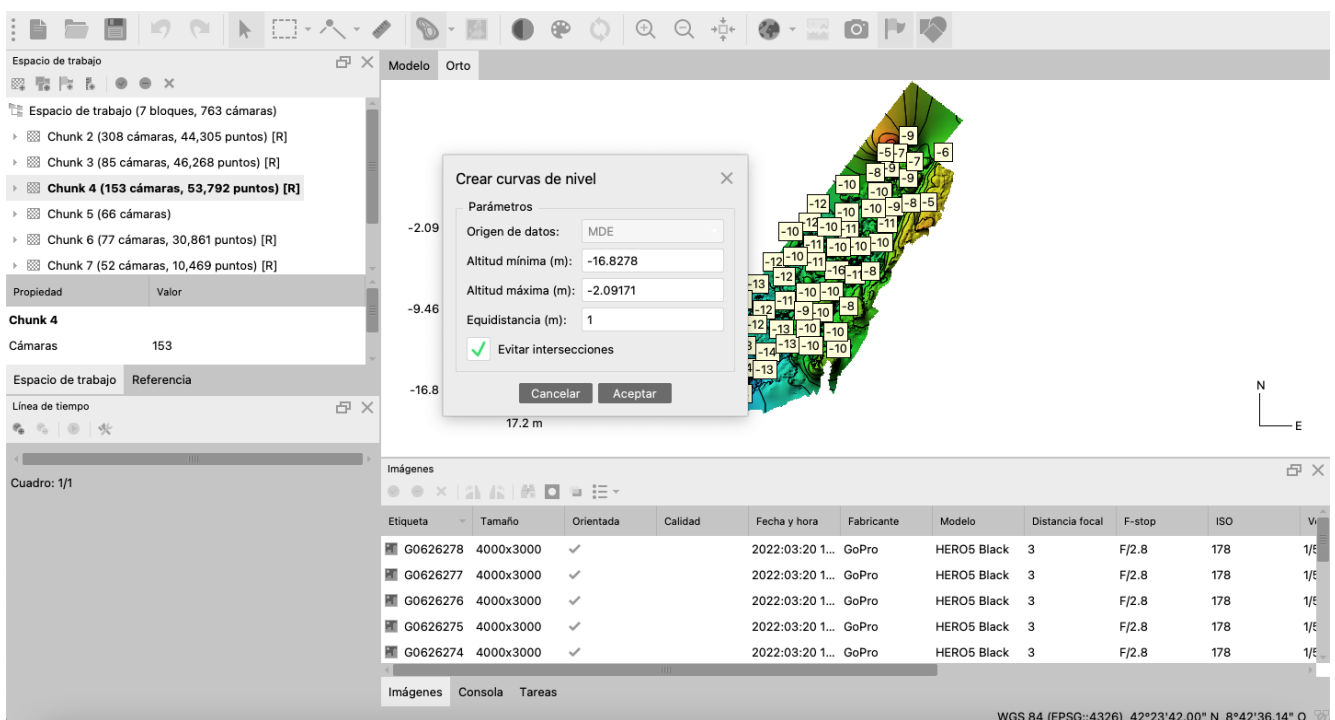


Figura 3-19 Proceso de crear curvas de nivel [Elaboración propia]

4 RESULTADOS

Una vez que se han explicado en detalle los distintos pasos seguidos en el proceso fotogramétrico mediante el empleo del programa de procesamiento fotogramétrico *Agisoft Metashape*, se presentan los resultados obtenidos de las dos zonas de pruebas. Estos resultados van a recoger a su vez, para cada una de las dos zonas de estudio, los distintos productos resultantes.

4.1 Zona de Pruebas I

4.1.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa

Es necesario comentar que, en el caso de la Zona de Pruebas I, la existencia de un fondo muy homogéneo tanto en geometrías como en colores, dificultó sobremanera la búsqueda de puntos homólogos entre imágenes correspondientes (*image matching*). Al contrario, sí supuso un entorno favorable para la adquisición de imágenes al estar protegidos de las condiciones meteorológicas. Finalmente se ha llevado a cabo la orientación relativa de 1140/1336 cámaras estableciendo un filtro que determina el nivel de detección y selección de puntos como *medio*, con un tiempo de procesamiento elevado.

La técnica elegida para la orientación de las imágenes ha sido de manera *Secuencial* siguiendo el orden de captura de fotografías, ya que estas se han realizado de manera ordenada en cada una de las calles de la piscina. En total se han obtenido 92.566 puntos homólogos, y con estos datos ha sido posible la orientación relativa de las imágenes.

Sin embargo, una vez que ha concluido este proceso se observa que algunas imágenes no se han orientado por lo que se repite la alineación de las mismas. Para ello, se selecciona en esta ocasión el modo *Estimado*, que facilita la búsqueda de puntos de solape con imágenes que sí han sido previamente orientadas, ver Figura 4-1.

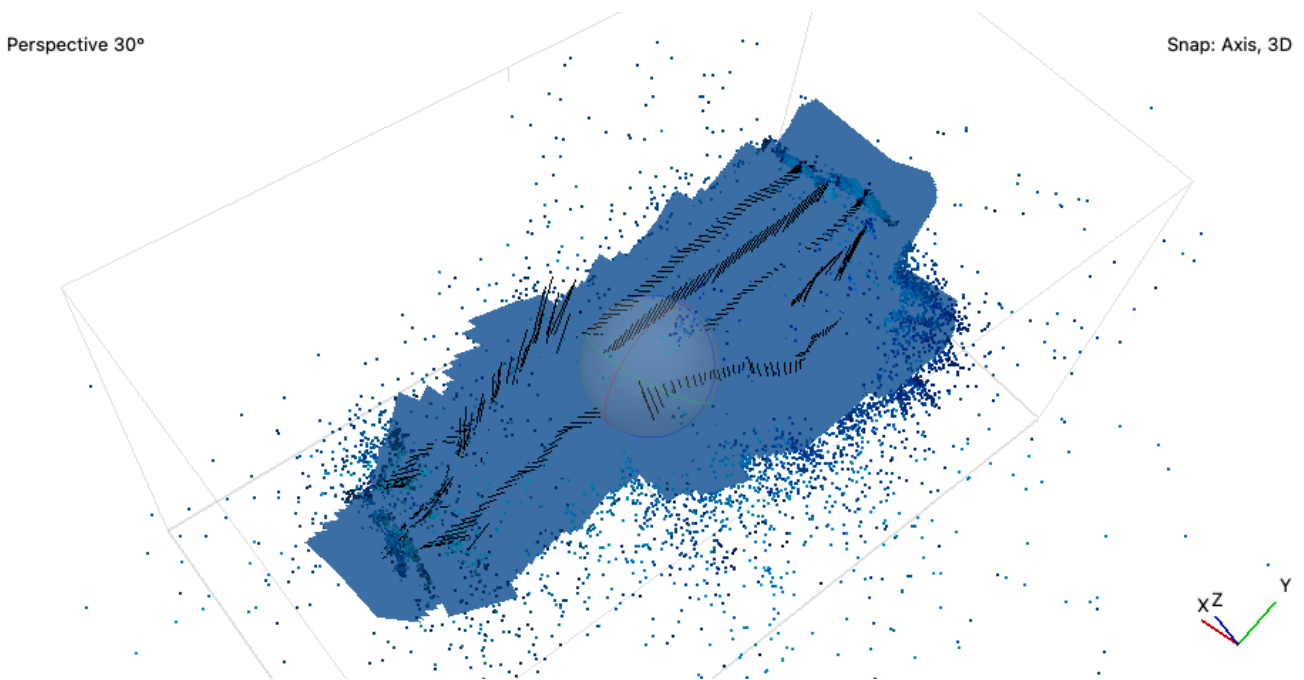


Figura 4-1 Fotografías solapadas una vez han sido orientadas [Elaboración propia]

Como se puede apreciar en la Figura 4-1 se han orientado las fotografías siguiendo cada una de las calles. Realizando un zoom en el modelo se puede ver en la imagen cómo el programa genera los distintos píxeles de puntos, a través de la proyección de manera secuencial de las distintas imágenes. Se ve la secuencia de fotografías en cada una de las calles del modelo de la piscina.

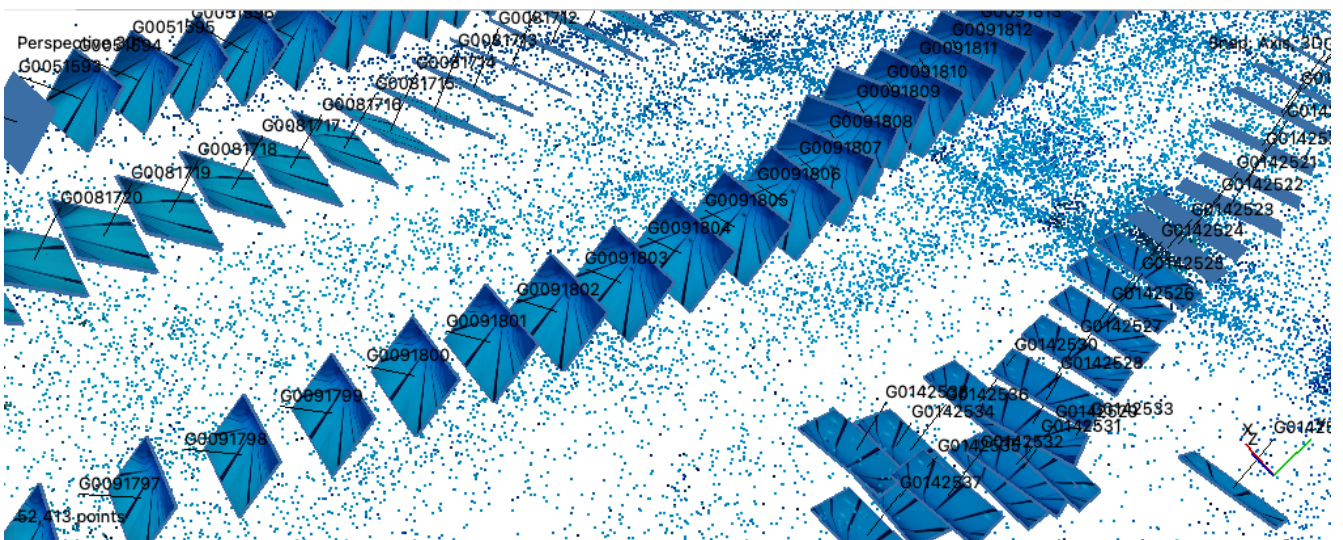


Figura 4-2 Detalle fotografías realizadas en la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

Para esta primera fase el resultado que se genera es la nube de puntos de paso dispersa (Figura 4-3), un resultado todavía prematuro e insuficiente pero que ya permite apreciar la diferencia de cotas a lo largo de todo el modelo. En especial, ya se puede distinguir el cambio de pendiente que posee la piscina pasando de una profundidad de 2 m a 5 m en su parte más profunda. Esto es un claro indicador de que el programa ha realizado de manera correcta el primer paso del modelado.

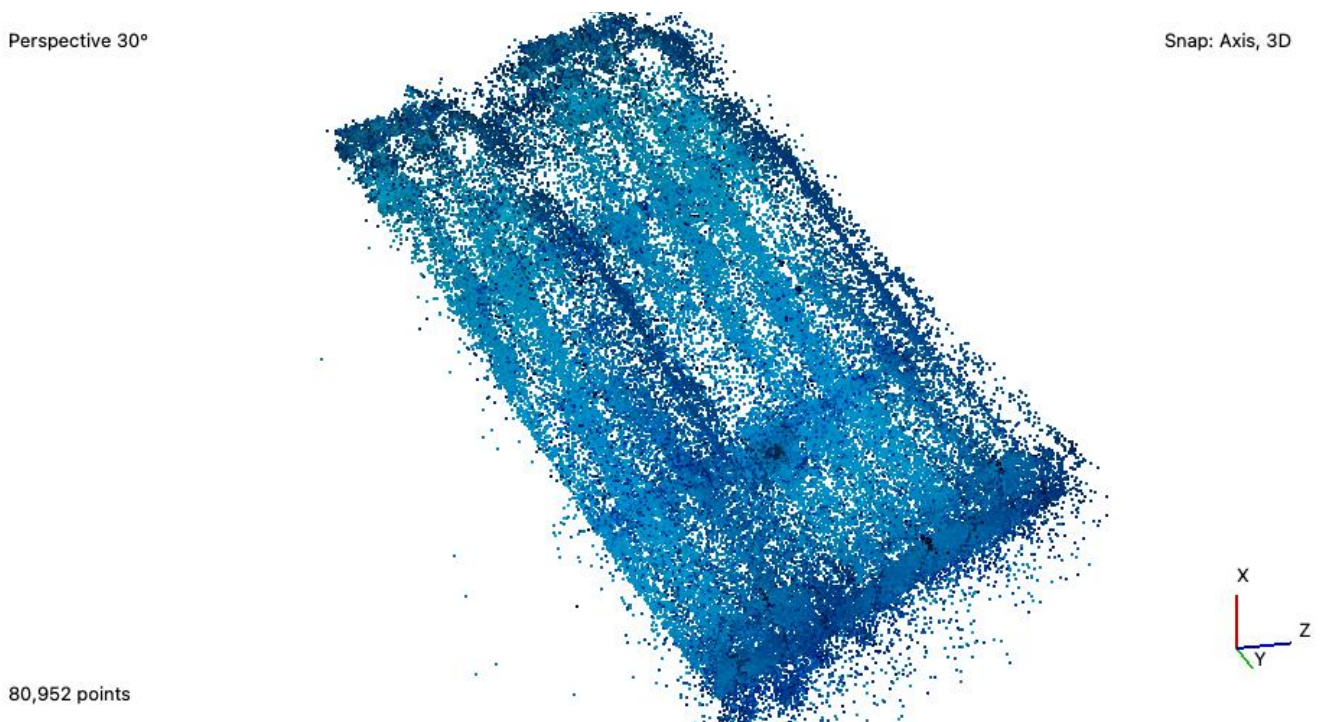


Figura 4-3 Nube de puntos dispersa Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

4.1.2 Nube de puntos densa

El siguiente paso en el proceso de caracterización de esta zona será aumentar la densidad de esta nube de puntos. A partir de la generación de los mapas de profundidad, el software genera la correspondiente nube de puntos densa, en la cual ya aparecen millones de puntos para delimitar con mayor detalle la zona de estudio.

Este proceso da como resultado en la Zona de Pruebas I un total de 11.055.589 millones de puntos con diferente gama cromática

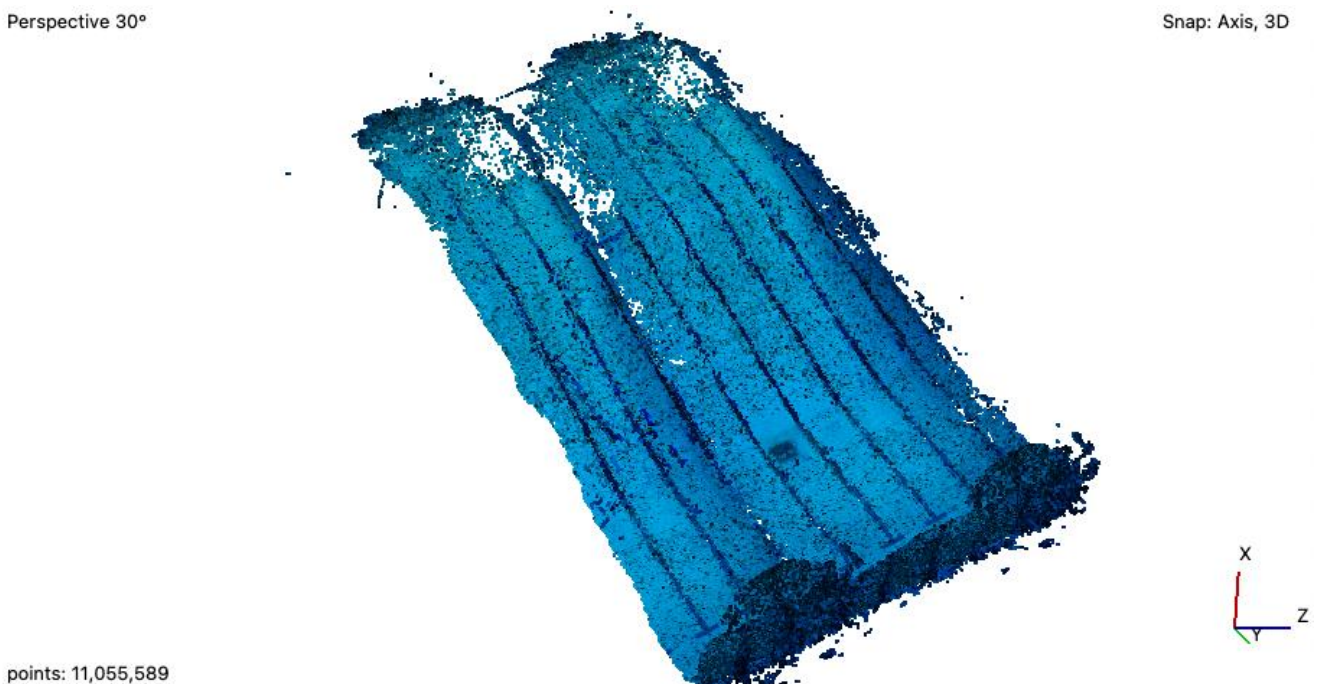


Figura 4-4 Nube de puntos densa Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

Como se puede ver en la Figura 4-4 ya se puede distinguir la estructura de la piscina y la diferente gama de colores que tiene ésta en su fondo. En este modelo ya se empiezan a diferenciar aspectos característicos del fondo como pueden ser las líneas de las calles y la rejilla de filtrado en la zona profunda. Sin embargo, este sigue siendo un resultado provisional que se necesita depurar para definir a la perfección la geometría final del modelo. Podría considerarse, por lo tanto, como una primera aproximación a lo que será el modelo final.

Hay que destacar que, debido a que el proceso fotogramétrico se realiza en un ambiente subacuático, el programa genera píxeles en suspensión (o ruido) al interpretar el reflejo y el movimiento del agua como distorsiones en la propia imagen. En concreto, este fenómeno es debido a las sombras proyectadas en el fondo de la piscina. Esa es la principal razón por la cual es necesario realizar una limpieza manual de aquellas zonas que han sido erróneamente generadas por el software *Agisoft Metashape*,

4.1.3 Generación de la malla y la textura

Como se ha recalcado en el punto anterior el resultado hay que cerrarlo, de manera que se realiza el mallado. En el caso de la zona de Pruebas I se han generado 148.447 caras en total y 75.944 vértices. [42]. Con el mallado queda ya definido un modelo sólido cerrado de la piscina, con la que puede apreciarse su estructura. Se muestran a continuación los distintos tipos de resultado ofrecidos tras concluir el mallado (sombreado, sólido y malla de alambres) con las distintas capas que se pueden habilitar en el programa *Agisoft Metashape*.



Figura 4-5 Malla modelo sombreado de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

En el modelo sombreado de la Figura 4-5 se distingue la estructura de la piscina con la primera proyección de la gama de colores que posee, que han sido generados durante la creación de la nube de puntos densa.



Figura 4-6 Malla modelo solido de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

En la Figura 4-6 se muestra el fondo de la piscina sin colores; se aprecia una serie de irregularidades debido principalmente a las distorsiones creadas al encontrarnos en un ambiente subacuático.

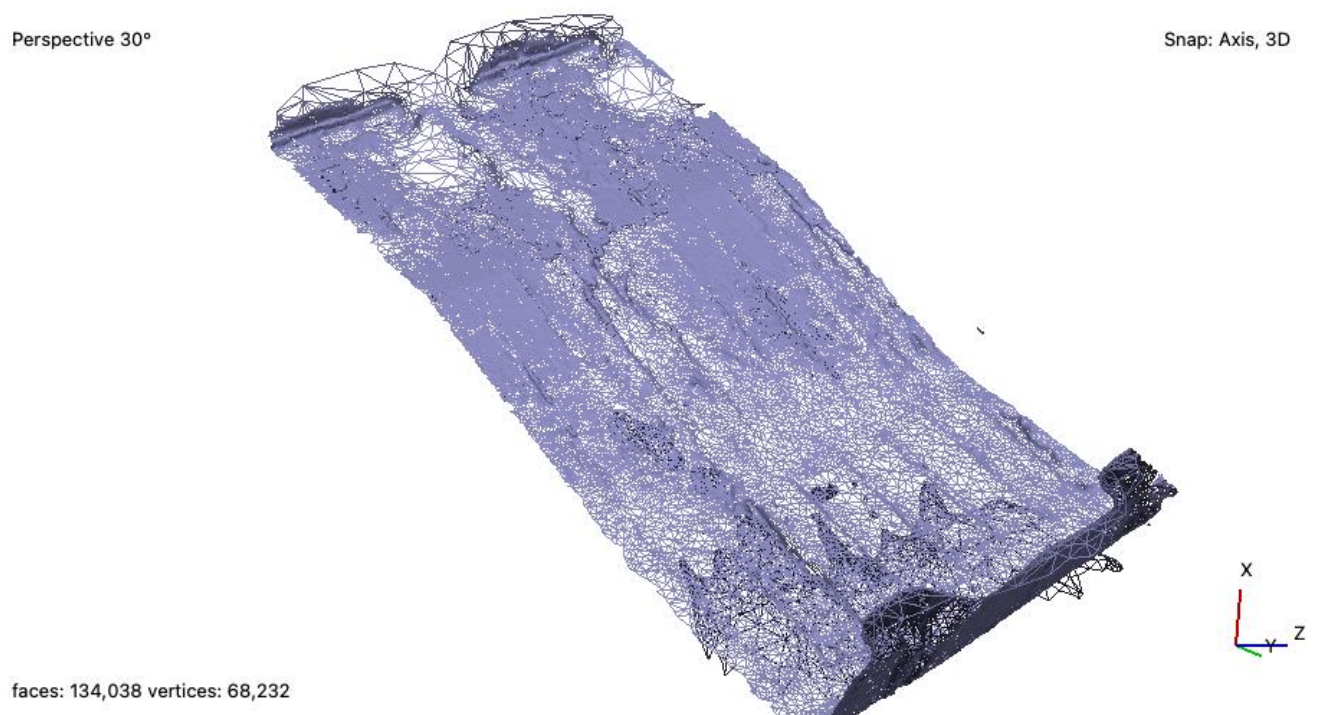


Figura 4-7 Malla del modelo alámbrico de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

En el modelo de alambres que se presenta en la Figura 4-7 se pueden observar los distintos triángulos generados por el programa *Agisoft Metashape* para crear la malla triangulada. En aquellas zonas en las se encuentra un mayor número de puntos, los triángulos creados son mucho menores en tamaño, lo que

conlleva a una mayor concentración de triángulos que permiten definir definir la superficie con mayor exactitud.

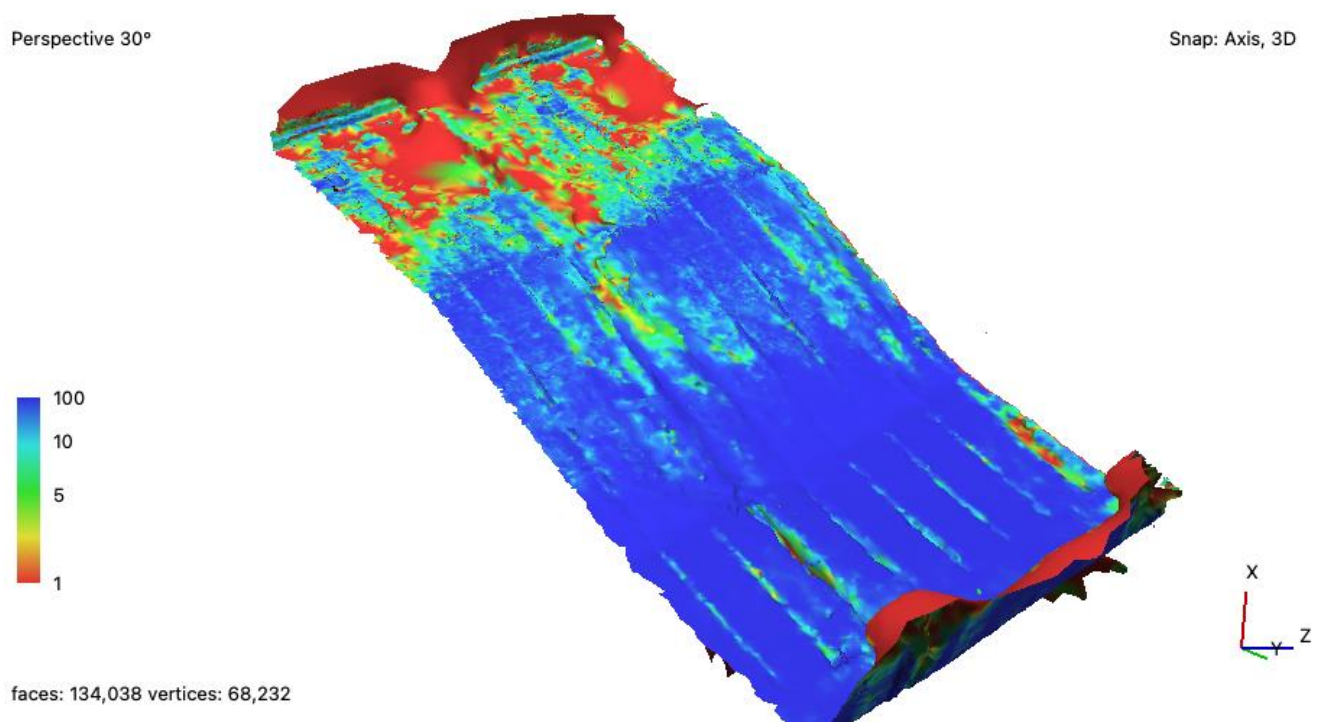


Figura 4-8 Malla con el nivel de confianza del modelo de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

En la Figura 4-8 aparece el nivel de confianza del modelo según el cual, la fiabilidad de las zonas generadas por el programa las clasifica en una escala de colores. Como se puede apreciar, la zona que es más realista es la que se encuentra en el centro de nuestra zona de pruebas, ya que ahí se obtienen un mayor número de puntos característicos que facilitan al programa el proceso de *image matching*. En cambio, en color rojo se visualizan aquellas zonas en las que hay escasez de puntos homólogos y donde el programa ha tenido que realizar una estructura estimada.

Por último, se realiza el proceso de generado de la textura, la cual se proyecta sobre los modelos de malla que han sido generados en pasos anteriores, dando lugar al modelo texturizado cuyo resultado se puede apreciar en la Figura 4-9.



Figura 4-9 Modelo texturizado de la Zona de Pruebas I [Elaboración propia]

Este modelo texturizado representa el producto final del proceso de modelado 3D de esta primera Zona de Pruebas, donde se puede apreciar el gran realismo del modelo, al contener la proyección de las imágenes sobre el modelo sólido generado. Aun así, es necesario comentar que existen algunas imperfecciones derivadas de las sombras generadas por las corcheras, e incluso, debidas también a que la adquisición de las imágenes fue realizada en días distintos y con condiciones lumínicas diversas.

4.1.4 MDE, Ortofoto y modelo con curvas de nivel

En este primer caso de estudio no se ha generado el MDE de la piscina por dos motivos fundamentales: el primero, es que debido a que no se puede utilizar el GPS en la zona interior donde está situada la piscina, el modelo no contiene información georreferenciada por lo que el software imposibilita su generación; y, en segundo lugar, porque la generación de modelos digitales de elevación y sus respectivas curvas de nivel, no tienen cabida en el diseño y modelado de una obra de ingeniería de este calibre. Por último, se acompañan estas líneas de texto con la imagen del ortomosaico generado, que permitiría a cualquier usuario realizar mediciones verdaderas, una vez que dicho modelo de la piscina hubiese sido correctamente escalado (Figura 4-10).

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

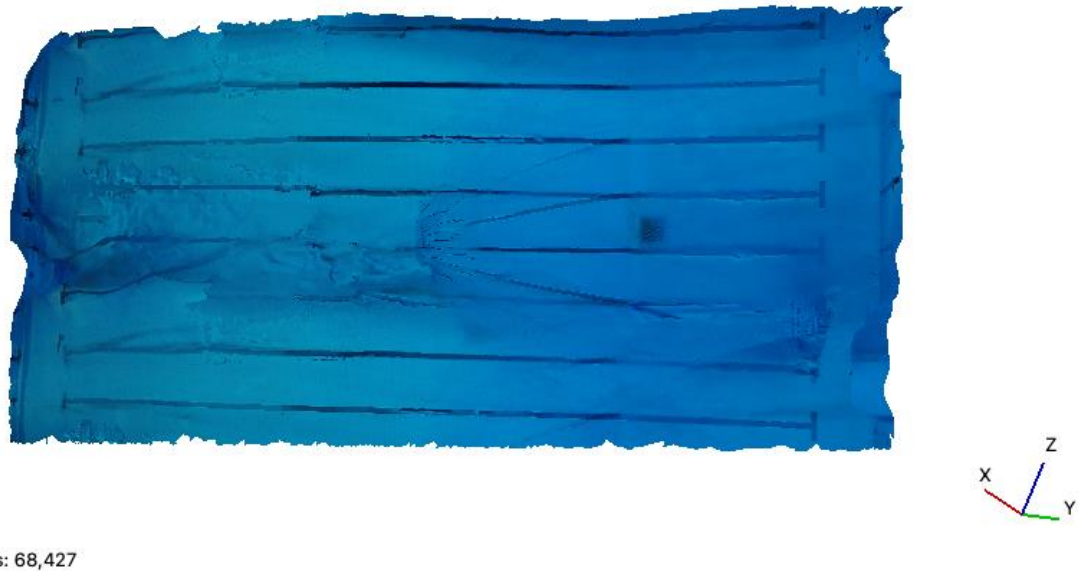


Figura 4-10 Ortomosaico de la Zona de Pruebas I

4.2 Zona de Pruebas II

4.2.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa

En el caso de la Zona de Pruebas II, al tratarse de un fondo marino, es justo comentar que el software *Agisoft Metashape* encuentra con mucha más facilidad puntos coincidentes y aspectos del terreno destacables entre las distintas imágenes, a partir de los cuales puede realizar con éxito la orientación relativa de las imágenes. Sin embargo, en este caso, el principal problema encontrado está relacionado con la turbidez del agua que provocó que muchas de las imágenes tuvieran que ser descartadas por su baja calidad. Otro de los aspectos que supuso un impedimento a la hora de procesar los datos fue la gran cantidad de imágenes que se tomaron durante la fase de adquisición, lo que provocó que los tiempos de procesado del programa aumentaran de manera exponencial.

Un punto destacable en esta zona es que las imágenes tomadas fueron georreferenciadas, ya que al encontrarse esta área en el exterior, el GPS fue capaz de sintonizar con la señal satélite. De esta manera al insertarlas en el programa aparecían las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) desde donde fue tomada cada fotografía lo que facilita la orientación relativa y absoluta de cada una de ellas. Resaltar que se modificó la coordenada Z de todas las imágenes estableciéndolas en un mismo plano, debido a una imprecisión del GPS. Con este cambio corregimos la desviación que pudiera tener en altura el GPS y se facilita su orientación situando todas las fotos en un mismo plano.



Figura 4-11 Posicionamiento GPS de los puntos de captura de cada imagen [Elaboración Propia]

Como se observa en la Figura 4-11, las posiciones de la cámara durante la toma de datos aparecen representadas por un punto. Esto permite ver cómo efectivamente, se cubre la zona de pruebas II con todas las pasadas realizadas, al tiempo que se facilita la ubicación de las pasadas sobre un mapa satelital importado en el propio software. Una vez que se importan todas las imágenes en el software, se observa su pre-orientación y los solapes entre imágenes de pasadas consecutivas, ver Figura 4-12.

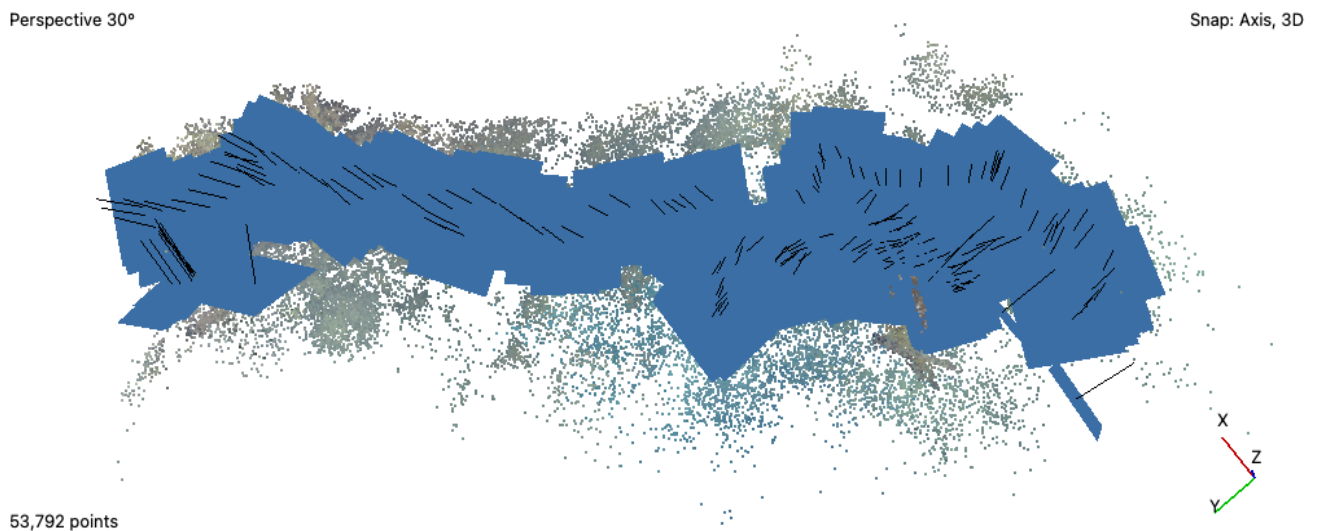


Figura 4-12 Fotografías orientadas modelo de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

Si se realiza un zoom sobre las imágenes orientadas se puede apreciar el ángulo desde el cual fue tomada cada una y cómo a partir de las distintas imágenes, el software proyecta una serie de píxeles en el modelo, ver Figura 4-13. En esta imagen se puede ver un detalle de las miniaturas de las fotografías empleadas en este modelo.

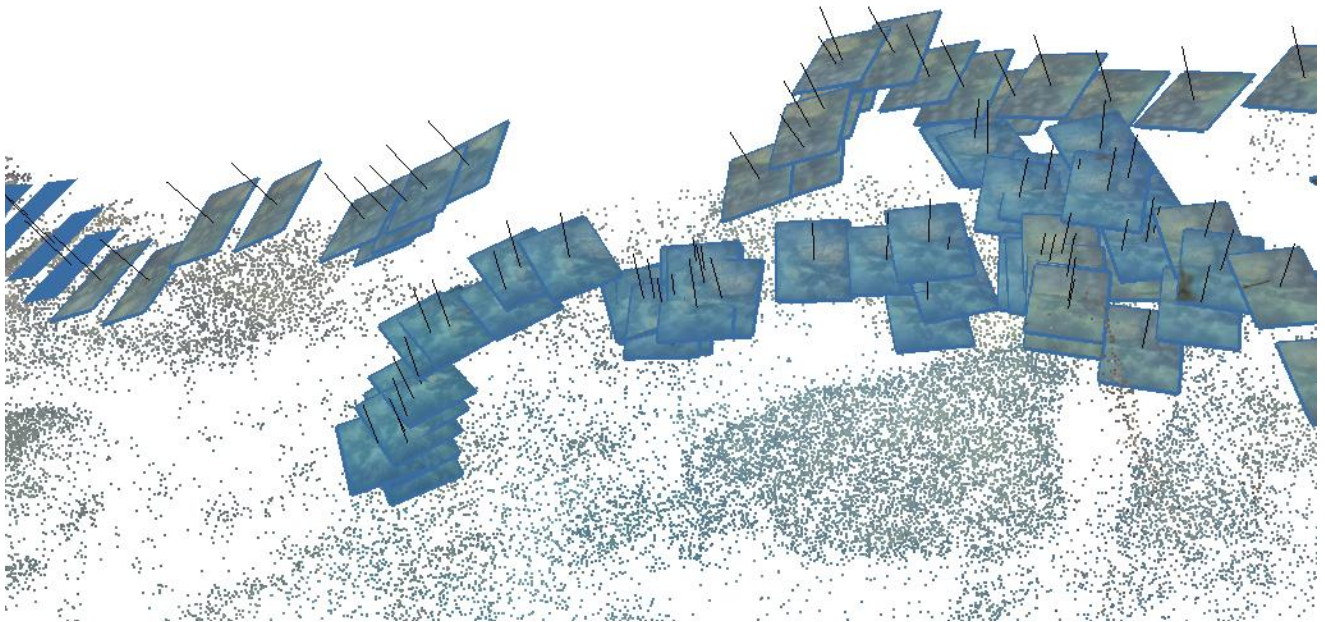


Figura 4-13 Detalle fotografías realizadas en la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

Para esta zona de pruebas se ha empleado la orientación de manera por *Origen*. En este caso se han orientado de manera exitosa un total de 713/914 cámaras con un filtro de detección y selección de puntos *Medio*, con un tiempo de procesamiento elevado. Una vez finalizado el proceso se ha obtenido un total de 53.792 puntos homólogos, orientando de esta manera las distintas cámaras en la captura de imágenes. Tras esta primera orientación se realiza el mismo proceso que se ejecutó en la zona anterior, con una orientación *Estimada* de aquellas imágenes que no se orientaron en un inicio.

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

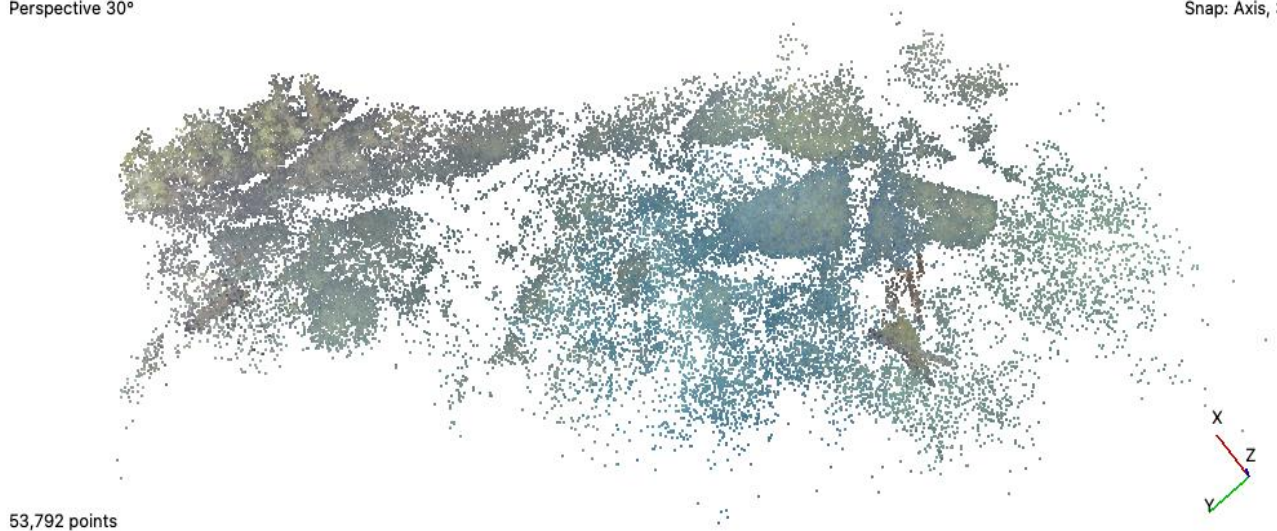


Figura 4-14 Nube de puntos dispersa Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

Todo ello genera nuestro resultado inicial, esto es, la nube de puntos dispersa (Figura 4-14). Ahora sí, las dimensiones de nuestro modelado pueden ser determinadas ya que el modelo está georreferenciado, ver Figura 4-15.

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

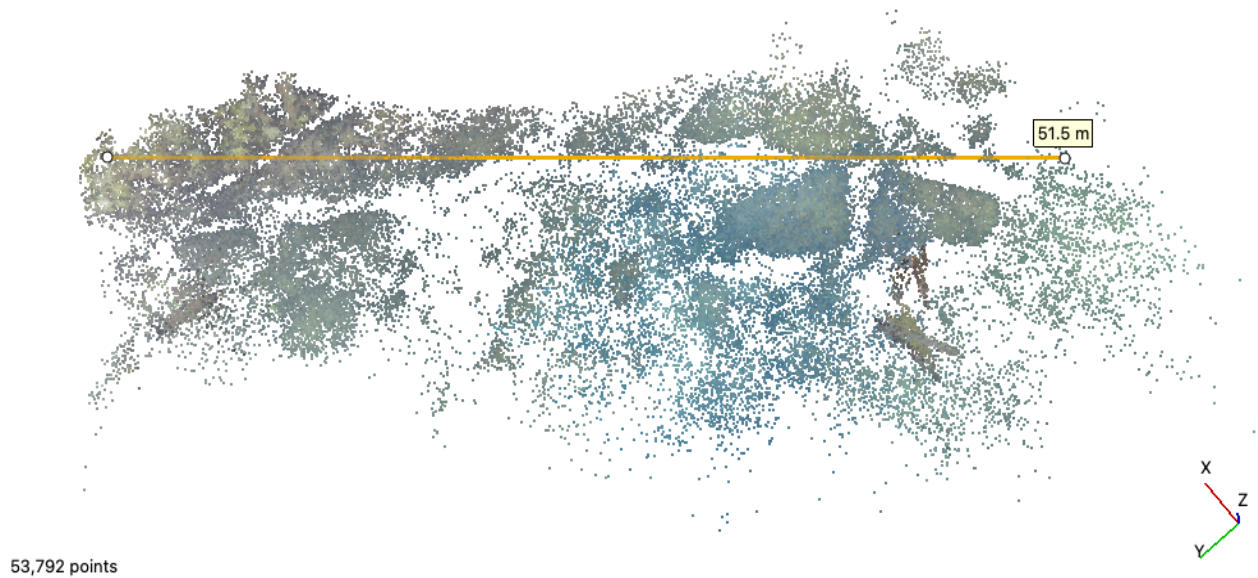


Figura 4-15 Dimensiones de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

4.2.2 Nube de puntos densa

Una vez generada la nube de puntos dispersa, se procede a crear la nube de puntos densa a partir de los mapas de profundidad. Este proceso supone un aumento considerable de la densidad de puntos del modelo primario, lo que ayuda inevitablemente a una caracterización más detallada del modelo (Figura 4-16).

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

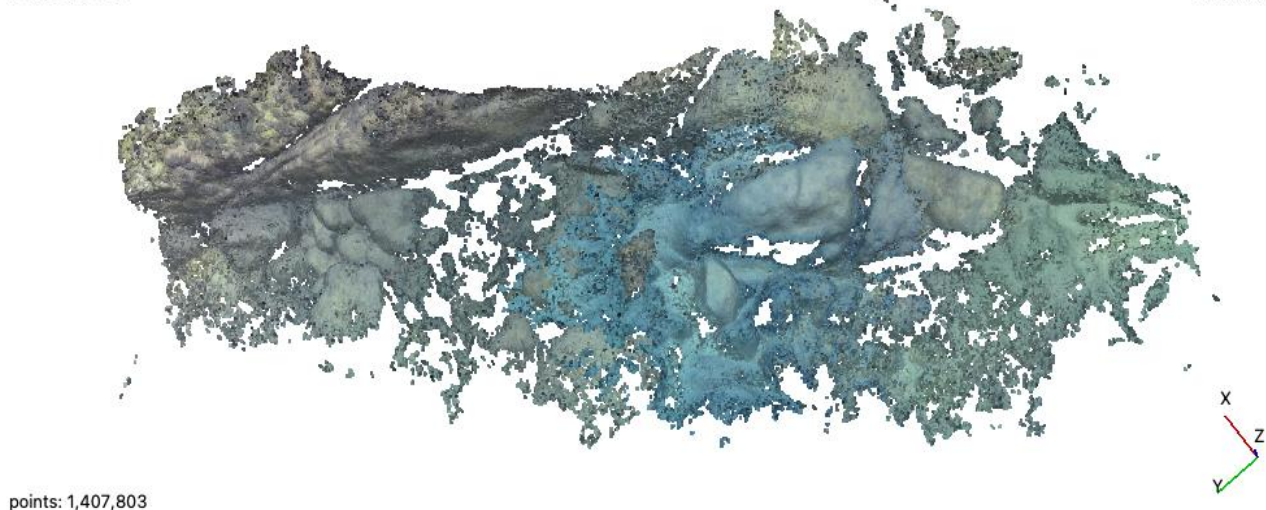


Figura 4-16 Nube de puntos densa de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

En el modelo de la Zona de Pruebas II, se recoge un total de 1.407803 millones de puntos con diferente gama cromática correspondiente a diferentes tipos de rocas y fondos. Con este modelo más desarrollado ya se pueden distinguir las distintas elevaciones y apreciar la orografía del fondo marino en esta zona. En este primer resultado se comienza a diferenciar las formaciones rocosas más destacables del terreno.

Como se ejecutó en el modelo anterior se realiza una limpieza de aquellos puntos que han sido generados por el programa de manera errónea. Con ello se acota más la nube de puntos densa y se facilita el siguiente paso de generación de malla, que toma como origen la nube de puntos densa.

4.2.3 Generación de la malla y textura

Para el modelado de la Zona de Pruebas II se han generado 135.132 caras y un total de 67,725 vértices. En esta malla ya se realiza una unión de los distintos puntos densos y se crea un primer modelado 3D de la zona de estudio.

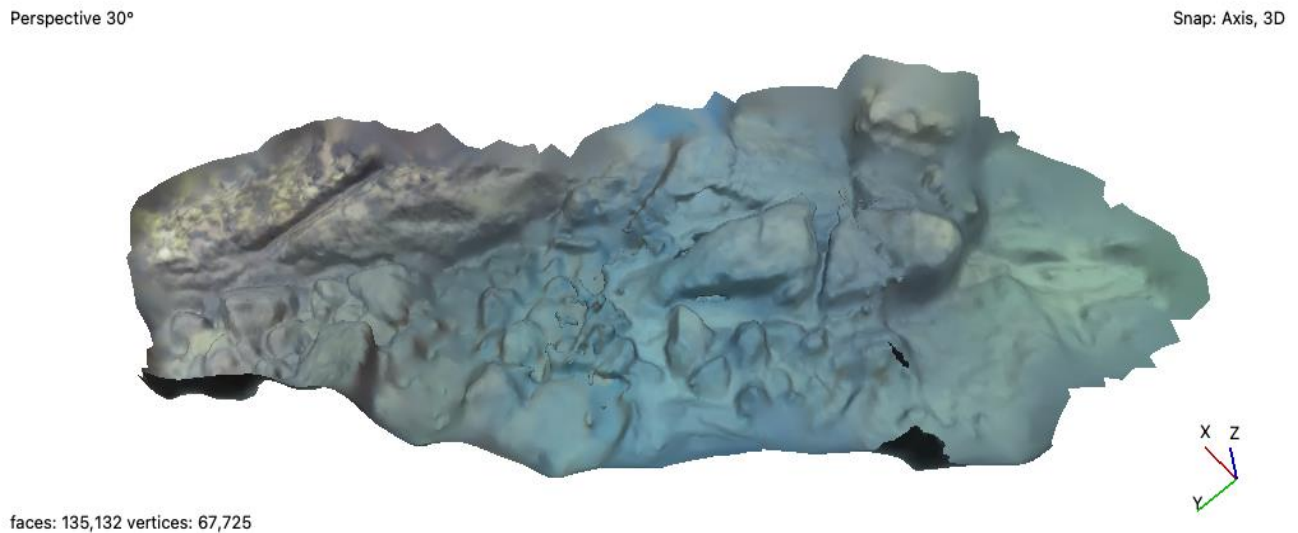


Figura 4-17 Malla modelo sombreado de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

El modelo sombreado de la Figura 4-17 se distingue la orografía del terreno gracias a las diferencias de colores entre la zona rocosa y la arenosa, así como las zonas de vegetación marina.

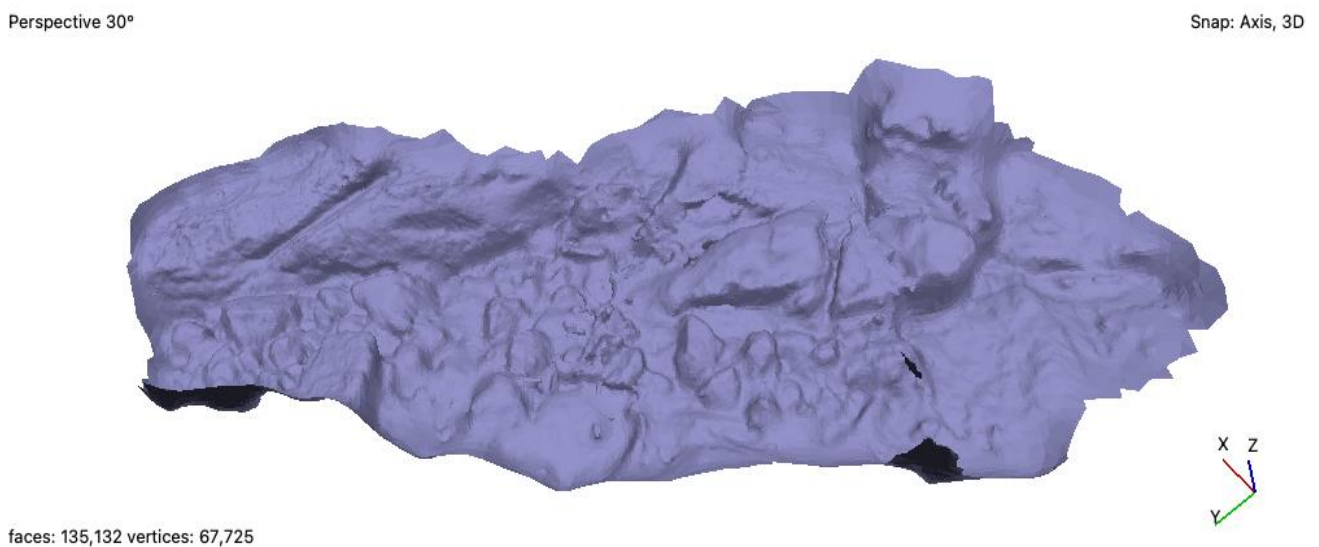


Figura 4-18 Malla modelo solido de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

En la Figura 4-18 se muestra lo que sería el fondo marino de la Zona de Pruebas II sin gama de colores, este modelo resulta de interés debido a que refleja el relieve de la zona de estudio y las diferentes

elevaciones que posee. Este modelo permite visualizar con mayor grado de detalle aquellas zonas que pueden suponer un canal de acceso a una playa y que están libres de formaciones rocosas.

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

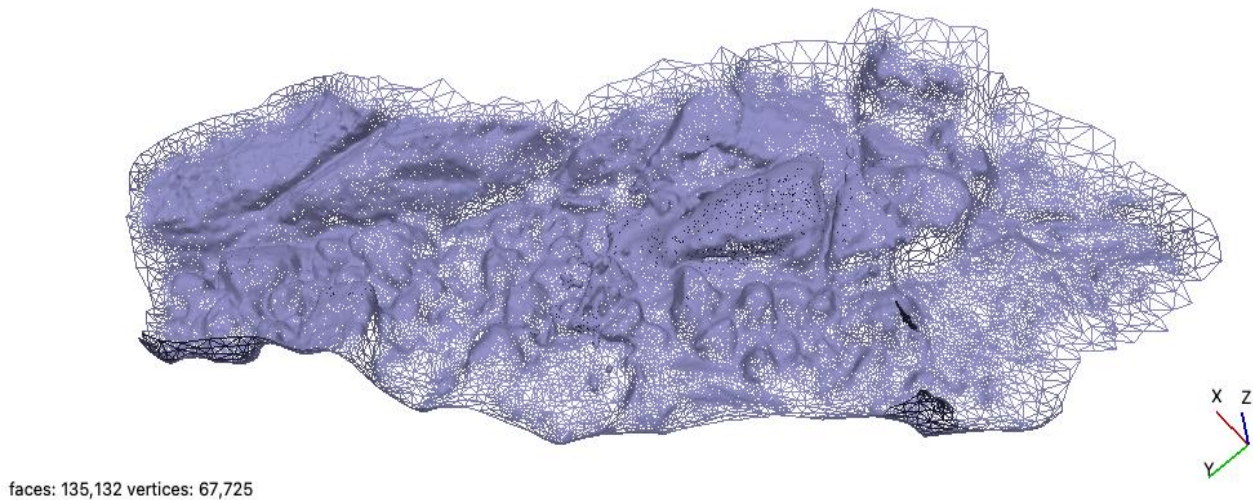


Figura 4-19 Malla del modelo alámbrico de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

En el modelo alámbrico mostrado en la Figura 4-19 se aprecian los distintos triángulos generados por el *Agisoft Metashape* para crear la malla.

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

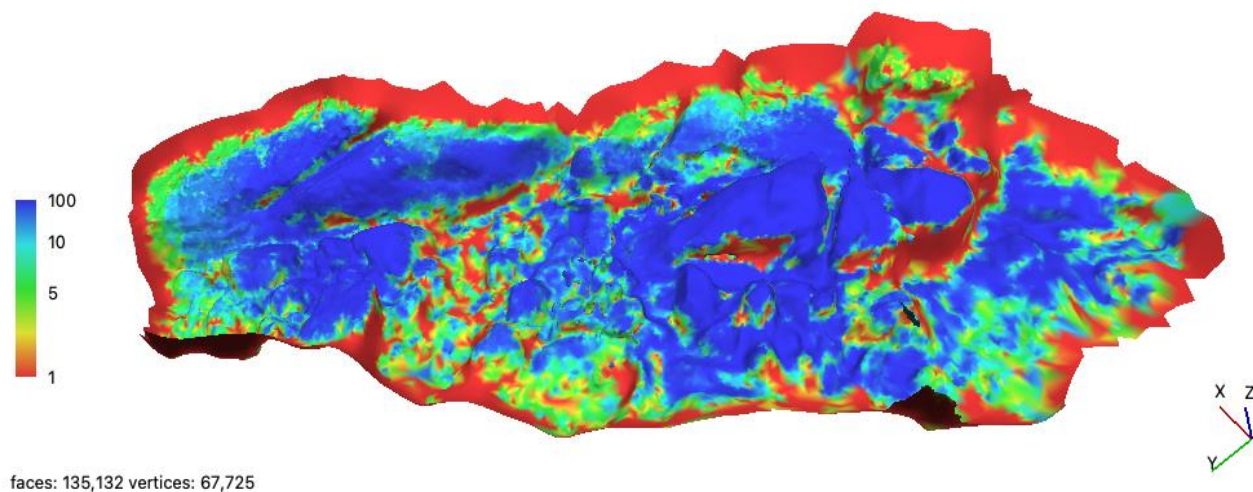


Figura 4-20 Malla nivel de confianza del modelo Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

En el nivel de confianza del modelo (Figura 4-20) se aprecia que las zonas con mayor grado de detalle son las zonas rocosas, ya que estas son las que tienen una mayor nitidez en las imágenes y sirven como puntos de referencia fiables para el programa.

Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

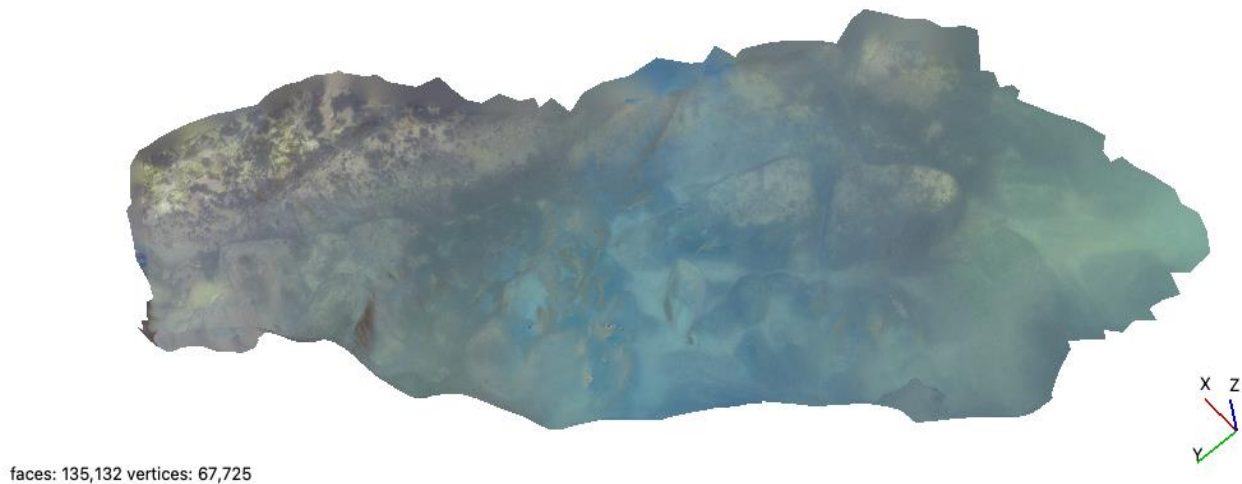


Figura 4-21 Modelo texturizado de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

Por último, a partir de la malla se procesan las imágenes proyectándolas sobre nuestro modelo, lo que daría como resultado el levantamiento 3D final texturizado (Figura 4-21) donde se puede apreciar el fondo de la zona de pruebas II de manera realista. Sin embargo, en este modelo final se puede apreciar cierta turbidez, que provoca una escasa visibilidad en el agua durante los periodos destinados a toma de muestras. Esto repercute inevitablemente en la calidad del modelo final obtenido.

4.2.4 MDE, Ortofoto y modelo con curvas de nivel

Finalmente, una vez se ha realizado la caracterización de la zona de estudio se procede a su dimensionamiento en altura. De esta manera se genera el Modelo Digital de Elevaciones cuya referencia de cotas aparece visualizada gracias a una escala de colores recogida en la parte izquierda de la Figura 4-22, se aprecia su cota con referencia a la cota cero de España situada en Alicante.

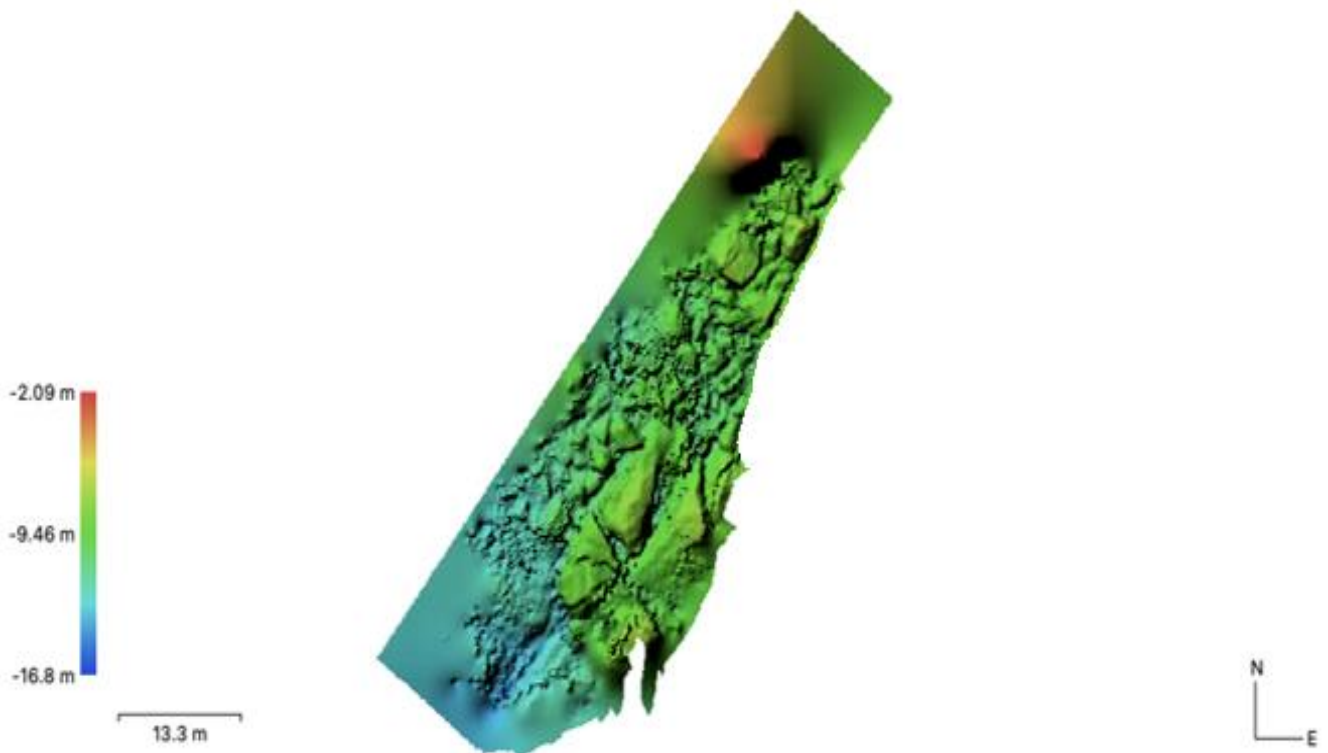


Figura 4-22 MDE de la Zona de Pruebas II [Elaboración propia]

Como se ve existe una cierta distorsión en altura empezando el punto menos profundo del modelo a una cota de 9 m disminuyendo a la zona de 13m con tonalidades más azules. Esto se debe principalmente al GPS de nuestro dispositivo. Cabe recordar que la diferencia de cotas en el MDE es lo que nos permite visualizar las diferentes profundidades. Las mayores imprecisiones se encuentran en los extremos al ser zonas con menor grado de confianza.

Tras obtener el MDE, se generan las curvas de nivel con una equidistancia entre ellas de 1 m teniendo en cuenta las alturas proporcionadas por el Modelo Digital de Elevación. El resultado mostrara la integración del MDE con las curvas de nivel, (Figura 4-23).



Figura 4-23 MDE caracterizado con curvas de nivel [Elaboración propia]

El programa *Agisoft Metashape* también permite proyectar estas curvas de nivel en el modelo texturizado que se obtuvo previamente, dando como resultado la Figura 4-24.

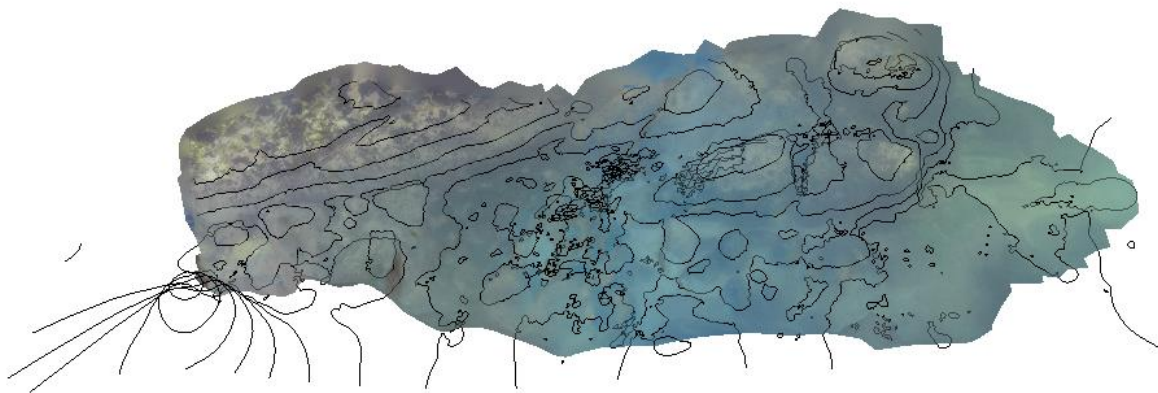


Figura 4-24 Proyección curvas de nivel sobre malla texturizada [Elaboración propia]

Una vez se ha generado el MDE y referenciado con las curvas de nivel, el programa da la opción de generar un ortomosaico. En este caso se ha decidido solapar el ortomosaico generado en el plano XY con las diferentes curvas de nivel generadas durante el proceso, ver Figura 4-25.

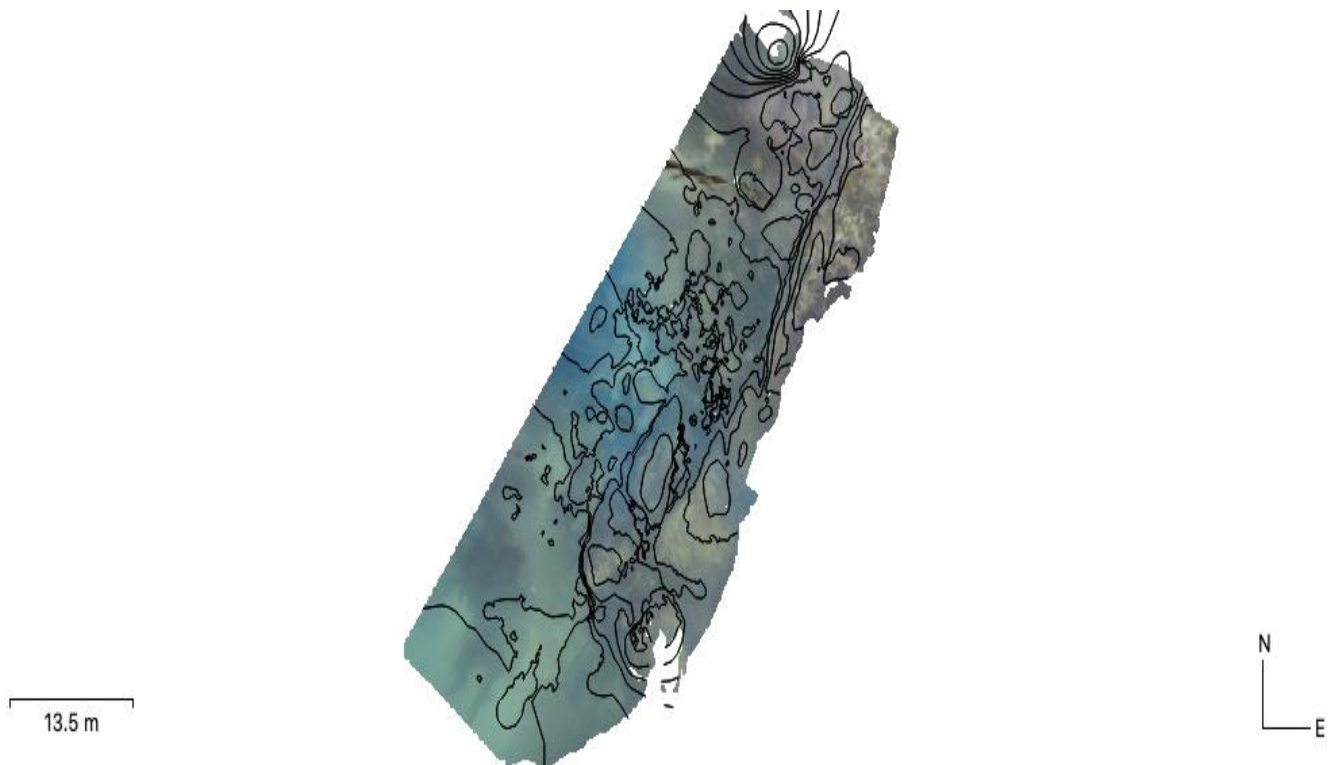


Figura 4-25 Ortomosaico referenciado con curvas de nivel

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Una vez se ha realizado el estudio de la aplicación de la fotogrametría subacuática para la caracterización de aguas someras mediante el empleo de un USV de bajo coste, se pueden determinar las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, se puede concluir que la fotogrametría subacuática representa una tecnología alternativa a las técnicas batimétricas tradicionales, siempre y cuando existan unas condiciones de buena visibilidad y unas condiciones meteorológicas favorables. Esto se ha puesto de manifiesto sobre todo en el estudio de la Zona de Pruebas II, en la cual se han realizado ensayos y periodos destinados a la toma de datos que han tenido que ser desechados debido a la poca resolución de las imágenes obtenidas en esta área.
- En cuanto al empleo de USV dotado de una cámara para la obtención de imágenes, se puede reseñar que uno de los grandes problemas durante este estudio es la cámara a emplear. La GoPro Hero 5 Black Edition tiene aspectos buenos como se puede destacar el FOV tan amplio que tiene, aspecto positivo para esta técnica batimétrica. Sin embargo, uno de los aspectos negativos a reseñar sería su GPS el cual funciona bien en el exterior, pero al sumergirlo en zonas acuáticas pierde su señal a partir de 15cm de profundidad. Este problema provocó que no fuera trackeado el USV durante la pasada, aspecto fundamental para este proceso ya que facilita la orientación y la geolocalización de las fotografías.

Esto lleva a concluir que tanto la cámara como el USV deberían de estar conectados entre sí de manera que se asocie una coordenada a la imagen a partir del GPS de la embarcación. Con esto se evitaría la pérdida de señal GPS al tenerla en el dron en la superficie del mar. Otra opción sería una cámara con una antena para sintonizar con el GPS más potente. La gran parte de las cámaras fotogramétricas empleadas para el ámbito de la arqueología son capaces de mantener la señal hasta 50 cm de profundidad.

- En cuanto al procesamiento de las imágenes mediante programas dirigidos a la fotogrametría hay que destacar la importancia de realizar el estudio en una zona que tenga puntos característicos como podría ser un arrecife o un pecio. En esos casos, el programa comete menos errores y es más fácil determinar puntos característicos en ellos. Esto se ha corroborado al realizar el estudio de la Zona de Pruebas I en la que debido al patrón que posee la piscina en todo su fondo ha creado confusión a la hora de realizar el solape entre las distintas imágenes.

Por último, recalcar que la fotogrametría es una técnica alternativa muy útil en zonas terrestres, principalmente mediante el empleo de UAV debido a que la señal GPS es superior, mayor iluminación

y visibilidad facilita la orientación de las imágenes. Sin embargo, al introducirla en el ambiente marítimo pierde capacidad en algunos momentos debido a las condiciones del medio. Este tipo de caracterización del fondo marino es más precisa de realizar mediante un USV dotado de un sonar que no es tan dependiente de las condiciones meteorológicas como puede ser la fotogrametría.

5.2 Líneas futuras

En cuanto a líneas futuras la idea fuerza permanece siendo la misma de realizar levantamiento batimétrico empleando medios no tripulados y técnicas batimétricas, aunque mejorando aspectos para dar mayor capacidad de estudio y precisión en el resultado final. Los campos de mejora serían los siguientes:

- Elaborar un USV de mayor eslora y dimensiones, por lo que tendría una mayor estabilidad y se vería menos condicionado por las condiciones meteorológicas. Una opción a valorar sería que nuestro USV pueda ser trimarán dando mejor resistencia a condiciones adversas de la mar.
- Aumentar la capacidad de manejo de manera autónoma a larga distancia, mayor distancia entre operador y vehículo. Con esto se podría potenciar el concepto actual de operaciones OTH (Over the Horizon) en las cuales de manera remota sea posible manejarlo desde el buque anfibio sin ser detectados de manera visual desde playa.
- Aumentar capacidades de autonomía de navegación del sistema dotándolo de placas fotoeléctricas u otro sistema que le permita aprovechar la energía de las olas. De esta manera pueden trabajar durante largos periodos de tiempo sin necesitar volver al buque nodriza hasta que finalicen su cometido.
- Acople de un sonar batimétrico de manera que el levantamiento utilice este sensor para ser más preciso en las mediciones y realizar un estudio hidrográfico en profundidad de la zona de desembarco. Esto daría la capacidad de ser menos dependientes de las condiciones meteorológicas.
- Dotar a nuestra embarcación de sistemas LIDAR de manera que se realice de manera simultánea el levantamiento del fondo marino y la caracterización de la zona litoral. Con ello se realizaría un modelado 3D topográfico y batimétrico de toda la zona de desembarco.
- Instalar medios de posicionamiento GPS al USV para su geolocalización desde el buque y sensores para capacitar manejo desde el mismo.

Estos son algunos de los puntos propuestos para que un sistema como este pueda comenzar a ser operado por las unidades de Infantería de Marina. Cada vez es más usual el empleo de sistemas no tripulados en los conflictos armados, por lo que en un futuro estos tipos de sistemas podrían sustituir las labores que en la actualidad se realizan de manera manual las unidades de reconocimiento.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. I. S. T. Martinez, «Reconocimiento de playa,» Escuela de buceo. Curso de Buceadores de Combate, Cartagena, 2003.
- [2] A. Española, «Armada Española. MINISDEF,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquesinfanteria/prefLang-es/01infanteria-marina-tercio-armada-tear--00zBatallonCuartelGeneral>. [Último acceso: 2 Enero 2022].
- [3] I. A. Santos, «Empleo de RPAS en apoyo a operaciones de Infantería de Marina,» Marin, 2010-2021.
- [4] «Procedimiento Operativo Vigente Reconocimiento Hidrografico de Superficie,» BCG-REC-351, 2021.
- [5] «Procedimiento de Operativo Vigente Reconocimiento de playa Administrativo,» BCG-REC-350, 2021.
- [6] «Reconocimiento Hidrografico Playa del Chorrillo,» 2022.
- [7] E. Granados, «Alfageomatics,» 6 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://alfageomatics.com/2019/06/tecnicas-de-observacion-de-la-tierra-vii-batimetria/>.
- [8] M. Á. G. Campos, « ELABORACIÓN DE BATIMETRIAS CON IMAGENES DE TELEDETECCION,» UNED, 2015-2016.
- [9] «TOFIÑO DE SAN MIGUEL,» Atlas Marítimo de España. Madrid, Depósito Hidrográfico, 1789.
- [10] «EL INSTITUTO HIDROGRÁFICO DE LA MARINA Y LOS BUQUES HIDROGRÁFICOS DE LA ARMADA ESPAÑOLA,» Foro Naval, 7 jul 2020. [En línea]. Available: <https://foronaval.com/2020/07/07/el-instituto-hidrografico-de-la-marina-y-los-buques-hidrograficos-de-la-armada-espanola/>.
- [11] «Tecnoceano,» Tecnoceano, 2005. [En línea]. Available: <https://www.tecnoceano.com/ecosonda-multihaz-multibeam.php>.

- [12] C. a. R. P. Stumpf, «“Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B,”», *Opt.Express*, 2020.
- [13] W. J. Hernandez y R. A. Armstrong, «“Deriving bathymetry from multispectral remote sensing data,”», *J. Mar. Sci. Eng*, 2016.
- [14] M. G. R. M. I. G. G. Chust, «Capacidades del lidar batimétrico HAWK EYE MK II. Teledetección: Agua y Desarrollo sostenible.», XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud, 2009.
- [15] «ArcMap,» *arcgis*, [En línea]. Available: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/types-of-lidar.htm>.
- [16] M. F. Younis, «On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry,» *sensors*, 2015.
- [17] M.Farjas, «Levantamientos Batimetricos,» de *Libro Topografia*, 2017, p. 480.
- [18] «Topografia2,» 1 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://topografia2.com/que-es-una-batimetria/>.
- [19] J. T. Dietrich, «Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry,» *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol.42, 355–364, 2017.
- [20] M. G. M. S. O. Bagheri, «. Reach scale application of uav + SfM method in shallow rivers hyperspatial bathymetry,» *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W5, Kish Island Iran, 2015.
- [21] C. K. N. C. E. David, « et al. Structure-from-Motion on shallow reefs and beaches: potential and limitations of consumer-grade drons to reconstruct topography and bathymetry,» *Coral Reefs* 40, 835–851, 2021.
- [22] J. He, J. Lin, M. Ma y X. Liao, «Mapping topo-bathymetry of transparent tufa lakes using UAV-based photogrammetry and RGB imagery,» Elsevier, Southwest University, Chongqing 400715, China, 2021.
- [23] J. S. ., D. S. ., P. G. ., L. L. Drap a, «PHOTOGRAMMETRY FOR VIRTUAL EXPLORATION OF UNDERWATER ARCHEOLOGICAL SITES,» Academia, Atenas, 2015.
- [24] J. S. G. C. A. C. D. S. S. Z. P. Drap, «Underwater cartography for archaeology in the VENUS project,» *Geomatica*, Genova, 2008.
- [25] V. F. Carranza y R. G. d. l. C. , «FOTOGRAMETRÍA SUBACUÁTICA.CONOCIMIENTO E INVESTIGACIÓN DE LOS FONDOS MARINOS DE CASTROURDIALES,» Universidad de Valladolid).
- [26] P. V. –. U. d. Alicante, «Fotogrametría Subacuática en el Pecio Bou-Ferrer,» *Patrimonio Virtual*, L’Alfàs del Pi/Alicante/España, 2019-2020.
- [27] F. Fassi, E. Nocerino y F. Menna, «Geometric and Optic Characterization of a Hemispherical Dome Port for Underwater Photogrammetry,» Vittorio M. N. Passaro, Italy, 2016.

- [28] Embention, «USV (Unmanned Surface Vehicle), aplicaciones y ventajas,» 2015.
- [29] V. G. Albesa, «Diseño y selección de materiales para un U.S.V. de control medioambiental,» 2019.
- [30] G. USS, «Dron services,» 6 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://www.dronservices.com.ar/industria-4-0/que-es-un-dron-topografico/#:~:text=En%20el%20%C3%A1rea%20de%20la,los%20movimientos%20de%20las%20tierras.>
- [31] G. USS, «Dron Services,» 9 Abril 202. [En línea]. Available: <https://www.dronservices.com.ar/industria-4-0/tecnicas-batimetricas-que-se-realizan-con-drons/>.
- [32] A. 6, «CHCNAV,» [En línea]. Available: <https://www.chcnav.com/es/product-detail/apache6-usv>.
- [33] J. C. Rodriguez, «Estudio de requisitos y posibles aplicaciones de vehiculos marinos no tripulados para la Armada Española».
- [34] «El Defensor, un buque no tripulado de diseño español,» 11 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/homsec-2015-channel/defensor-buque-no-tripulado-diseno-espanol>.
- [35] J. R. Lopez, «Modulo de control GPS de un USV empleando microcontroladores arduinos,» UVigo, Marin , 2015.
- [36] «camaras deportivas10,» [En línea]. Available: <https://www.camarasdeportivas10.com/gopro-hero-5-black/>.
- [37] J. L. Caro, «Fotogrametria y modelado 3D: un caso practico para la difusion del patrimonio y su promocion turistica,» Universidad de Malaga, Malaga, 2012.
- [38] o. A. Benavides López, J. M^a Martín Civantos y J. Rouco Collazo, «LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO Y ANÁLISIS ARQUEOLÓGICO DEL CASTILLO DE PIÑAR COMO PUNTO DE PARTIDA PARA SU CONSERVACION,» Virtual Archeology Review, Granada, 2019.
- [39] M. B. Alarcón, «Proyecto de Modelado Ermita de Nuestra Señora de La Lanzada,» Técnicas de Documentación Cartográfica 2D y 3D, 2021-2022.
- [40] A. F. M. L. A. H. Zaira Peinado Checa, «Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Agreda Soria,» Virtual Archaeology Review, Zaragoza, 2014.
- [41] E. B. A. V. MSc. Isbelia Karina Rincón Parada, «MODELADO DE OBJETOS ARQUEOLÓGICOS: UNA PROPUESTA USANDO FOTOGRAMETRÍA DIGITAL,» Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Ocaña, 2014.
- [42] M. Karina Rincón Parada y B. Arévalo Vera, «Exchangeable Image File Format Digital Photogrametry,» Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, grupo de investigación GRUCITE, Ocaña, Colombia, 2014.
- [43] Panacea, «MANUAL AGISOFT METASHAPE,» Cooperative Research.
- [44] C. A. G. Yubero, «SISTEMAS DE CONTROL Y SENSORES NAVALES,» 2021.

- [45] H. Drons, «Hispa Drons,» 19 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.hispadrons.com/principiantes/aprendizaje-consejos/partes-sistema-aereo-no-tripulado-uas/>.
- [46] «Topografia2,» 1 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://topografia2.com/que-es-una-batimetria/>.

