



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado tridimensional del terreno a partir de datos  
geomáticos y realización de maqueta 3D*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Ignacio del Cuvillo Vélez

**DIRECTORES:** Mercedes Solla Carracelas  
Carlos Casqueiro Placer

**CURSO ACADÉMICO:** 2018-2019

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado tridimensional del terreno a partir de datos  
geomáticos y realización de maqueta 3D*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

UniversidadeVigo





## **RESUMEN**

Ante la problemática y las dificultades evidentes en el planeamiento de operaciones militares basado en la interpretación de los planos altimétricos, así como las carencias que este planeamiento poseía en cuanto a representación tridimensional del terreno, el presente trabajo fin de grado, haciendo uso de distintos *software* de Sistemas de Información Geográfica (SIG) e impresión 3D, pretende recuperar una técnica ya históricamente empleada como es la realización de maquetas del campo de batalla. Se propone una metodología de procesamiento de datos totalmente gratuita a partir de datos disponibles en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y diversos *software* de licencia libre. Para ello, y como ejemplo de zona de estudio, se han realizado varias maquetas de la Isla de Tambo. Entre ellas destacan el modelo MDT (Modelo Digital del Terreno), el MDE (Modelo Digital de Elevaciones) y la batimetría de la zona, así como un ejemplo de utilización para el caso de planeamiento de una posible operación anfibia. Para finalizar, se proponen futuras líneas de acción para la mejora de esta técnica, de la misma forma que para perfeccionar el desarrollo del planeamiento de operaciones anfibias y el reconocimiento del terreno.

## **PALABRAS CLAVE**

Impresión 3D, SIG, Terreno, Batimetría, Reconocimiento, Planeamiento.



# AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecer a mi familia su apoyo incondicional y su paciencia inagotable ante tantas llamadas sin respuestas y tantos mensajes sin contestación. Nunca podré agradecerlos completamente lo que habéis hecho por mí.

Por otro lado, agradecer a mi promoción, que han sido mis hermanos y compañeros de viaje, por todos esos buenos momentos compartidos. Agradecer a la Y-3: Eduardo Linares por su sabiduría y sus argumentos de autoridad, Carlos Vila por sus mensajes de apoyo a mi TFG desde primera hora de la mañana, durante todos los días de este cuatrimestre y en especial a Eduardo Lucena por su compañía entre cortes de FreeCAD.

Además, agradecer al Instituto Hidrográfico de la Marina, en concreto al buque hidrográfico “Tofiño”, los datos batimétricos facilitados para la realización de este trabajo.

Por último, todo agradecimiento es insuficiente y nunca podré compensar de ninguna manera el trabajo y la paciencia de mis dos tutores, Mercedes Solla Carracelas y Carlos Casqueiro Placer. Muchas gracias por todo.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Motivación .....	9
1.2 Objetivos generales y específicos.....	10
1.2.1 Objetivos generales.....	10
1.2.2 Objetivos específicos .....	10
2 Estado del arte .....	13
2.1 Evolución de las técnicas de producción cartográfica.....	13
2.1.1 Los comienzos de la cartografía 2D .....	13
2.1.2 Comienzos de la construcción de maquetas para representar el relieve.....	15
2.1.3 Metodologías de fabricación de las maquetas artesanales.....	16
2.1.4 Avance de las tecnologías para la representación 3D e impresión láser .....	18
2.2 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea .....	23
2.2.1 Ortofotografía.....	23
2.2.2 LIDAR .....	24
2.3 Instituto Hidrográfico de la Marina .....	25
2.3.1 <i>EMODnet</i> .....	26
2.3.2 <i>Batimetría</i> .....	26
2.3.3 Buque Hidrográfico Tofiño.....	28
2.4 Sistemas de Información Geográfica.....	28
2.4.1 ¿Qué es un SIG?.....	28
2.4.2 Modelos SIG .....	29
2.4.3 Herramientas SIG existentes .....	30
3 Desarrollo del TFG .....	33
3.1 Descripción del caso de estudio: Isla de Tambo .....	33
3.2 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de modelos digitales del terreno	35
3.2.1 Generación MDT y curvas de nivel.....	36
3.2.2 Tratamiento del modelo 3D .....	45
3.2.3 Impresión del modelo 3D.....	46
3.3 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de los modelos digitales de elevaciones .....	47

3.3.1 *Fusión de nubes de puntos .....	48
3.3.2 Generación MDE.....	51
3.3.3 Tratamiento del modelo 3D .....	53
3.3.4 Impresión del modelo 3D.....	53
3.4 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de <i>slices</i> del MDT .....	53
3.4.1 Generación MDT.....	54
3.4.2 Tratamiento del modelo 3D del MDT .....	55
3.4.3 Suavizado del modelo 3D y generación de slices .....	56
3.4.4 Impresión de slices .....	57
3.5 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de la batimetría.....	58
3.5.1 Generación batimetría.....	59
3.5.2 Unión de la batimetría y del MDT .....	61
3.5.3 Tratamiento del modelo 3D .....	62
3.5.4 Impresión del modelo 3D.....	63
4 Resultados .....	65
4.1 Maquetas MDT.....	65
4.2 Maqueta MDE .....	70
4.3 Maqueta de los diferentes <i>slices</i> del MDT .....	73
4.4 Maqueta batimetría .....	75
4.5 Interpretación de ambas maquetas (MDT y MDE) para un desembarco anfibio.....	77
5 Conclusiones y líneas futuras .....	85
5.1 Conclusiones .....	85
5.2 Líneas futuras .....	86
5.2.1 “Cajones de arena” .....	86
5.2.2 Maquetas del terreno y tecnología AR Sandbox en el planeamiento militar.....	87
5.2.3 Aplicación en los alumnos de la ENM .....	88
5.2.4 Independencia total.....	88
6 Bibliografía.....	91
Anexo I: Plano de altimetría de la Isla de Tambo (I) .....	95
Anexo II: Plano de altimetría de la Isla de Tambo (II).....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Evolución en las técnicas de fabricación de maquetas del terreno. De izquierda a derecha, las dos primeras fotografías proceden de [3] y la tercera de elaboración propia. ....	10
Figura 2-1. Maqueta de la ciudad de Menín (Bélgica, 1702) en el <i>Musée des plans-reliefs</i> [10]....	15
Figura 2-2. Maqueta 3D de la costa de Sicilia para una operación en la Segunda Guerra Mundial [3]. ....	16
Figura 2-3. Representación del terreno a partir del método de capas [3]. ....	17
Figura 2-4. Representación del terreno a partir del método de clavos [12]. ....	17
Figura 2-5. Representación del terreno a partir del método de cintas [12]. ....	18
Figura 2-6. Representación del terreno a partir del método de caja de huevos [12]. ....	18
Figura 2-7. Técnica sustractiva a través de una fresadora [14]. ....	19
Figura 2-8. Técnica de adición [15]. ....	19
Figura 2-9. Tabla dinámica del terreno [13]. ....	20
Figura 2-10. Carl Deckard y su ayudante Joe Beaman posando para el periódico Austin American-Statesman [18]. ....	20
Figura 2-11. Proceso de impresión por estereolitografía [21]. ....	21
Figura 2-12. Proceso sinterizado selectivo por láser [22]. ....	22
Figura 2-13. Proceso de impresión por adición (FDM) [21]. ....	22
Figura 2-14. Ortofotografía aérea según [30]. ....	24
Figura 2-15. Sistema LIDAR aerotransportado [36]. ....	25
Figura 2-16. Logo batimetría del proyecto EMODnet del que es socio España. ....	26
Figura 2-17. SONAR multihaz (izquierda) y SONAR monohaz (derecha) [42]. ....	27
Figura 2-18. Buque realizando una batimetría [43]. ....	27
Figura 2-19. Buque Hidrográfico Tofiño A-32. ....	28
Figura 2-20. Ejemplo de una superposición de capas en un sistema SIG [46]. ....	29
Figura 2-21. Representación de un modelo de datos vectoriales [47]. ....	29
Figura 2-22. Representación de un modelo de datos ráster [47]. ....	30
Figura 3-1. Fotografías de la Isla de Tambo [55] [56] [57]. ....	33
Figura 3-2. Localización general de la Isla de Tambo dentro de la Península Ibérica [58]. ....	34
Figura 3-3. Localización de la Isla de Tambo dentro de la Ría de Pontevedra [58]. ....	34
Figura 3-4. Imagen del relieve y curvas de nivel de la Isla de Tambo según Iberpix [58]. ....	35
Figura 3-5. Comparación de la vegetación de la Isla de Tambo a mediados del s.XX (izquierda) y del s.XXI (derecha) [59]. ....	35
Figura 3-6. Ortofotos disponibles para nuestra zona de estudio [25]. ....	37
Figura 3-7. Extensión del terreno que abarca la ortofoto descargada [25]. ....	37

Figura 3-8. Nubes de puntos LIDARMDT05 disponibles para nuestra zona de estudio [25].	38
Figura 3-9. Extensión del terreno que abarca la nube de puntos LIDARMDT05 [25].	39
Figura 3-10. Imagen LIDARMDT05 con renderización “Gris monobanda” importada en QGIS.	40
Figura 3-11. Imagen LIDARMDT05 con renderización “Hillshade” en QGIS.	40
Figura 3-12. Modelo de curvas de nivel generado en QGIS.	41
Figura 3-13. Superposición de imagen LIDARMDT05, ortofoto y curvas de nivel en QGIS.	41
Figura 3-14. Modelo de curvas de nivel de la Isla de Tambo generado en QGIS.	42
Figura 3-15. Superposición de la imagen LIDARMDT05, ortofoto y curvas de nivel de la Isla de Tambo en QGIS.	42
Figura 3-16. Parámetros de configuración para la generación del archivo STL en QGIS.	43
Figura 3-17. Selección del terreno a exportar y configuración del modelo 3D en formato STL.	44
Figura 3-18. Comparación de archivos STL [65].	45
Figura 3-19. Modelo MDT sin suavizar.	45
Figura 3-20. Modelo MDT suavizado.	46
Figura 3-21. Interfaz del programa Ultimaker Cura.	47
Figura 3-22. Nubes de puntos LIDARMDE disponibles para nuestra zona de estudio [67].	49
Figura 3-23. Extensión del terreno que abarca la nube de puntos LIDARMDE, cara este de la isla [67].	49
Figura 3-24. Extensión del terreno que abarca la nube de puntos LIDARMDE, cara oeste de la isla [67].	50
Figura 3-25. Nube puntos unificada de la Isla de Tambo.	51
Figura 3-26. Proceso para abrir el archivo LAS en QGIS.	52
Figura 3-27. Comparación de efectos “Monobanda” y “Hillshade” sobre la nube de puntos MDE.	52
Figura 3-28. Comparación MDE sin suavizar (izquierda) y suavizado (derecho).	53
Figura 3-29. Vista previa del modelo 3D del MDS en el <i>software</i> Ultimaker Cura.	53
Figura 3-30. Comparación modelo con soporte (derecha) y modelo sin soporte (izquierda) en el <i>software</i> CloudCompare.	55
Figura 3-31. Comparación MDT sin suavizar (izquierda) con MDT suavizado (derecha).	56
Figura 3-32. Proceso para la realización de un corte con el <i>software</i> FreeCAD.	57
Figura 3-33. <i>Slice</i> 40-60 metros en formato STL en el <i>software</i> FreeCAD.	57
Figura 3-34. Vista previa del modelo 3D del <i>slice</i> de 0-20 metros en el <i>software</i> Ultimaker Cura.	58
Figura 3-35. Imagen batimetría con renderización “Gris monobanda” importada en QGIS.	60
Figura 3-36. Batimetría zona Isla de Tambo en el <i>software</i> CloudCompare.	61
Figura 3-37. MDT Isla de Tambo en el <i>software</i> CloudCompare.	61
Figura 3-38. Modelo batimétrico general en el <i>software</i> CloudCompare.	62
Figura 3-39. Suavizado modelo batimétrico general con el <i>software</i> FreeCAD.	63



Figura 3-40. Vista previa del modelo 3D de la batimetría general en el <i>software</i> Ultimaker Cura.	63
Figura 4-1. Comparación de la maqueta del MDT (factor 1) con la ortofoto de la Isla de Tambo.	66
Figura 4-2. Maqueta del MDT de la Isla de Tambo con factor de elevación 1.....	67
Figura 4-3. Maqueta del MDT de la Isla de Tambo, factor elevación 2.....	68
Figura 4-4. Comparación de la maqueta del MDT (factor 2) con la ortofoto de la Isla de Tambo.	68
Figura 4-5. Comparación de las maquetas MDT con factor de elevación 1 (delante) y 2 (detrás).	69
Figura 4-6. Comparación de las maquetas del MDT suavizada (izquierda) y sin suavizar (derecha). .....	69
Figura 4-7. Comparación de las 3 maquetas MDT.....	70
Figura 4-8. Comparación de las 3 maquetas MDT con sus respectivas alturas. ....	70
Figura 4-9. Comparación de la maqueta MDE (factor de elevación 1) con la ortofoto de la Isla de Tambo. ....	71
Figura 4-10. Maqueta MDE de la Isla de Tambo con factor de elevación 1. ....	71
Figura 4-11. Comparación de la maqueta del MDT (izquierda) con la del MDE (derecha), en planta.....	72
Figura 4-12. Comparación de la maqueta del MDT (izquierda) con la del MDE (derecha), en perspectiva.....	72
Figura 4-13. Comparación de las maquetas del MDT (izquierda) y del MDE (derecha) con sus alturas correspondientes.....	73
Figura 4-14. <i>Slice</i> de 0-20 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha). ...	73
Figura 4-15. <i>Slice</i> de 20-40 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha). .	74
Figura 4-16. <i>Slice</i> de 40-60 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha). .	74
Figura 4-17. <i>Slice</i> de 60-80 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha). .	74
Figura 4-18. Mosaico que refleja la Isla de Tambo por alturas, superponiendo <i>slices</i> . ....	75
Figura 4-19. Vista en planta de la maqueta de la batimetría.....	76
Figura 4-20. Vista en perspectiva con las zonas con mayor o menor sonda marcadas. ....	76
Figura 4-21. Vista en alzado de la maqueta de la batimetría. ....	77
Figura 4-22. Vista en alzado de la maqueta de la batimetría con factor de elevación 10.....	77
Figura 4-23. Vista en perspectiva de la maqueta de la batimetría con factor de elevación 10. ....	77
Figura 4-24. Zonas aptas para el desembarco (aptas en verde y no aptas en rojo). ....	78
Figura 4-25. Comparación del plano (izquierda) con la maqueta MDT (derecha) y los puntos dominantes del terreno marcados en esta última. ....	79
Figura 4-26. Puntos dominantes del terreno de la Isla de Tambo. ....	79
Figura 4-27. Playa Area da Illa en la maqueta MDT.....	80
Figura 4-28. Playa Area da Illa en la maqueta MDE.....	80
Figura 4-29. SAC Isla de Tambo.....	81
Figura 4-30. Localización de una posible <i>Landing Zone</i> para helicópteros (MDT). ....	82

Figura 4-31. Localización de una posible <i>Landing Zone</i> para helicópteros (MDE).	82
Figura 4-32. Batimetría Isla de Tambo.	82
Figura 4-33. Batimetría de la isla con las zonas más favorables para el movimiento de un buque marcadas en color rojo.	83
Figura 5-1. Cajón de arena preparado por la Bandera Paracaidista “Ortiz de Zárate” [70].	87
Figura 5-2. Sistema <i>AR Sandbox</i> donde se puede apreciar el escalado de colores por alturas [71].	88
Figura 5-3. UAV <i>Sacan Eagle</i> transportado en un vehículo URO VAMTAC [72].	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diagrama de procesos para la elaboración del modelo MDT [*Este proceso solo sería necesario si para abarcar la totalidad del territorio bajo estudio hiciese falta más de una nube de puntos LIDAR]. .....	36
Tabla 2. Características de la ortofoto descargada [25]. .....	38
Tabla 3. Características de la nube de puntos LIDARMDT05 descargada [25]. .....	39
Tabla 4. Diagrama de procesos para la elaboración del modelo MDE [*Este proceso solo sería necesario si para abarcar la totalidad del territorio bajo estudio hiciese falta más de una nube de puntos LIDAR]. .....	48
Tabla 5. Características LIDAR 2ª Cobertura [25]. .....	50
Tabla 6. Diagrama de procesos para la elaboración de los <i>slices</i> del modelo MDT. ....	54
Tabla 7. Diagrama de procesos para la elaboración de la batimetría. ....	59
Tabla 8. Características Batimetría. ....	60
Tabla 9. Resumen de las maquetas generadas y sus tiempos de impresión. ....	65



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Motivación

Según la doctrina de Infantería de Marina “Método de planeamiento de las operaciones, nivel táctico (A-RIM-101)” [1], en el planeamiento de una operación anfibia, y de cualquier operación táctica, es necesario el estudio y análisis de una serie de factores que determinen las ventajas y los inconvenientes de las diferentes líneas de acción que se plantean para el cumplimiento de la misión. Estos factores son los denominados Factores de la Situación, entre los que encuentra el estudio del terreno. Dicho estudio no solo abarca los aspectos militares del terreno, como la posibilidad de observación, tiro, ocultación, protección, obstáculos, avenidas de aproximación y corredores de movilidad, sino también el estudio de la vegetación, los cursos y masas de agua, las obras artificiales e incluso la naturaleza del suelo.

El estudio del terreno para el planeamiento y conducción de operaciones se realiza a través fotografías satelitales y fotogrametría aérea (obtenida por medios y unidades propias o a través de fuentes públicas), pero sobre todo este estudio se realiza a través de la cartografía y mapas topográficos de la zona donde se va a llevar a cabo la operación. Estos tipos de representaciones presentan una serie de dificultades a la hora de ser interpretados. Las principales dificultades que nos podemos encontrar se deben a la interpretación de las curvas de nivel y en el sistema de proyección cartográfico a emplear para pasar de la realidad tridimensional (3D) a su representación bidimensional (2D) en el mapa.

Con el fin de facilitar el estudio del terreno y agilizar el proceso de comprensión de las diferentes líneas de acción, históricamente y en el ámbito militar, se han realizado representaciones en 3D a gran escala del campo de batalla. Estas representaciones permitían, de manera muy rápida, determinar posiciones que estuvieran cubiertas por el fuego, memorizar la zona de acción, determinar posiciones que fueran inobservables desde diferentes puntos, o incluso llegar a clasificar diferentes zonas como *NO GO* debido, principalmente, a la dificultad que suponía para la movilidad de la unidad. Las primeras representaciones se realizaban en forma de maquetas y de manera puramente artesanal, lo que suponía la necesidad de tiempo y personal especializado en la realización de éstas. Estas representaciones obtuvieron tanta relevancia a la hora de planear que fueron usadas por los aliados en la II Guerra Mundial como fuente de información crucial en las operaciones de aterrizaje de las aeronaves en el norte de África y Normandía, entre otras. Actualmente las representaciones en 3D del terreno están incorporadas a la doctrina de los diferentes ejércitos, como en la de los Marines Americanos “*Marine Corps Planning Process (MCWP 5-10)*” [2], en la que se nos habla de representaciones en maquetas del tamaño de campos de fútbol, para comprobar la comprensión del concepto de la operación por los diferentes comandantes de las unidades.

Estas representaciones en 3D son cada vez más complejas y tediosas si se realizan de manera artesanal. Las fuentes de información actuales son mayores y el grado de precisión requerido en las operaciones también. En un ambiente tan cambiante y complejo como en el que vivimos hoy día, en el que intervienen tantos factores, la precisión y rapidez de respuesta son factores claves en las operaciones actuales. Esto implica una mayor velocidad de planeamiento lo que conlleva a la imposibilidad de realizar estas representaciones de manera manual.

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado (en adelante TFG) es la incorporación de las nuevas tecnologías en el estudio del terreno, tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el *Laser Imaging Detection and Ranging* (LIDAR), y los Modelos Digitales del Terreno (MDT) o Modelos Digitales de Superficie (MDS), consiguiendo no solo una representación más completa y precisa del terreno en formato digital, sino también una representación en formato físico a través de la impresión 3D (Figura 1-1). Aunque estas herramientas e impresión 3D ya se están utilizando con éxito en campos como la geología, arquitectura, ingeniería y arqueología entre otros, este TFG pretende analizar su potencial para el planeamiento militar, modernizando así el procedimiento habitual de interpretación del terreno a partir de mapas y cartografía analógica.



Figura 1-1. Evolución en las técnicas de fabricación de maquetas del terreno. De izquierda a derecha, las dos primeras fotografías proceden de [3] y la tercera de elaboración propia.

## 1.2 Objetivos generales y específicos

### 1.2.1 Objetivos generales

El objetivo general de este TFG consiste en desarrollar una metodología de elaboración de modelos 3D del terreno y su impresión, a partir de datos cartográficos y programas informáticos de acceso libre y gratuito para cualquier usuario. Concretando un poco más, por orden de realización, los objetivos principales son: (1) tratamiento de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) y Elevaciones (MDE) de la Isla de Tambo (en el municipio de Marín), obtenido a partir de vuelos fotogramétricos y LIDAR; (2) elaboración de la cartografía topográfica-altimétrica de la isla a través de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); (3) generación del modelo tridimensional (3D) de la isla; y (4) impresión de la maqueta mediante una impresora 3D. Asimismo, se analizará el potencial de la impresión 3D del terreno y su aplicación práctica en el planeamiento de una operación militar, y más particularmente en el ámbito de la Infantería de Marina. De llegar a implementarse dentro de la Brigada, esta metodología permitiría evaluar y reconocer el terreno en una operación anfibia, facilitando así la transmisión del concepto de la operación por parte de los mandos a sus subordinados.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilación de datos LIDAR y ortofotos gratuitos provenientes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), y posterior tratamiento de esos datos en *software* SIG.
- Aprendizaje de *software* SIG, en concreto el QGIS, para el geoprocésamiento y análisis de datos geográficos. Adicionalmente, se utilizará una extensión de QGIS, DemTo3D, que permite la conversión de nubes de puntos en formato ASC o LAS a formato STL.
- Realización de un plano altimétrico de la Isla de Tambo.

- Tratamiento de nubes de puntos en formato LAZ o LAS en el *software* CloudCompare para su fusión y cortes a diferentes alturas.
- Realización del Modelo Digital del Terreno (MDT) y de Elevaciones (MDE) a partir de nubes de puntos LIDAR.
- Aprendizaje del *software* FreeCAD, para el tratamiento de modelos en formato STL, con el fin de aplicar suavizados a las superficies de estos, así como realizar cortes horizontales (XY) a diferentes alturas para realizar “slices”.
- Aprendizaje del *software* de impresión 3D (Ultimaker Cura) para la impresión de maquetas físicas, entre las que se incluyen: MDT, MDE y cortes o “slices” del terreno.
- Caso de aplicación: estudio del terreno de una operación militar anfibia a partir de los modelos físicos impresos.
- A mayores de los objetivos inicialmente planteados en este TFG: tratamiento de datos batimétricos (SONAR) y realización de la maqueta correspondiente a la zona más próxima de la Isla de Tambo.





## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Evolución de las técnicas de producción cartográfica

#### 2.1.1 Los comienzos de la cartografía 2D

La cartografía es “el arte de trazar mapas geográficos” o la “ciencia que estudia los mapas” [4]. Estas dos definiciones son las que aparecen en la Real Academia de la Lengua Española, pero ¿Qué es realmente y cómo surgió?

Es difícil saber con exactitud cuándo y cómo surge la cartografía. Los primeros datos que se tienen acerca de la cartografía datan, según el arqueólogo Raffaello Battaglia, de la Edad de Bronce. Estos datos fueron rebatidos por muchos científicos, ya que no se consideraban una representación del terreno sino una primera representación de las constelaciones, del sol y de la luna. En cualquier caso, el ser humano siempre ha tenido la necesidad de representar el terreno de su alrededor. Solo hay que remontarse aproximadamente al 7.000 a.C., al mural de Çatal-Hüyük (Turquía) [5] considerado con certeza el origen de la Cartografía Urbana, en el que se puede ver representado un poblado cercano a un volcán que entra en erupción. Otras de las representaciones más importantes de la historia son las conocidas “tablillas de Babilonia” [5]. La más antigua data de 1.500 a.C., en la que se puede apreciar la representación de la población de Nippur, donde aparece la muralla de la ciudad, viviendas e incluso canales. Estas primeras representaciones estaban hechas sobre piedra o arcilla, sin seguir ningún tipo de escala, y realizadas a mano con la percepción que el ojo humano permitía. De estas representaciones en piedra se evolucionó a las realizadas por los egipcios en papiro, como el famoso mapa llamado el papiro de Turín (1150 a.C.), que cartografiaba las minas de oro de la época en esa zona. Esta civilización fue capaz de representar incluso las zonas que desaparecían de sus planos por culpa de los continuos desbordamientos del río Nilo [5].

De los egipcios y de las primeras representaciones de poblados y ciudades damos un salto en la historia hasta el Siglo X a.C., donde la civilización griega, con los primeros filósofos, no busca representar lo que es conocido para ellos sino lo que en ese momento era todo un enigma. El cómo era la superficie de la Tierra, las dimensiones de las masas de agua, etc., eran las principales cuestiones a desarrollar. Así nacen las primeras teorías y representaciones de la superficie terrestre y de los océanos. Durante el siglo VIII y VI a.C. el comercio tiene su auge en Grecia y las representaciones del terreno y de los mares principalmente comienzan a desarrollarse, aunque siguen siendo demasiado pobres, pues aún se pensaba entonces que la tierra era plana como un disco rodeado de agua. Es en Mileto (Grecia), en el siglo VI a.C., donde se le da este impulso a la cartografía. Según el filósofo Hecateo (500 a.C.), el primer “mapa-mundi” fue realizado por Anaximandro de Mileto [6].

Desde entonces, la cartografía no ha parado de avanzar. Las primeras representaciones por los romanos dejan de lado la necesidad de interpretar el mundo a través de los mapas para darle un carácter mucho más práctico y político. Empiezan entonces a utilizarse para representar y estudiar desde los campos de batalla hasta la construcción de sus ciudades y monumentos, creando pequeños mapas catastrales o itinerarios en papiro [6]. Destacan los estudios del filósofo Estrabón de Amasia en tiempos del emperador Augusto (27 a.C.- 14 d.C.). Y es que históricamente la cartografía ha tenido un papel fundamental en toda la sociedad. Posteriormente, con el descubrimiento de la brújula en el s.XI, y la realización de las primeras cartas náuticas a partir del s.VIII, la técnica ha seguido evolucionando. En 1503, la reina Isabel la Católica creó “La Real Casa de la Contratación de Indias”, en Sevilla. Esta casa no solo se encargaba de asuntos relacionados con el comercio, sino que se encargaba de recoger toda la cartografía realizada en el nuevo territorio conquistado. Esta cartografía le sirvió para facilitar su gobierno sobre las Américas. Este afán por cartografiar estos territorios no solo era para apoyar al gobierno de éstos, sino que además permitía planear estratégicamente aspectos como rutas óptimas para el comercio, principal fuente económica de entonces [7]. Y es que desde que la cartografía fue utilizada por los romanos y Napoleón para representar y estudiar al enemigo en el campo de batalla, ésta se convirtió en la principal fuente de inteligencia para los gobiernos y para los ejércitos [7].

El estudio cartográfico del terreno es una herramienta fundamental para el proceso de planeamiento de una operación militar. El historiador inglés Christopher Andrew (1941) demuestra que la inteligencia en las operaciones militares y políticas está más que ligada a la cartografía. La primera agencia británica de inteligencia, mucho antes del MI5 y del MI6 (*Domestic and Foreign Military Intelligence*), fue la llamada “*Depot of Military Knowledge*”, creada durante las guerras napoleónicas (1800-1815). Esta organización se encargaba de recopilar mapas topográficos del terreno para su estudio, donde no solo se ayudaban de éstos para localizar al enemigo, sino que realizaban estudios de las mejores rutas, posibles puntos y zonas con recursos, etc. Esta práctica, a pesar de su éxito, inexplicablemente se dejó de lado. El desastre militar en la guerra de Crimea por el ejército Inglés (1853-1856) es producido, además de por otros factores, por una falta importante de conocimiento topográfico de la zona. De esta lección se tomó nota, puesto que durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) no habían pasado ni 24 horas de la entrada de Inglaterra en la guerra y ya se había solicitado la actualización de la cartografía disponible de Bélgica y Francia. Con estos planos se realizó un estudio de las zonas donde las fuerzas armadas inglesas podrían combatir favorablemente. Además, se solicitó la creación de planos a escala 1:500000 de toda Inglaterra, que debían de contener aspectos como las vías ferroviarias, fronteras administrativas, ríos, etc. Todo esto con el objetivo de facilitar la defensa de Inglaterra en caso de un intento de invasión por parte de los alemanes [8].

Con el paso del tiempo, y a finales del siglo XX, el avance de la tecnología ha facilitado el trabajo y la implementación de la cartografía a través de los ordenadores, lo que se denomina cartografía digital. Este avance se vio favorecido principalmente por la aparición de los primeros programas CAD (*Computer Aid Design*), los cuales permitían diseñar y elaborar mapas. Asimismo, este avance tecnológico se expande también al ámbito espacial con el desarrollo de plataformas y sensores espaciales. De esta manera, la disponibilidad de estos datos e imágenes espaciales, así como los programas para su tratamiento y análisis, permitieron las primeras representaciones cartográficas de la superficie terrestre a gran escala. Se trata de mapas temáticos que estudian diferentes aspectos o variables del terreno, como por ejemplo cambios en los usos del suelo, expansión y desarrollo urbano, etc. Este desarrollo tecnológico y computacional evolucionó hasta la aparición de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los años 70. Estos sistemas permitían almacenar y procesar grandes cantidades de datos, lo que permitió a su vez digitalizar todos los mapas y representaciones temáticas del terreno, hasta el momento en papel, a finales de los años 90 [9]. Junto con la informatización y digitalización de la cartografía, cabe mencionar también el desarrollo tecnológico experimentado en términos de instrumentación en el ámbito de la cartografía y la topografía, lo que ofrece mayor disponibilidad de datos cartográficos de diferente naturaleza y escalas de detalle, así como las representaciones en tres dimensiones. Entre los más relevantes están la invención de la fotografía

aérea, y el desarrollo de nuevos instrumentos topográficos como los sistemas de posicionamiento global (GPS) y los sistemas Láser Escáner 3D (LIDAR).

### 2.1.2 Comienzos de la construcción de maquetas para representar el relieve

Las primeras representaciones en relieve del terreno datan del Siglo XV d.C. Estas primeras representaciones consistían en maquetas de diferentes tamaños sin escala, la mayoría de ellas en el ámbito militar. Al principio empezaron con la representación de ciudades principales, con sus murallas y fortificaciones. Esto permitía, de manera más rápida y gráfica, determinar zonas donde estas fortificaciones fueran más vulnerables y aprovechar así los puntos débiles por los que atacar. Este tipo de representaciones permitían determinar zonas cubiertas por el fuego, zonas de difícil movimiento para las tropas, alturas críticas que facilitasen la visibilidad y control de un territorio, etc. En el *Musée des plans-reliefs*, en Francia, existen centenares de estas representaciones históricas [10]. A modo de ejemplo, en la Figura 2-1 se muestra una de las muchas representaciones, en concreto la de la ciudad de Menín, en Bélgica, construida en 1702 y reconstruida en 1787.



Figura 2-1. Maqueta de la ciudad de Menín (Bélgica, 1702) en el *Musée des plans-reliefs* [10].

Posteriormente, durante el Siglo XX, las representaciones del terreno en 3D cobraron un papel fundamental durante las dos guerras mundiales. En primer lugar, y debido a la naturaleza estática de la Primera Guerra Mundial (1914-1918), eran necesarias estas representaciones para geolocalizar las posiciones enemigas y sus trincheras, y confeccionar así el plan ofensivo de las operaciones de asalto. Se trataba de representaciones físicas; maquetas del terreno a escala, siendo la más común la escala 1:20000. Incluso se creó una subdivisión que hacía las veces de agencia cartográfica nacional en Francia. Según afirma el historiador británico Peter Chasseaud (1950), se realizaban en torno a treinta y seis modelos a la semana, produciéndose un total de mil modelos al acabar la guerra [3]. Uno de los modelos más importantes fue el modelo a escala 1:2500, hecho por los *Royal Navy*, de la ciudad de Zeebrugge, en Bélgica. Este modelo sirvió para la realización del *Raid Anfíbio*<sup>1</sup> que se produjo en esa

<sup>1</sup> Raid Anfíbio: Una incursión anfibia es un tipo de operación anfibia que comprende una rápida incursión u ocupación temporal de un objetivo, para el cumplimiento de una misión asignada, seguida de una retirada planificada [74].

ciudad el 23 de abril de 1918 [11]. Este modelo no solo sirvió para el planeamiento de esta operación, sino que sirvió como ejemplo para la realización de modelos similares en la Segunda Guerra Mundial.

A medida que pasaban los años se hizo más importante la realización de operaciones combinadas entre los ejércitos de tierra, aire y armada. Estas operaciones requerían un control absoluto del terreno y del campo de batalla, y los comandantes de las unidades necesitaban que sus subordinados entendieran a la perfección su planeamiento y la idea de maniobra. Es por ello que la representación 3D, iniciada ya en la Primera Guerra Mundial (1914-1918), tiene su auge durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Estas representaciones contarían ahora con la ayuda de la fotografía aérea para aumentar la precisión del geoposicionamiento. En este caso, se trataba de maquetas 3D muy variadas, dependiendo del uso que se les quisiera dar, y podían hacerse a mayor o menor escala, con mayor o menor resolución, y enfatizar más o menos la escala vertical para proporcionar mayor sensación en el relieve. Por ejemplo, las representaciones en 3D que se utilizaban para planes estratégicos tenían una escala de entre 1:100000 y 1:500000, tenían pocos detalles, y la escala vertical podía llegar a estar multiplicada incluso por 3. Sin embargo, para las operaciones combinadas como los *Raids* de los Comandos, solían tener una escala de entre 1:1000 y 1:500, con un detalle exquisito de todos los elementos, desde playas hasta vegetación y edificaciones. Para estas representaciones se necesitaba muchísima información proveniente de las secciones de inteligencia de cada país. En la Figura 2-2 se puede observar una representación de la costa de Sicilia para la realización de un *Raid*. Este modelo fue realizado por la sección de inteligencia británica de Oriente Medio con base en el Cairo. El modelo está hecho en 10 piezas y es de 14x16 pies [3].



**Figura 2-2. Maqueta 3D de la costa de Sicilia para una operación en la Segunda Guerra Mundial [3].**

A pesar de su importancia en las dos Guerras Mundiales, con el paso del tiempo y las complicaciones en las operaciones militares, estas representaciones fueron perdiendo valor y empezaron a pasar a un segundo plano. Las intervenciones militares actuales necesitan de una gran precisión de información y una respuesta prácticamente inmediata, por lo que estos modelos artesanales no eran viables. Más recientemente, con la aparición de las impresoras 3D a finales del siglo XX y principios del XXI, y su abaratamiento en el mercado, estas representaciones físicas podrían recuperar la importancia y el uso que tuvieron antaño.

### *2.1.3 Metodologías de fabricación de las maquetas artesanales*

#### **2.1.3.1 Método de capas**

Este método consistía en el recorte de capas de un material, ya fuera madera o acero, y su apilamiento de acuerdo a las curvas de nivel. Para las curvas con alturas más elevadas se apilaba



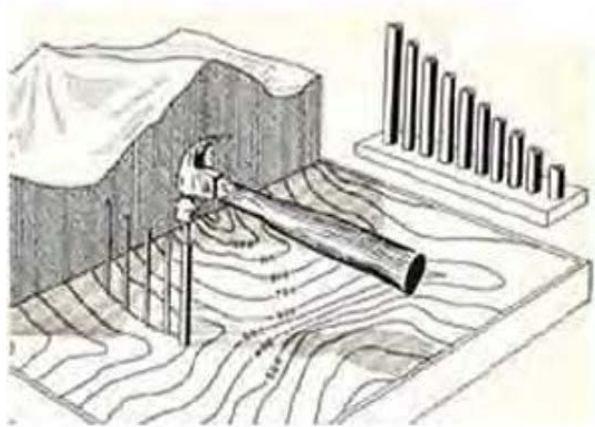
mayor material. El salto que existía entre las diferentes capas se rellenaba con un material para darle forma de continuidad a la representación.



**Figura 2-3. Representación del terreno a partir del método de capas [3].**

#### **2.1.3.2 Método de los clavos**

Consistía en medir la altura del terreno que se quería representar. Una vez medida se utilizaban unos clavos que se fijaban en una base de madera para representar las alturas de estos puntos. El espacio que existía entre la base de madera y los clavos se rellenaban con material. La precisión de este método era menor que la utilizada en el método de capas.



**Figura 2-4. Representación del terreno a partir del método de clavos [12].**

#### **2.1.3.3 Método de cinta**

Este método utilizaba cartón corrugado. Representaba las curvas de nivel con el cartón siguiendo su forma natural, y dependiendo de la altura de la curva que se representaba este cartón tenía una altura u otra. De nuevo se rellenaban los huecos para darle una forma continua.

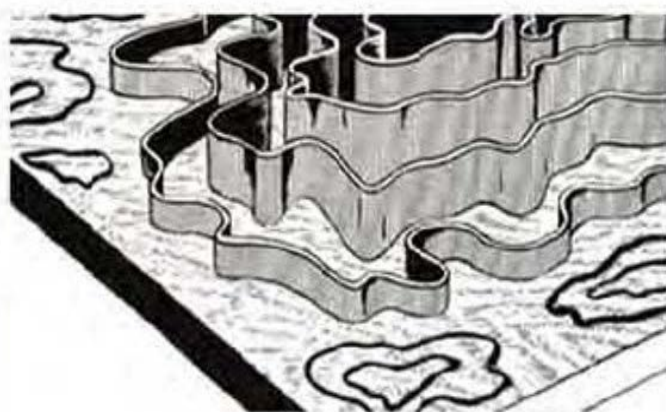


Figura 2-5. Representación del terreno a partir del método de cintas [12].

#### 2.1.3.4 Método de caja de huevos

Este método recibía su nombre por la forma que adquiría antes de que fuera rellenado. Consistía en representar el terreno por cuadrados, en cuadrados más grandes o más pequeños dependiendo de la precisión que requiriese el modelo. Este método requiere también de un relleno posterior de los huecos para proporcionar continuidad al modelo.

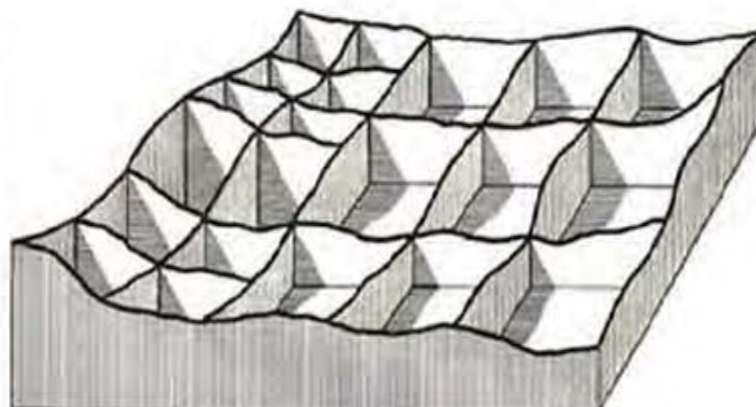


Figura 2-6. Representación del terreno a partir del método de caja de huevos [12].

#### 2.1.4 Avance de las tecnologías para la representación 3D e impresión láser

Hasta el momento se han analizado la importancia de la cartografía y sobre todo de las representaciones en 3D del terreno para el uso de estas en el reconocimiento del terreno y en el proceso de planeamiento de una operación militar. Sin embargo, todas estas representaciones estaban realizadas en forma de maquetas. Con la ayuda los ordenadores estas representaciones se simplificaron y se facilitó su uso.

Las alternativas a las maquetas artesanales son las estudiadas por los cartógrafos Felix Sutter y Stefan Räber, de la Universidad de Zurich [13], que trataremos de explicar en este apartado.

Con la llegada de los ordenadores las maquetas comenzaron a quedarse obsoletas y durante los 50s empiezan a utilizarse estos como ayuda fundamental para la creación de modelos tridimensionales del

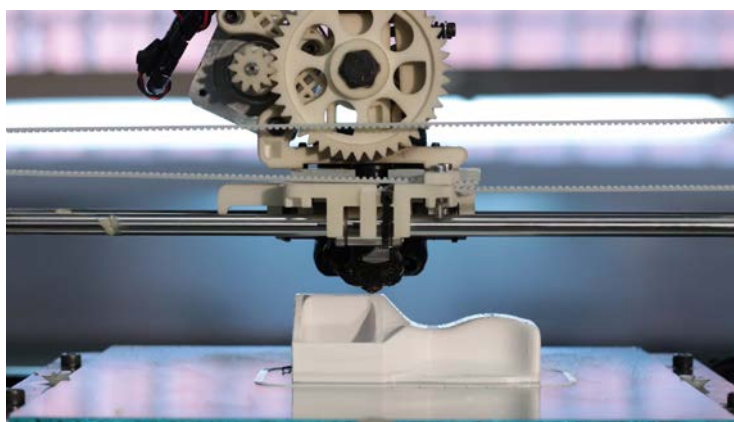
terreno. Destacan 3 técnicas: técnica sustractiva, impresión 3D a través de técnicas aditivas y técnicas dinámicas.

- **Técnicas sustractivas:** Esta es la técnica más antigua de las 3 mencionadas. Consiste en sustraer material de un bloque de yeso o plástico con la ayuda de una fresa. Gracias a los Modelos Digitales del Terreno cargados previamente en el ordenador y con ayuda de un código enviado por el ordenador a la fresa (Fresado por control numérico), podemos hacer que ésta, remueva material del bloque y nos proporcione la forma del relieve que queremos representar. Una de las principales ventajas es la posibilidad de trabajar con muchos materiales y la de realizar grandes representaciones.



**Figura 2-7. Técnica sustractiva a través de una fresadora [14].**

- **Técnicas de adición o compactación:** Esta técnica sigue el principio de añadir verticalmente capas una por una siguiendo diferentes sistemas que explicaremos más adelante como es el sinterizado láser, la estereolitografía y la deposición fundida entre los más utilizados. La ventaja que ofrece estos sistemas son la construcción de relieves complejos y con huecos que la fresa no es capaz de materializar. Actualmente está en auge gracias a las impresoras 3D y a la asequible técnica FDM (Fused Deposition Modeling).



**Figura 2-8. Técnica de adición [15].**

- **Técnicas dinámicas:** Este tipo de técnicas están todavía en evolución y estudio. No consiste en crear modelos del relieve físicos sino interactuar con ellos través de realidad virtual, lo

que permite al usuario la actualización del relieve en tiempo real y navegar a través de él como si de un simulador de vuelo o un simulador de tiro se tratara.

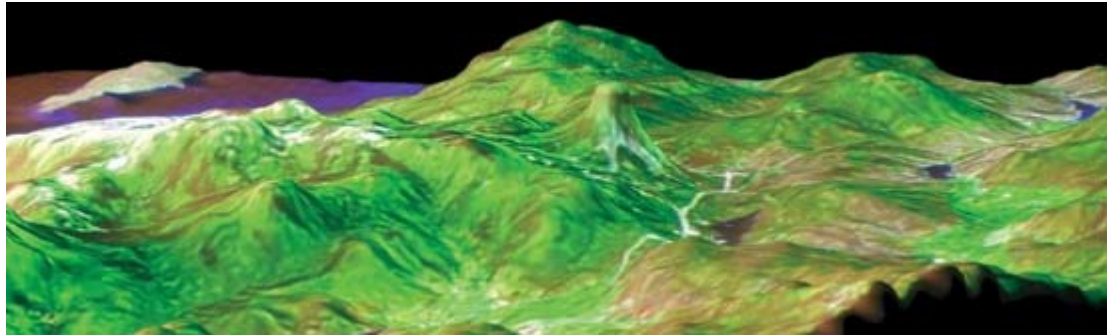


Figura 2-9. Tabla dinámica del terreno [13].

#### 2.1.4.1 Historia de la impresión 3D

Para estudiar el origen de las impresoras 3D, nos tenemos que remontar a 1986 cuando el estadounidense Charles Hull (1939-), con el fin de encontrar un sistema que facilitase la fabricación de prototipos en serie, patentó la primera máquina de estereolitografía, fundando la empresa *3D Systems*. [16] Esta técnica se encarga de utilizar una resina que es fotosensible a la luz ultravioleta, endureciéndose cuando dicha luz incide sobre ella. De esta manera se puede dar forma y endurecer capa a capa la geometría que se quiere formar.

Como es habitual en este tipo de invenciones, existe otra patente en 1986 relativa a la impresión en 3D. Este es el caso de Carl Deckard (1961-), de la Universidad de Texas en Austin, donde patentaron la impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser y fundando la empresa *DeskTop Manufacturing* [17]. Esta técnica se encarga de agrupar partículas de polvo mediante la utilización de un láser y su poder calorífico.



Figura 2-10. Carl Deckard y su ayudante Joe Beaman posando para el periódico Austin American-Statesman [18].

Por otro lado 3 años más tarde en 1989, el inventor S.Scott Crump (1953-) creó otro sistema de impresión 3D. Este sistema es llamado modelado por deposición fundida, aunque es conocido por sus siglas en inglés FDM (*Fused Deposition Modeling*) [17]. Este sistema se encarga de depositar generalmente plástico fundido en el lugar correcto para conseguir darle la forma apropiada a la pieza que queremos realizar.

La utilización y comercialización de la impresión 3D a finales de los años noventa y en la primera década de siglo XXI ha sido prácticamente nula. Esto es debido principalmente al coste que suponía estas impresiones, así como las propias impresoras. Si la aparición de la técnica FDM ya permitió un abaratamiento de la fabricación aditiva, la aparición de los proyectos DIY (*Do It Yourself*), como es el caso de *RepRap* [12], han contribuido a su generalización. El proyecto *RepRap* fue fundado entorno a



2005 por un profesor de la Universidad de Bath, Reino Unido. El profesor Adrian Bowyer (1952-) quien tuvo la idea de realizar máquinas “autoreplicantes”, es decir, utilizar las impresoras 3D para fabricar partes de sí misma y de este modo fabricar nuevas impresoras 3D. Una de las principales ventajas de este proyecto es que, a través de su página web, facilita a los usuarios la información necesaria, siendo esta abierta y gratuita; además de que los usuarios pueden poner a disposición del resto información. [17]

#### 2.1.4.2 Principales tipos de impresoras 3D

Si bien algunas técnicas ya se han citado anteriormente, veamos a continuación una clasificación de los diferentes tipos de impresoras 3D que pueden dividirse en impresoras de compactación o de adición [19].

1. Impresoras de compactación: Este tipo de impresoras compactan o fijan una masa líquida o de polvo. Dependiendo de la técnica que utilicen para compactar este material, hablaremos de estereolitografía o de sinterizado láser, que son las principales y más usadas dentro de este grupo.
  - Estereolitografía (SLA): Inventada por Charle Hull en 1986 como se comentó anteriormente. Esta técnica se encarga de solidificar una resina que se encuentra en estado líquido a través de luz ultravioleta. La luz va siguiendo el contorno y la geométrica de la pieza que queremos imprimir, en nuestro caso el relieve terrestre. Este tipo de impresoras necesitan de unos pilares que soporten la figura. Al imprimir la pieza desde la parte inferior a la superior, no tenemos nada sólido que autosostenga la pieza, pues está rodeada de resina líquida. Muy común utilizarlo en el campo de la medicina. [20]

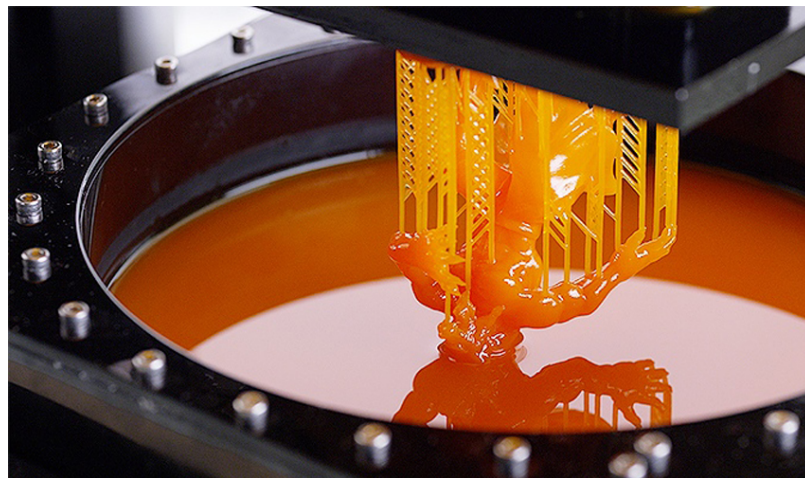


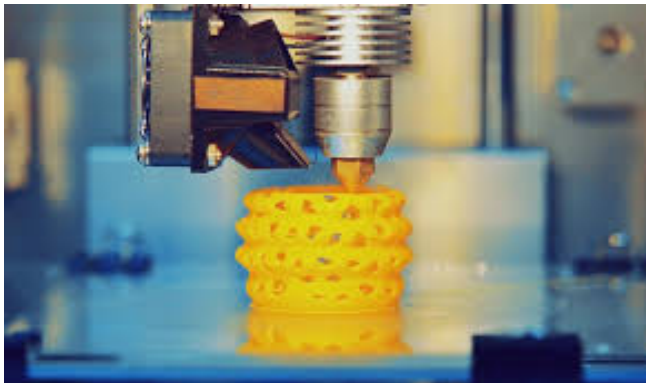
Figura 2-11. Proceso de impresión por estereolitografía [21].

- Sinterizado selectivo por láser (SLS): Esta técnica también conocida como sinterizado selectivo por láser (SLS, *Selective Laser Sinterizing*) fue inventada por Carl Deckard en 1986. Se encarga de la compactación o fijación de una masa de polvo a través de la utilización del poder calorífico de un láser. El láser va realizando la forma del relieve que queremos imprimir capa a capa. Primero se añade una capa de polvo de aproximadamente 0,1-0,2 mm y luego se aplica las pasadas del láser. Esta operación se repite continuamente hasta tener la impresión completa.



**Figura 2-12. Proceso sinterizado selectivo por láser [22].**

2. Impresoras por adición: Este tipo de impresión recibe el nombre comúnmente de FDM (*Fused Deposition Modelling*) aunque también es conocido como FFF (*Fused Filament Fabrication*). Este sistema calienta un polímero y a través de una boquilla va expulsándolo dando forma al relieve que queremos imprimir. Esta boquilla es controlada a través de un ordenador y se mueve en torno a los 3 ejes. El plástico se enfría y se endurece al salir de la boquilla para poder pegarse a la capa que tiene inmediatamente por debajo. Este tipo de sistemas permite utilizar una gama más amplia de materiales, además de su principal ventaja que es su bajo coste.



**Figura 2-13. Proceso de impresión por adición (FDM) [21].**

Dentro de este tipo de impresiones podemos encontrar técnicas que son englobadas como FDM a pesar de tener algunas particularidades:

- Tecnología LOM: Laminated Object Manufacturing. Esta técnica utiliza láminas de papel o láminas de plástico muy finas que se van prensando con un rodillo caliente y se van superponiendo para dar forma al relieve.
- Tecnología LENS: Laser Engineered Net Shaping. Esta técnica consiste en fundir polvo (normalmente de materiales metálicos) que aplicado por una boquilla, con una fuente de energía como un láser. Puede parecerse a un tipo de soldadura. Permite la aplicación de varios materiales en una única pieza.

## 2.2 Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) es la organización que se encarga de la obtención de ortofotos aéreas y datos LIDAR del territorio nacional. La Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas fueron las encargadas de cooperar y financiar este proyecto. Asimismo, la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), junto con el Ministerio de Fomento, son los encargados de la dirección de esta organización [23].

Esta organización obtiene los datos geográficos al máximo de detalle y, al formar parte de la Directiva Inspire (Infraestructura de Información Espacial en la Comunidad Europea) [24], se encarga de compartirllos de manera gratuita a partir del centro de descargas del IGN [25].

Los productos PNOA que se pueden encontrar van desde fotogramas y ortofotos digitales de máxima actualidad hasta fotogramas ortofotos históricas, además de nubes de puntos LIDAR de los denominados Modelos Digitales de Elevaciones y Modelos Digitales del Terreno. Las características más significativas de estos productos son:

1. Fotogramas digitales a color, que se van actualizando cada dos años aproximadamente y que cuentan con la incorporación de un sistema GPS (*Global Positioning System*) como apoyo cinemático. Vuelo fotogramétrico equivalente a una escala de vuelo 1:15000 (PNOA25) y 1:30000 (PNOA50).
2. Ortofotos digitales en color de dos categorías: 50 centímetros y 25 centímetros de tamaño de *pixel*. Con estas resoluciones las escalas cartográficas que se pueden obtener son de 1:10000 y 1:5000 respectivamente.
3. Mosaicos PNOA. A partir de las ortofotos aéreas se han generado mosaicos por hojas a escala 1:50000.
4. Nubes de puntos LIDAR de elevaciones (Modelos Digitales de Elevaciones, MDE) con paso de malla de 200, 25 y 5 metros y una precisión altimétrica de 1-2 metros.
5. Nubes de puntos LIDAR a nivel de terreno (Modelos Digitales del Terreno, MDT) con paso de malla de 200, 25 y 5 metros y una precisión altimétrica de 1-2 metros.

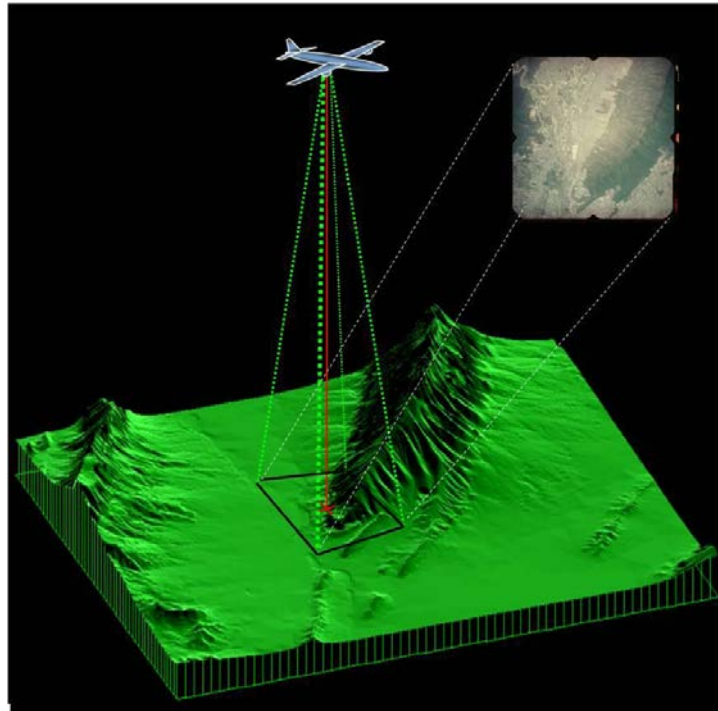
### 2.2.1 Ortofotografía

Según la *American Society of Photogrammetry* [26] la fotogrametría es la ciencia que permite extraer información de diferentes cuerpos y de aquello que les rodea mediante grabaciones, mediciones e interpretación de imágenes fotográficas. El reconocimiento del terreno mediante esta técnica ha ido evolucionando históricamente, no solo en el ámbito civil sino también en el ámbito militar. Los primeros experimentos de la técnica fotogramétrica se basaron en la toma de fotografías aéreas desde globos aerostáticos. La primera ascensión en globo se hizo en el año 1783, pero hubo que esperar casi 75 años para poder obtener la primera fotografía aérea propiamente dicha, realizada por el francés Felix Tournadion en el año 1858 [27]. Ya por entonces, militarmente hablando, esta técnica fue considerada de gran importancia, pues permitía no solo la toma de fotografías aéreas que corroboraban la cartografía que existía en la época, sino también de puntos de observación desde los que controlar a unidades propias, vigilar posiciones defensivas e incluso servir como puntos de observación para la corrección del tiro de artillería. Un ejemplo de su importancia es el uso de estos globos en el conflicto norteafricano en 1909, gracias a los cuales se realizaron reconocimientos y cartografía de la zona del monte Gurú que debido a su relieve suponía un peligro constante de emboscadas para las tropas españolas [28].

Sin embargo, la fotografía aérea no puede utilizarse como un mapa o un plano ya que para su representación emplea una perspectiva cónica y no ortogonal, lo que hace que las geometrías aparezcan deformadas. La invención de la aviación (1903), el desarrollo de la primera Guerra Mundial

(1914-1918) y la teoría de Theodor Sheimpflug (1865-1911) en 1903, ex-capitán del ejército del aire pionero e inventor de la fotogrametría, impulsan la necesidad de la creación de la ortofotografía. Una ortofotografía se genera a partir de un conjunto de imágenes aéreas corregidas mediante un proceso de “Rectificación Diferencial”. De este modo se representa una proyección ortogonal sin efectos de la perspectiva, sobre la que se pueden realizar mediciones exactas, a diferencia de una fotografía aérea simple o fotograma que siempre presentará inexactitudes causadas por:

1. El sistema de proyección que estamos utilizando.
2. El relieve del terreno que estamos capturando.
3. La altura y la velocidad en la que se mueve la cámara.
4. Por la inclinación y los errores producidos por el objetivo de la cámara empleada [29].



**Figura 2-14. Ortofotografía aérea según [30].**

La ortofotografía la podemos clasificar en analógica o digital. Siendo esta última más reciente y que ha desplazado casi por completo a la analógica, automatizando casi por completo el proceso de obtención de ortofotos. Una ortofoto ha conseguido unir todas las ventajas que tenía una fotografía aérea y todas las que reunía un mapa, al permitirnos medir distancias a la vez que tenemos una visión real del terreno.

Más recientemente, la incorporación de los sistemas GPS en las aeronaves impulsó el desarrollo de proyectos en el que se utilizan vehículos aéreos no tripulados para la toma de ortofotografías. Estos sistemas cuentan con numerosas aplicaciones tanto en el ámbito civil como en el militar, desde la facilidad para la realización de cartografía hasta la observación y seguridad de un territorio [31].

### 2.2.2 LIDAR

El sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) es un sistema de detección y medida de luz, compuesto por un láser escáner aerotransportado, un GPS y un Sistema Inercial de Navegación (INS). De esta manera, el láser escáner emite pulsos de luz infrarroja que sirven para determinar la distancia entre el sensor y el terreno. Esta distancia se combina con la medición del sistema GPS y la trayectoria de la aeronave medida con el INS, obteniendo así las coordenadas 3D del terreno. Este sistema se transporta en aeronaves parecidas a las utilizadas en la fotogrametría aérea, y actualmente cada vez más en UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Pero a diferencia de la fotogrametría aérea, estos sistemas

no necesitan corrección por el sistema de proyección o la inclinación de la aeronave con respecto al suelo, con la ventaja además de poder trabajar en situaciones de visibilidad reducida (condiciones de luz baja). Ésta no es su única ventaja, ya que al ser un sistema activo permite la penetración del láser a través de, por ejemplo, las hojas de los árboles. Sin embargo, este sistema también tiene errores, y son provenientes principalmente del error asociado al equipo GPS empleado y de la unidad que motoriza la dirección a la que el láser está siendo apuntado. Aunque la precisión del sistema está también ligada con la altura de vuelo de la aeronave. Normalmente el error horizontal (x,y) es mayor que el error vertical (z).

Actualmente, los sistemas más modernos pueden capturar alrededor de 1.000 puntos por segundo, lo que equivaldría a más de 10.000.000 puntos durante una hora de vuelo; siendo además capaz de cubrir 1.000 kilómetros cuadrados en menos de 12 horas [32].

Estos sistemas no solo se pueden transportar en aeronaves, sino también en plataformas terrestres (estáticas o móviles), sirviendo para conseguir representaciones en tres dimensiones del terreno, edificaciones, etc. Esta aplicación se usó por ejemplo para la reconstrucción y renovación de los planos de la Alhambra y el Generalife de Granada, donde se consiguió digitalizar y representar el modelo 3D de estas dos obras arquitectónicas [33]. Otras aplicaciones de este tipo de sistemas son el estudio del terreno en caso de catástrofes naturales y el estudio de los recursos forestales [34]. Cabe mencionar también su empleo dentro de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), puesto que a partir de los datos capturados mediante un sistema LIDAR se puede generar de manera más rápida y precisa el modelado 3D de la superficie de planetas como Marte y satélites como la Luna, planificando así el aterrizaje de los distintos dispositivos que se envían para sus estudios [35].

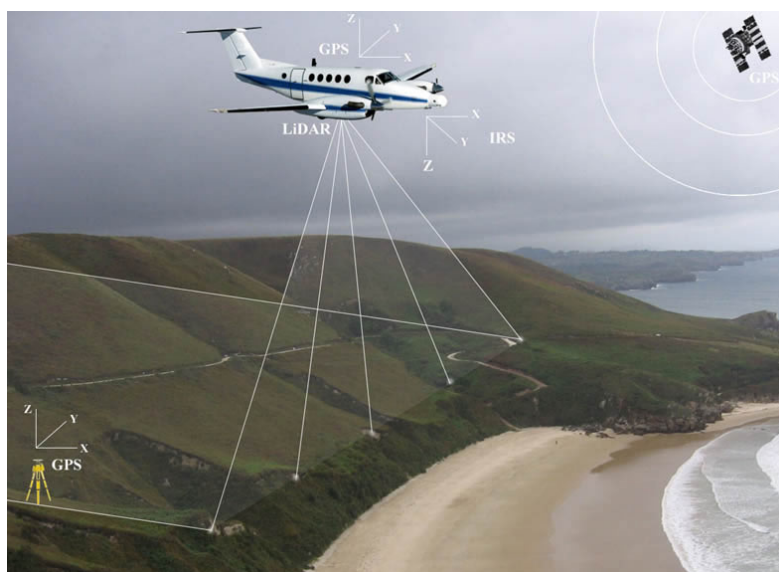


Figura 2-15. Sistema LIDAR aerotransportado [36].

## 2.3 Instituto Hidrográfico de la Marina

El Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) es la organización militar que se encarga de velar por la seguridad náutica de los buques mediante el estudio y la difusión de la información sobre el mar y el litoral, para contribuir además con la Ciencia Náutica. El IHM fue creado en 1943 y desde entonces tiene su sede en Cádiz [37]. Sus cometidos principales son:

- Estudio del relieve submarino, así como de los levantamientos hidrográficos de las costas españolas y de aquellas asignadas al estado español por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI).
- Observación de los fenómenos que afectan a la navegación.
- Estudio, elaboración y distribución de las cartas náuticas.



- Recogida de datos y distribución de los mismos ante cualquier peligro que pueda afectar a la navegación.
- Realización de todo tipo de trabajos de carácter hidrográfico que pueda ser de interés para la Armada.

### 2.3.1 EMODnet

El Instituto Hidrográfico de la Marina forma parte de un proyecto de la Unión Europea llamado EMODnet (Figura 2-19). Este proyecto consiste en conseguir una política marítima común para finales de 2020, recopilando datos dentro de 7 sectores diferentes y haciendo públicos la mayoría de estos con carácter general. Los 7 sectores son: Geología, Biología, Física, Química, Hábitats, Actividad Humana y Batimetría. España participa con el Instituto Hidrográfico de la Marina y con sus buques hidrográficos (que se explicarán más adelante) en la obtención de los datos batimétricos. Estos últimos datos son accesibles a través de su centro de descargas, los cuales pueden obtenerse seleccionando la localidad o seleccionando manualmente de la zona de interés [38].

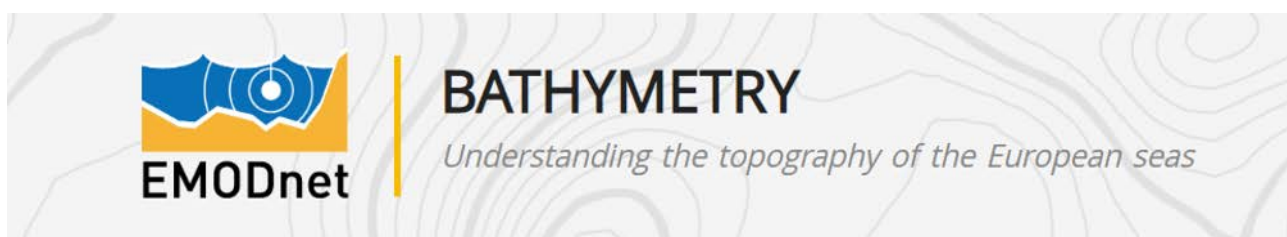


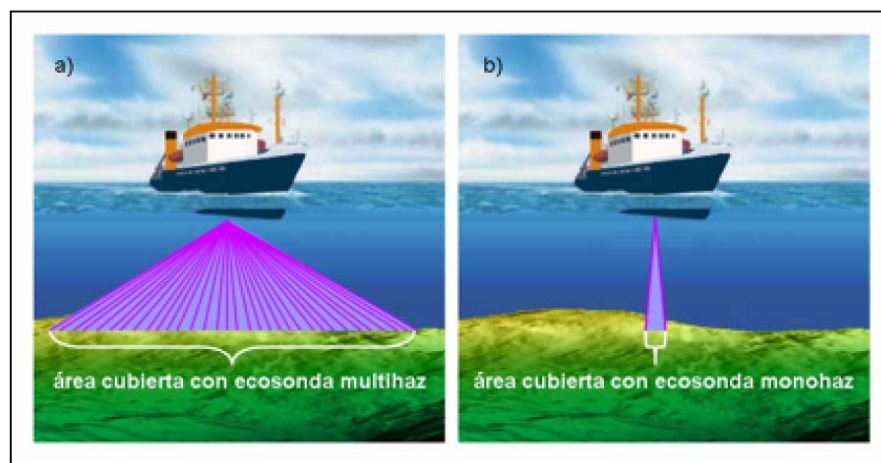
Figura 2-16. Logo batimetría del proyecto EMODnet del que es socio España.

### 2.3.2 Batimetría

La batimetría consiste en determinar el relieve de la superficie submarina de la misma manera que se determina el de la superficie terrestre. La Real Academia de la Lengua define batimetría 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” [39]. Para determinar el relieve de la superficie marina es necesario las coordenadas (x,y,z). Históricamente la batimetría se realizaba con una cuerda unida a una pieza de plomo que se dejaba caer hasta que tocaba el fondo. Este método hacía que hubiera que medir por separado, primero la posición en la superficie (x,y) y luego la altimetría (z). Con la llegada del GPS y el SONAR (*Sound Navigation And Ranging*) este método puede realizarse simultáneamente [40].

El SONAR (*Sound Navigation And Ranging*), es un aparato que permite determinar el fondo submarino a través de ondas acústicas. Este aparato consta de un transmisor y un receptor, este último mide el tiempo que recorre la onda desde que sale del transmisor para determinar la profundidad del fondo. Una de las desventajas que posee el SONAR es que puede darnos una medida errónea si se interpone cualquier objeto entre la embarcación y el fondo. Al cálculo del fondo submarino se le denomina sondear [41]. Los principales tipos de SONAR son:

- SONAR de barrido lateral: se utiliza para realizar levantamientos fisiográficos y reconocer el fondo marino para la deposición de minas.
- SONAR multihaz: realiza pasadas de forma continua. Se utiliza para abarcar zonas de trabajo muy amplias, de hasta 300 metros. Estos equipos son capaz de garantizar prácticamente el 100% de la superficie que se sondea.
- SONAR monohaz: no ofrece medición en continuo. Necesita hacer interpolaciones ya que no realiza pasadas de forma continua.

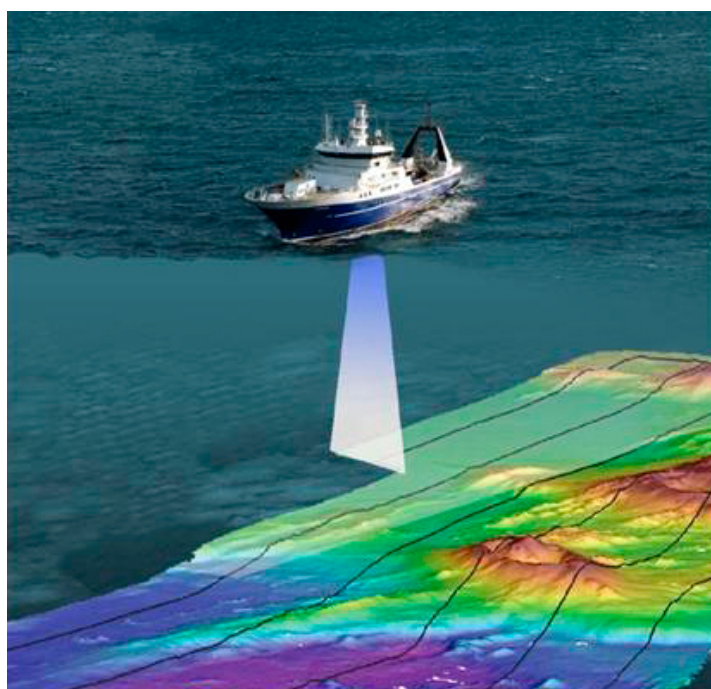


**Figura 2-17. SONAR multihaz (izquierda) y SONAR monohaz (derecha) [42].**

Cuando se realiza el cálculo del relieve de la superficie terrestre, el sistema de referencia es el nivel de mar. Sin embargo, cuando se realiza un sondeo, no se puede tomar siempre este sistema de referencia ya que se tiene que tener en cuenta factores como la meteorología, el oleaje y las mareas entre otros. Este cálculo es una de las principales dificultades con las que cuenta el proceso de sondeo (Figura 2-18).

Los principales sistemas de sondeo son [41] :

- Por líneas paralelas: Este sistema toma mediciones a través de líneas normales perpendiculares a la línea de costa. Una de las principales desventajas de este proceso es que dependiendo de la precisión con la que se haga, no se tendría información del fondo entre línea y línea. Por lo tanto, estas alturas entre líneas deberán interpolarse.
- Líneas radiales: Esta técnica se utiliza cuando la zona de costa que se quiere estudiar es muy irregular y no se podrían trazar líneas paralelas.



**Figura 2-18. Buque realizando una batimetría [43].**

### 2.3.3 Buque Hidrográfico Tofiño

El buque Hidrográfico Tofiño A-32 es uno de los buques hidrográficos pertenecientes a la clase “Malaspina” y bajo el mando del comandante director del Instituto Hidrográfico de la Marina en Cádiz, además de estar encuadrados en la Fuerza de Acción Marítima de la Flota (Figura 2-19). Su principal misión es la adquisición de datos batimétricos para permitir la elaboración Cartografía Náutica Oficial de España. El buque Hidrográfico Tofiño cuenta con sonares multihaz y monohaz (de la casa *Simrad*), que le permiten operar en aguas de hasta 5.000 metros de profundidad [44].



Figura 2-19. Buque Hidrográfico Tofiño A-32.

## 2.4 Sistemas de Información Geográfica

### 2.4.1 ¿Qué es un SIG?

La definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG), según el IGN, es la siguiente: “un conjunto de *hardware* y *software* diseñados para representar y gestionar grandes volúmenes de datos georreferenciados mediante coordenadas espaciales”. Todo esto gracias a la integración de las llamadas Tecnologías de la Información (TI) con la Información Geográfica (IG). Que un dato esté georreferenciado quiere decir que se liga a una posición en la superficie del terreno. [45]

Los SIG surgieron ante la necesidad hoy día de geolocalizar, gestionar, estudiar y transformar la información geográfica. Los SIG no solo son archivos donde almacenar la información geográfica, sino que permiten analizarla para obtener respuestas rápidas y automáticamente. En un SIG la información está almacenada y organizada en diferentes capas temáticas que se van superponiendo una encima de otra (Figura 2-20). En cada capa se representa una variable o atributo del terreno (usos del suelo, elevaciones, parcelas, etc.). De esta manera, la relación entre la información de las distintas capas y su geoprocesamiento (análisis espacial) es mucho más sencilla y rápida. Cabe mencionar también que cada capa temática tiene dos componentes: una componente espacial o geográfica (modelo en formato ráster o vectorial) y una componente temática (base de datos con valores alfanuméricos o atributos).



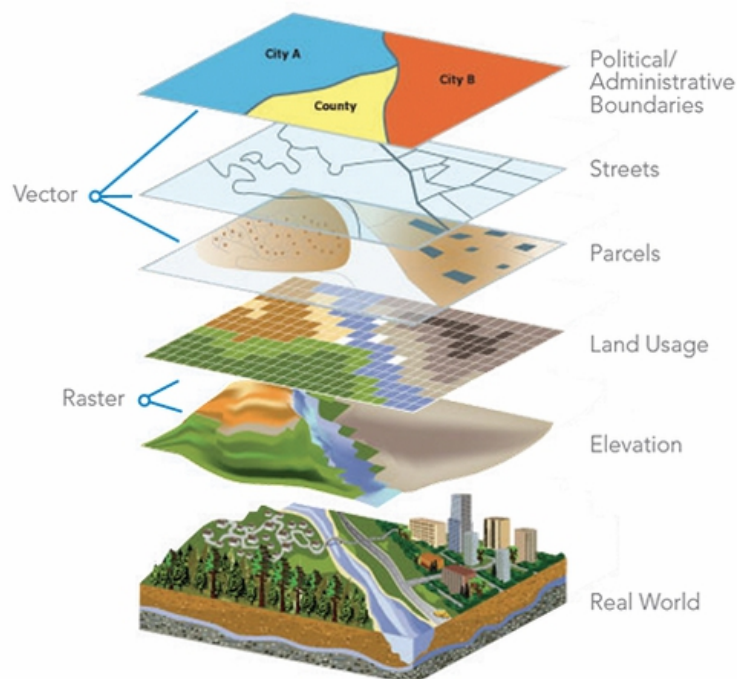


Figura 2-20. Ejemplo de una superposición de capas en un sistema SIG [46].

### 2.4.2 Modelos SIG

La mayor parte de la información que existe la podemos representar de manera vectorial (mediante puntos, líneas y polígonos) o de manera ráster (celdas o píxeles). Por lo tanto, en los SIG tendremos dos modelos de datos:

1. Modelo de datos vectorial: Para poder modelar el terreno utiliza tres tipos de elementos: línea, punto y polígono (Figura 2-21). Los puntos pueden representar ubicaciones, las líneas representan elementos que tengan esa característica como ríos y caminos, mientras que los polígonos representan elementos cerrados como parques o edificaciones. Los modelos vectoriales los podemos organizar tanto espacialmente como temáticamente, motivo por el cual están compuestos por dos componentes, uno que almacene los datos espaciales y otro con los datos temáticos. Para poder establecer conexión entre ambas bases de datos es necesario que cada objeto o elemento tenga un identificador digital.

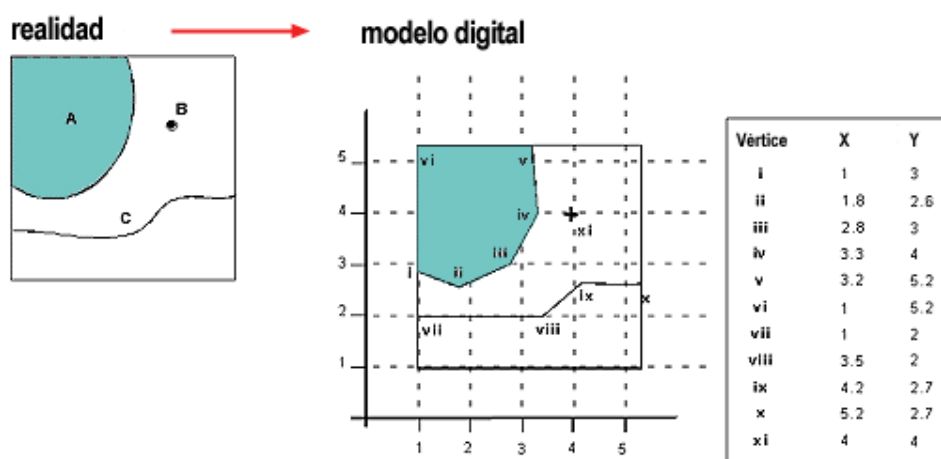


Figura 2-21. Representación de un modelo de datos vectoriales [47].

2. Modelo de datos ráster: En este tipo de modelos la zona de estudio se divide en una serie de unidades mínimas (celdas o píxeles). La geolocalización de la celda viene implícita en la misma, mientras que la celda también puede contener información sobre varias variables temáticas (lo habitual es que se trate una única variable). La división del modelo en unidades mínimas se lleva a cabo de forma sistemática de acuerdo a algún patrón; las celdas son contiguas entre sí, cubren todo el espacio, y no se solapan (Figura 2-22). Se trata pues de una malla regular dividida en filas y columnas que forman una rejilla compuesta por cuadriláteros del mismo tamaño. A menor tamaño de celda, mayor resolución o detalle de información.

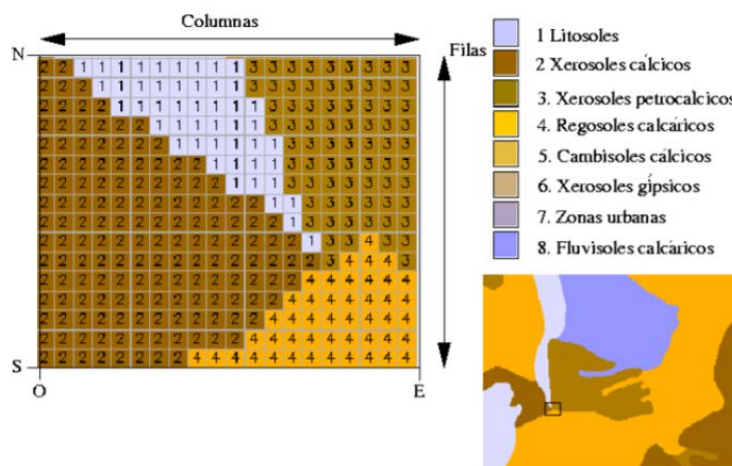


Figura 2-22. Representación de un modelo de datos ráster [47].

### 2.4.3 Herramientas SIG existentes

A continuación, se presenta un listado de *software* SIG más comúnmente empleado para el análisis del terreno:

1. ArcGIS: Creado por la compañía “*Enviromental Systems Research Institute (ESRI)*”. Para poder comunicarse con bases de datos y servidores utiliza estándares abiertos en lenguaje SQL (*Structured Query Language*) para recuperar, almacenar y manipular los datos en sus bases de datos y XML (*Extensible Markup Language*) para etiquetar y organizar documentos. Esta herramienta constituye un sistema integrado completo para poder analizar e integrar la información geográfica. Se trata de un *software* de pago [48].
2. GRASS GIS: Creado por la compañía “*Open Source Geospatial Foundation*”. Programa comúnmente conocido como “La Hierba”. Se trata de un *software* gratuito principalmente empleado en el ámbito académico gracias a su sencillez para el análisis y tratamiento de la información geográfica [49].
3. GvSIG: Creado por la Comunidad Valenciana. Aplicación para análisis y manejo de la información geográfica de manera fácil, potente y con licencia GNU GPL (*General Public License*) que permite modificar, reescribir, estudiar y organizar datos geográficos. el *software* empleado. Se trata de un *software* gratuito y de código libre, lo que permite su distribución y mejora por parte de cualquier usuario. Destaca por tener una aplicación para móviles (*gvSIG Mobile*) [50].
4. Geomedia: Creado por la compañía “*Intergraph Seguridad, Gobierno & Infraestructuras (SG&I)*”. Es un *software* que a la hora de trabajar permite conectarse a varias bases de datos de diferentes SIG a la vez, permitiendo así mucha flexibilidad y adaptabilidad [51].

5. OpenJump: Creado por la compañía “*Vivid Solution*”. Es un *software* escrito en lenguaje Java y con código abierto, por lo que se mantiene y actualiza por usuarios de todo el mundo. Sin embargo, presenta algunas limitaciones en cuanto al trabajo con imágenes, su principal fuerte es editar geometrías y atribuciones de diferentes datos [52].
6. Quantum Gis (QGIS): Creado por “*Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)*”. Un sistema con licencia GNU GPL (General Public License). Soporta numerosos formatos y puede ejecutarse sobre diferentes sistemas operativos como Windows, INUX, Mac OS, incluso Android [53].

Los tres *software* más utilizados son ArcGIS, QGIS y gvSIG. Estos *software* han estado compitiendo en el mercado por hacerse un hueco y ser el líder en esta categoría.

#### **2.4.3.1 Comparativa ArcGIS, QGIS y gvSIG**

Estos *software* son muy parecidos, pero tienen una serie de ventajas y desventajas uno con respecto al otro, sin existir realmente una respuesta correcta a la hora de decidirte por alguno. Normalmente, cuando se habla de geoprocesamiento suele salir ganando el *software* ArcGIS con respecto a las otras dos, ya que tiene muchas herramientas para realizar topología. Sin embargo, tanto QGIS como gvSIG, en especial gvSIG, ha incorporado multitud de funcionalidades de este tipo. Las tres herramientas ofrecen conexión con servicios WFS (*Web Feature Service*), servicio que se encarga de facilitar datos geoespaciales a través de internet, o servicios WMS (*Web Map Service*), un servicio que permite importar al programa SIG mapas topográficos referenciados. Sin embargo, este proceso es mucho más sencillo en QGIS o gvSIG que en ArcGIS, ya que los dos primeros lo hacen directamente desde la interfaz del programa; mientras que con ArcGIS para acceder a estos datos se debe hacer una petición a algunas extensiones suyas como ArcCatalog. Una ventaja de ArcGIS es que los tiempos de procesado son menores que en los otros dos *software*. Una de las principales desventajas que tiene gvSIG es que tiene una cantidad limitada de memoria Java, y cuando esta se llena no permite cargar más datos y solicita al usuario que reinicie el programa. Además, los tres tienen un gran cargamento de videotutoriales en internet. ArcGIS únicamente puede instalarse en el sistema Windows, gvSIG se puede instalar en Windows, Linux y Mac OS, y QGIS, además de estos, se puede instalar en Unix e incluso Android. Una ventaja que poseen QGIS y gvSIG con respecto a ArcGIS es que son gratuitos. ArcGIS tiene un coste de alrededor de 5.000 euros [54].



## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Descripción del caso de estudio: Isla de Tambo

La Isla de Tambo es una isla propiedad del Ministerio de Defensa, aunque desde 2002 se intenta que pase a manos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, proceso que actualmente está paralizado. Cuenta con una superficie de casi 280.000 metros cuadrados y tiene dos puntos que la caracterizan singularmente; el Monte San Facundo de 80 metros de altura y la punta de Tenlo Chico, un istmo rocoso en el que se encuentra su faro. Los primeros textos que hacen referencia a la isla son de la época del emperador Justiniano (530 d.C), desde entonces, lo que es historia y leyenda queda a interpretación de cada cual.



**Figura 3-1. Fotografías de la Isla de Tambo [55] [56] [57].**

La localización general de la Isla de Tambo se encuadra en la Provincia de Pontevedra, entre los Municipios de Marín y Poio, al noroeste de la Península Ibérica y al suroeste de la Comunidad Autónoma de Galicia (Figura 3-2).





Figura 3-2. Localización general de la Isla de Tambo dentro de la Península Ibérica [58].

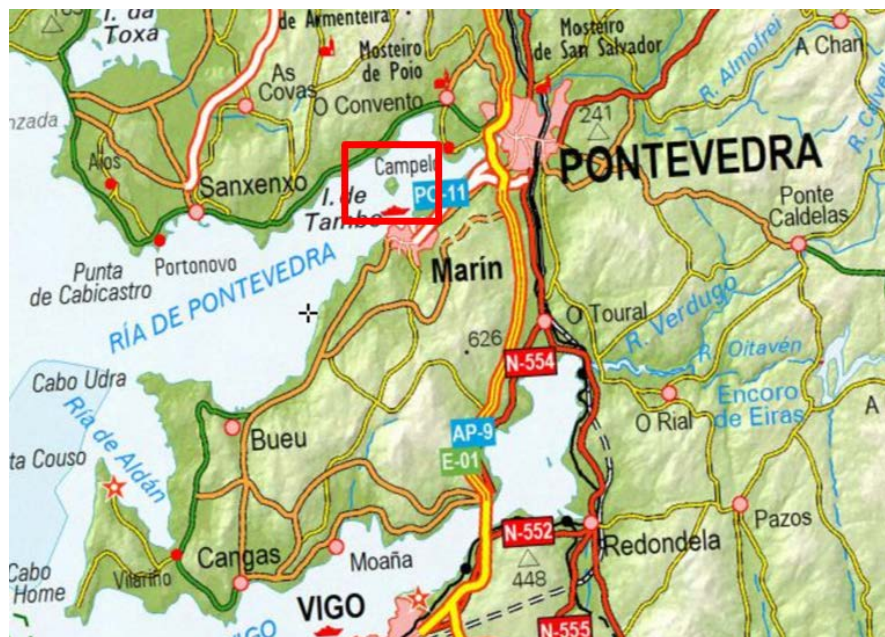


Figura 3-3. Localización de la Isla de Tambo dentro de la Ría de Pontevedra [58].

En la isla predominan las paredes acantiladas salvo por su parte noreste, donde se encuentra la playa Area da Illa, aproximadamente de 180 metros de longitud y con una profundidad o anchura de 25 metros aproximadamente. En la zona este se encuentra un pequeño y antiguo embarcadero de piedra. La isla en la zona sur tiene su punta más característica denominada la Punta de Tenlo Chico, donde se encuentra su faro. En cuanto a su relieve y alturas, la zona con más pendiente es la que se encuentra en la zona sur-oeste, con un 47% de pendiente. La parte norte es la que cuenta con menos alturas y con las curvas de nivel más espaciadas. En esta zona de menor relieve se encuentran una serie de construcciones en ruinas, entre las que destaca una antigua iglesia y pequeñas construcciones que sirvieron como almacén de pólvora hasta el 2002 [59].



Figura 3-4. Imagen del relieve y curvas de nivel de la Isla de Tambo según Iberpix [58].

En cuanto a la vegetación, encontramos dificultades para obtener información al respecto debido a que es una zona privada de uso militar. El Mapa Forestal de España (MFE) [60] no dispone de datos sobre la isla. Sin embargo, consultando los datos del Corine Land Cover, nos clasifica la vegetación de la isla como bosque mixto. Se trata de plantaciones de repoblación con eucalipto (*Eucalyptus Globulus*) y pino marítimo (*Pinus Pinaster Ait*). En la Figura 3-5 se puede observar un aumento de vegetación en el último siglo.



Figura 3-5. Comparación de la vegetación de la Isla de Tambo a mediados del s.XX (izquierda) y del s.XXI (derecha) [59].

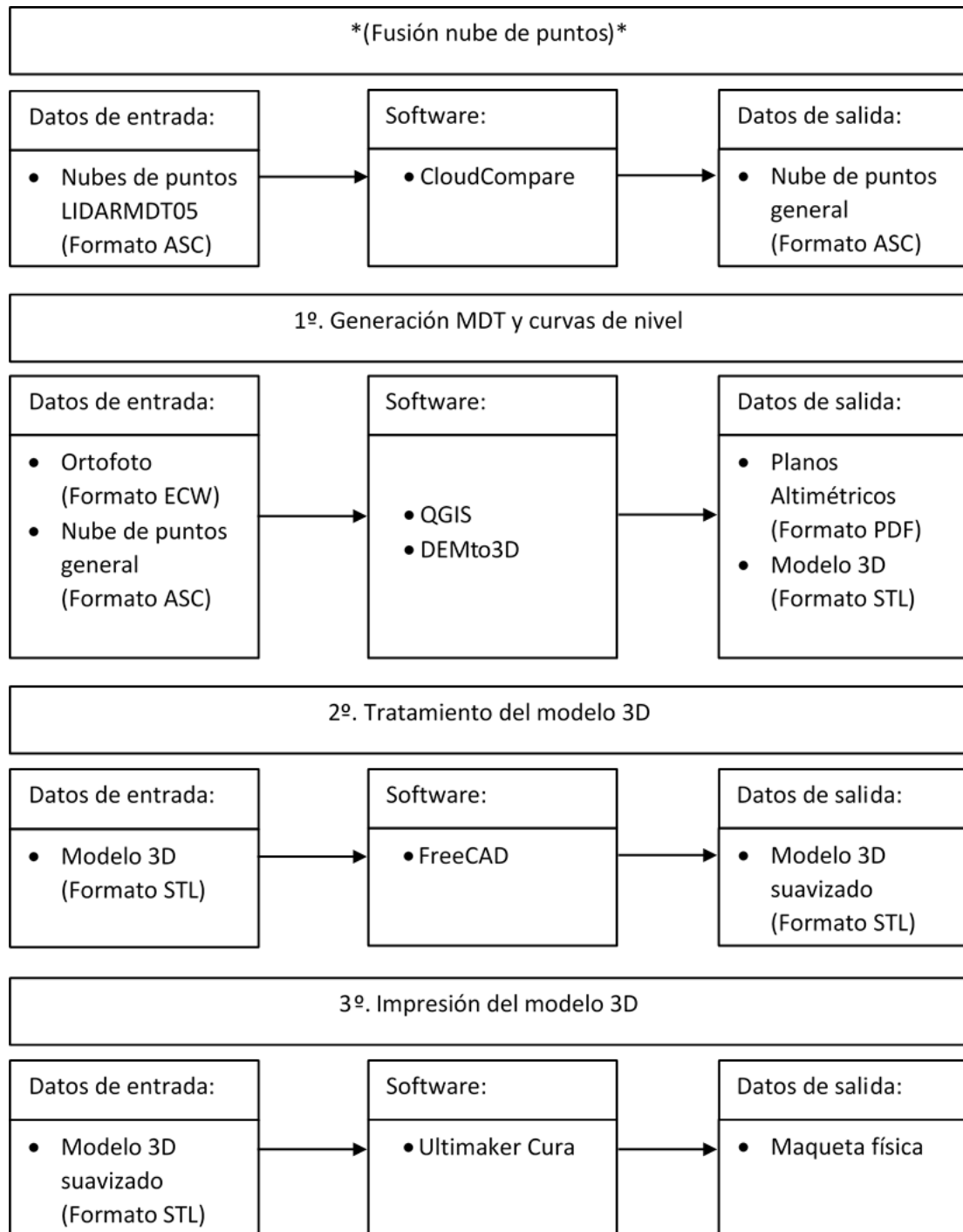
### 3.2 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de modelos digitales del terreno

Una de las ventajas que presenta este TFG es la utilización, durante todo el desarrollo de su metodología, de *software* gratuitos que minimicen el coste de éste. Esto hará que este proyecto sea una ayuda eficiente para el proceso de planeamiento de una operación militar y para el estudio y reconocimiento del terreno previo a una operación; en el caso de la Infantería de Marina, una operación anfibia.

De forma muy resumida, el primer proceso de la metodología consiste en la obtención de datos de levantamiento LIDAR a partir del centro de descargas del IGN. A continuación, trataremos esos datos con una serie de *software* gratuitos como QGIS y CloudCompare para obtener el MDT en formato ASC. Este archivo, a través de la extensión de QGIS, DemTo3D, lo transformaremos a un archivo STL para que pueda ser importado en el *software* de la impresora 3D (Ultimaker Cura). A mayores, si

fuese necesario, el modelo se podría suavizar a través del *software* gratuito FreeCad, para que el acabado del modelo físico sea más homogéneo.

En el siguiente diagrama se describe la metodología desarrollada:



**Tabla 1. Diagrama de procesos para la elaboración del modelo MDT** [\*Este proceso solo sería necesario si para abarcar la totalidad del territorio bajo estudio hiciese falta más de una nube de puntos LIDAR].

### 3.2.1 Generación MDT y curvas de nivel

El primer paso es la generación del modelo digital del terreno y las curvas de nivel para poder obtener la altimetría de la isla e imprimir el modelo físico 3D.



### 3.2.1.1 Datos de entrada

Para llevar a cabo el objetivo de este estudio de representación 3D de la Isla de Tambo resulta necesario disponer de datos cartográficos, tanto de fotografías aéreas como de la nube de puntos LIDAR del terreno (LIDARMDT05) del PNOA. A la hora de realizar un planeamiento militar y reconocimiento del terreno, estos datos se podrían obtener de manera propia y privada a través de vuelos y maquinaria propia. Sin embargo, esto tendría un serio inconveniente, puesto que económicamente sería mucho más costoso que utilizar los datos de fuentes públicas y de manera gratuita. En la mayoría de estudios publicados, de aplicación en Estados Unidos, estos datos se toman a través de la *U.S Geological Survey*, que ofrece datos de todo el territorio de manera gratuita [61]. En este TFG los datos los descargaremos del IGN (Instituto Geográfico Nacional).

En primer lugar, descargamos la ortofoto de la Isla de Tambo del centro de descargas del IGN, en el apartado de “Fotogramas y Ortofotos de vuelos” [62]. Para seleccionar la ortofoto a descargar se puede proceder de dos maneras diferentes. Sobre el plano que aparece en la página, se puede dibujar un polígono que abarque la superficie del terreno a estudiar, o directamente se busca la ciudad o provincia a la que pertenece. Seguidamente, aparecerán en pantalla las ortofotos disponibles para esa localización (Figura 3-6).



**TOTAL FICHEROS: 3**

Fotogramas y ortofotos de vuelos  
Ortofoto PNOA Máxima Actualidad 3 +

Minimizar lista de resultados

**Total ficheros Ortofoto PNOA Máxima Actualidad: 3**

Metadatos  
Información auxiliar

Filtro sobre los resultados

Tipo fichero: Todos  
Nombre de fichero: Escriba texto para buscar en la **Buscar**

Nombre	Formato	Tamaño (MB)	Localizar	Descargar	
PNOA-MA-OF-ETRS89-HU29-H50-0185.ECW	ECW	2648.60			<b>Añadir</b>
PNOA-MA-OF-ETRS89-HU29-H50-0185.XML	XML(METADATOS)	0.05			<b>Añadir</b>
PNOA-MA-OF-ETRS89-HU29-H50-0185.ZIP	SHAPE	0.01			<b>Añadir</b>

Figura 3-6. Ortofotos disponibles para nuestra zona de estudio [25].

Finalmente, antes de proceder a descargar la ortofoto, debemos elegir el formato de archivo que interese (en nuestro caso ECW) y verificar que cubre todo nuestro terreno de estudio (Figura 3-7).

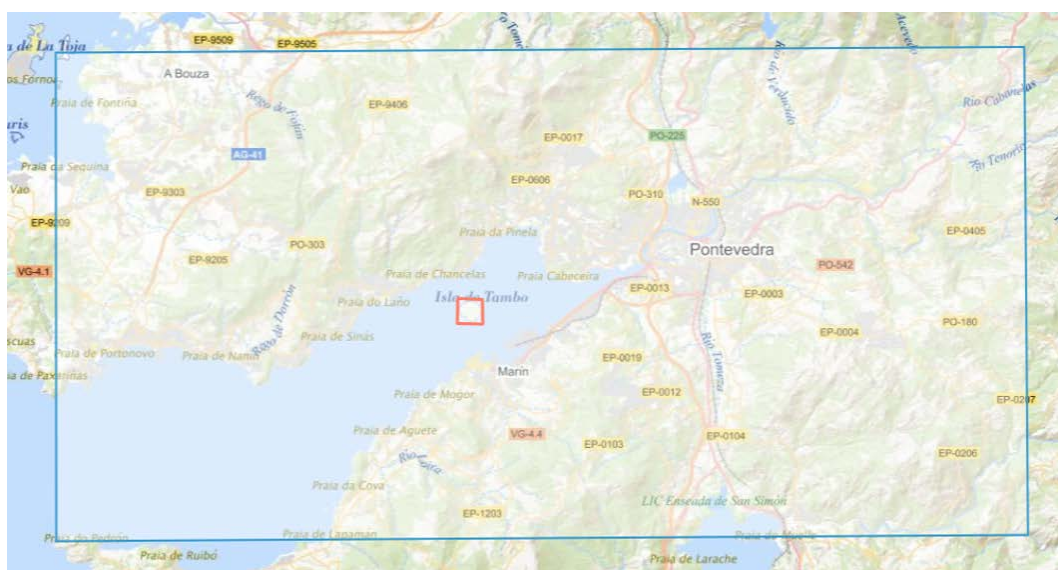


Figura 3-7. Extensión del terreno que abarca la ortofoto descargada [25].

Las características de la ortofoto descargada son las siguientes:

Ortofoto PNOA máxima actualidad	
<b>Descripción</b>	Mosaicos de ortofotos más recientes del PNOA
<b>Formato</b>	ECW
<b>Sistema Geodésico de Referencia (SGR)</b>	ETRS89 en todo el territorio nacional salvo WGS84 en las Islas Canarias
<b>Unidad de descarga</b>	Cada mosaico de una hoja MTN50 (1:50000)

**Tabla 2. Características de la ortofoto descargada [25].**

Como se observa en el diagrama que aparece al principio de este apartado (Tabla 1), no solo se necesita la ortofoto para la realización de los planos altimétricos de la Isla de Tambo, sino que resulta indispensable la descarga de la nube de puntos LIDARMDT05 para la realización de las curvas de nivel de la zona.

En primer lugar descargaremos los datos del centro de descargas del IGN en el apartado de “Modelos Digitales del Terreno” [63]. En este apartado se pueden visualizar vuelos históricos LIDAR de 2008 a 2015, vuelos LIDAR más recientes de 2015-Actualidad, y los distintos MDT realizados con el LIDAR. Estos MDT se pueden descargar con diferente tamaño de rejilla. A menor rejilla, mayor calidad y viceversa. Por este motivo se elige el MDT05 correspondiente a la rejilla más pequeña disponible, de 5 metros.

Para seleccionar la zona de estudio, se procede de la misma manera anteriormente descrita para la descarga de la ortofoto. En la Figura 3-10 se observan los datos LIDARMDT05 disponibles para nuestra zona de estudio (Galicia, huso 29).

The screenshot shows the IGN download interface. On the left, a sidebar titled 'TOTAL FICHEROS: 2' contains a section 'Modelos Digitales de Elevaciones' with a sub-item 'Modelo Digital del Terreno - MDT05' and a count of 2. The main panel is titled 'Total ficheros Modelo Digital del Terreno - MDT05: 2'. It includes a search filter section with 'Tipo fichero' set to 'Todos' and a search bar. Below the filter is a table with the following data:

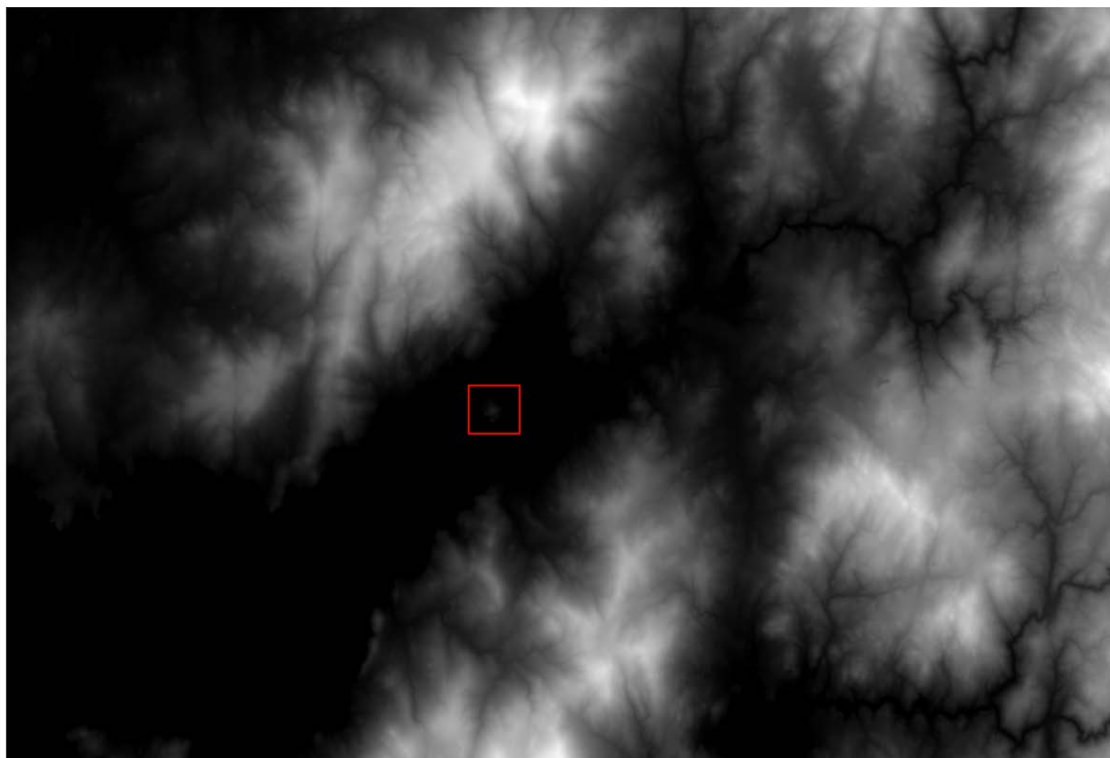
Nombre	Formato	Tamaño (MB)	Localizar	Descargar	
PNOA-MDT05-ETRS89-HU29-0185-LID.ASC	ASC	127.03			Añadir
PNOA-MDT05-ETRS89-HU30-0185-LID.ASC	ASC	145.55			Añadir

**Figura 3-8. Nubes de puntos LIDARMDT05 disponibles para nuestra zona de estudio [25].**

La Figura 3-11 muestra la extensión del terreno que abarca esta nube de puntos LIDARMDT05.

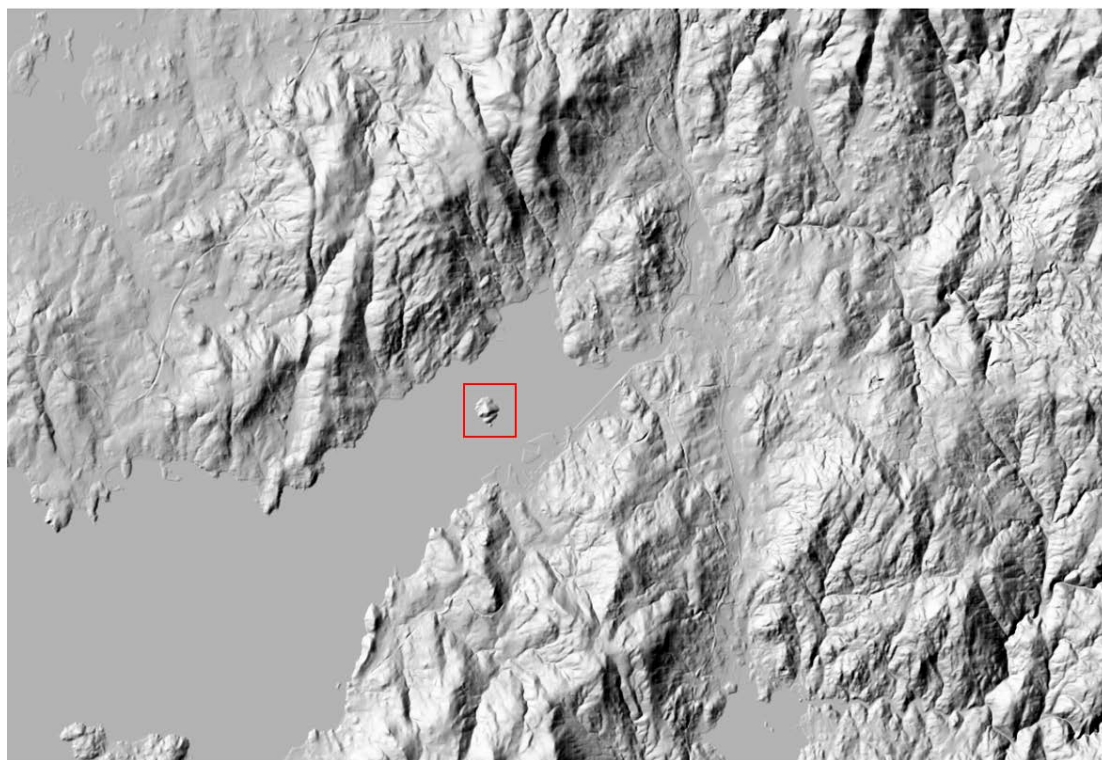






**Figura 3-10. Imagen LIDARMDT05 con renderización “Gris monobanda” importada en QGIS.**

Para que esta imagen (Figura 3-12) sea más visual y fácil de interpretar, le aplicamos un efecto de renderización llamado “Mapa de sombras (*Hillshade*)”. Este efecto representa el terreno por alturas, pudiendo modular la intensidad de la luz para que las sombras sean más o menos intensas, además de poder elegir la dirección de la luz incidente sobre la representación. En la Figura 3-13 se puede observar el resultado de este efecto.



**Figura 3-11. Imagen LIDARMDT05 con renderización “Hillshade” en QGIS.**

El siguiente paso consiste en la superposición de la ortofoto con el LIDARMDT05. Una vez superpuestos y georreferenciados se le da una determinada transparencia a la ortofoto para crear en ella el efecto de relieve que se consigue con el LIDAR (Figura 3-13). Este efecto se consigue cuanto mayor sea el contraste de luz y sombras en el LIDAR, motivo por el cual se aplicó la renderización “Hillshade”.

Posteriormente realizamos una triangulación y curvado para obtener las curvas de nivel de la zona mediante la herramienta “Curvas de Nivel”. Para el curvado seleccionamos una equidistancia de 10 metros para las curvas maestras y una equidistancia de 5 metros para las curvas de nivel secundarias. La Figura 3-14 muestra la capa o modelo de curvas de nivel generado, mientras que en la Figura 3-15 se puede observar la superposición de la imagen LIDARMDT05, la ortofoto y las curvas de nivel.

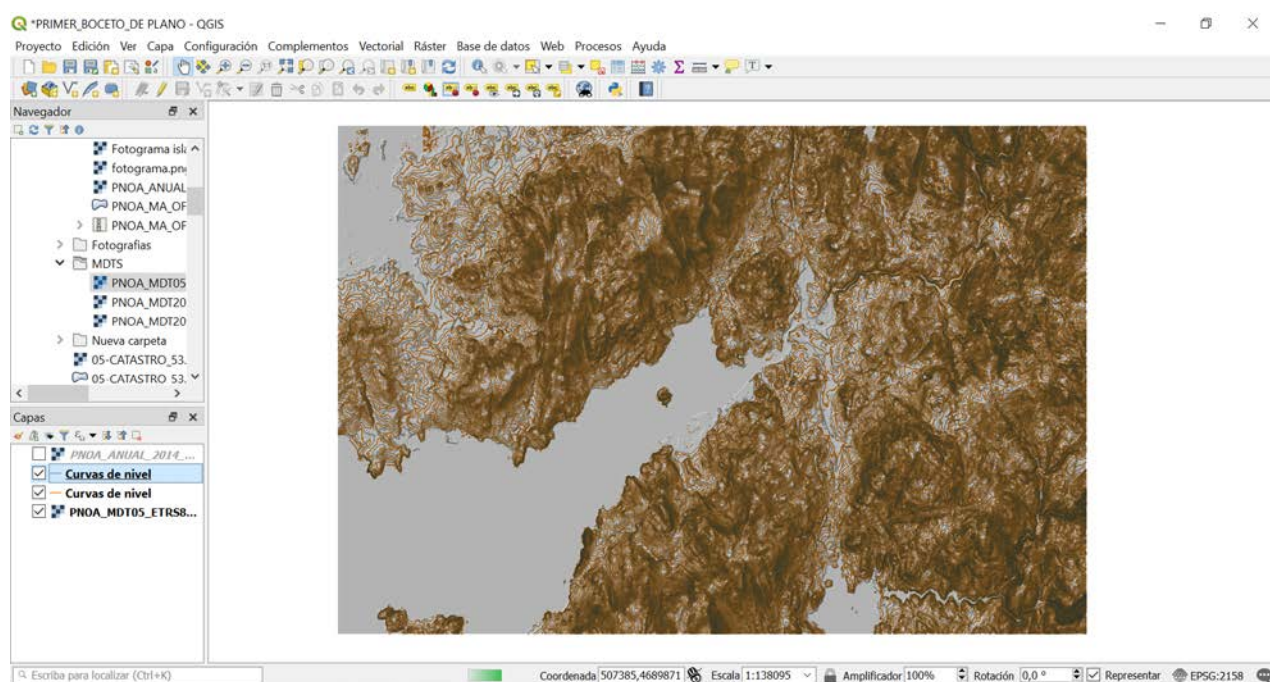


Figura 3-12. Modelo de curvas de nivel generado en QGIS.

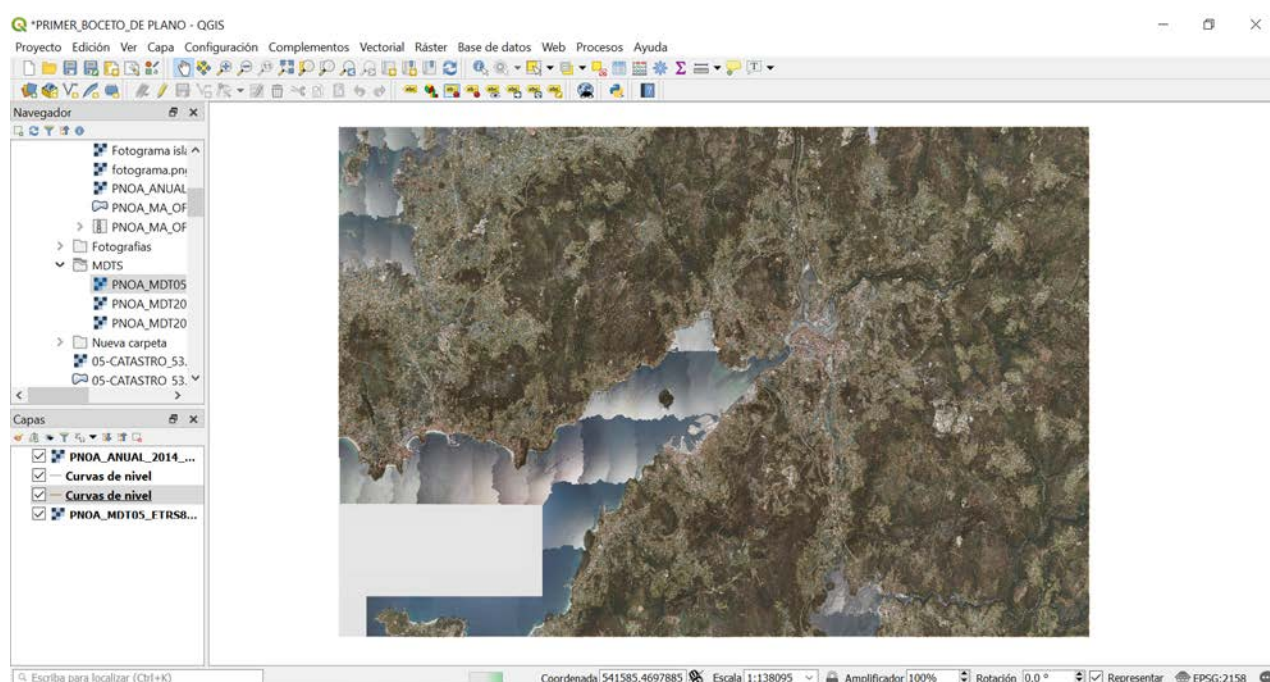
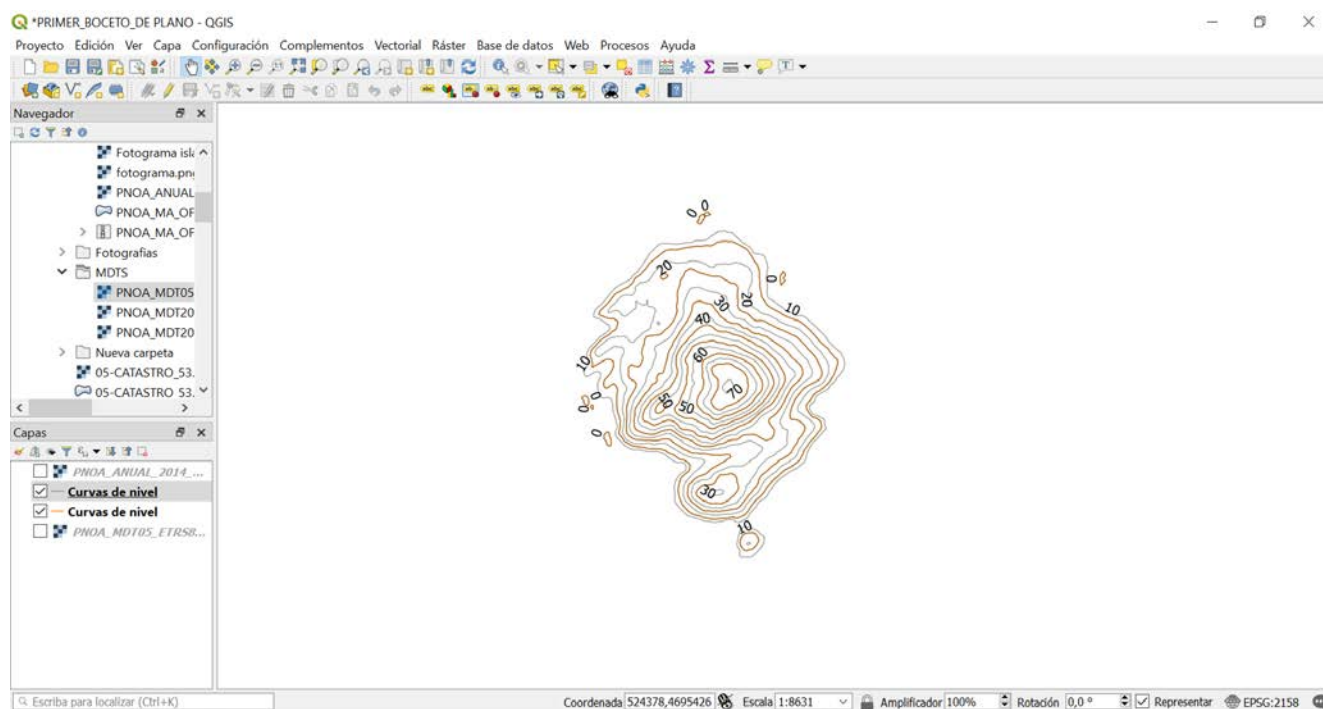


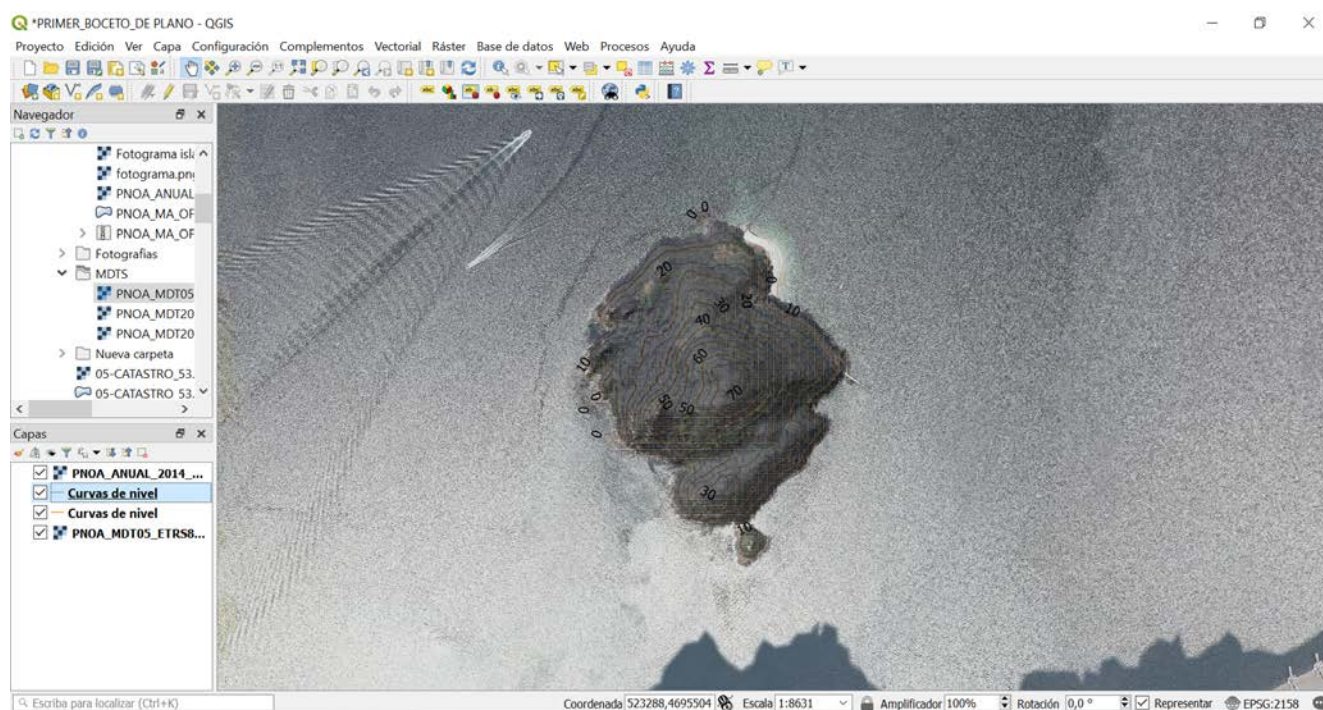
Figura 3-13. Superposición de imagen LIDARMDT05, ortofoto y curvas de nivel en QGIS.



Si nos acercamos a nuestra zona de estudio, la Isla de Tambo, obtenemos las siguientes imágenes:



**Figura 3-14. Modelo de curvas de nivel de la Isla de Tambo generado en QGIS.**



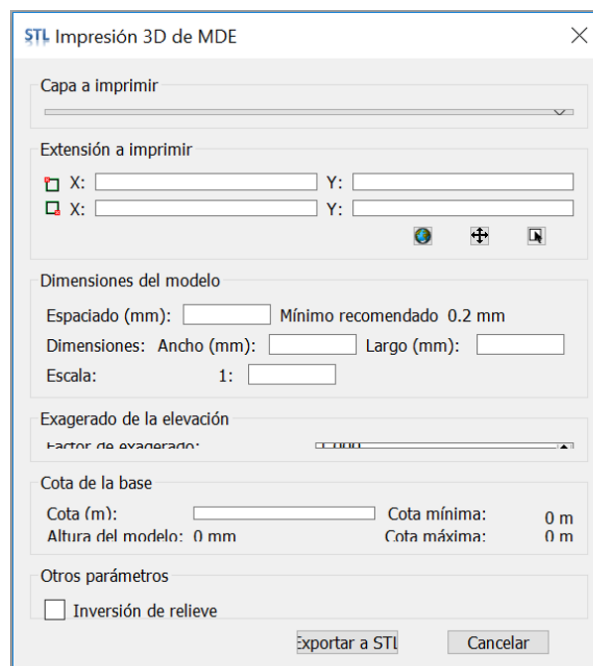
**Figura 3-15. Superposición de la imagen LIDARMDT05, ortofoto y curvas de nivel de la Isla de Tambo en QGIS.**

Para transformar la nube de puntos descargada del LIDARMDT05 en un modelo digital del terreno 3D en formato STL, es necesario realizar una triangulación de esos puntos. Para ello es necesario descargar una extensión de QGIS denominada DEMto3D.

DEMto3D es una herramienta que permite la impresión 3D dentro de los *software* SIG. Esta herramienta está desarrollada para las herramientas SIG Kosmos y QGIS, permitiendo la impresión de los modelos digitales del terreno, exportando ciertas extensiones que se seleccionen a un formato STL. Fue creada e impulsada por el ingeniero Francisco Javier Vencesla Simón, como parte de su proyecto

final de carrera: “Desarrollo de un módulo de impresión 3D de modelos digitales de elevaciones basado en sistema de bajo coste”. La versión para QGIS se hizo pública el 25 de agosto de 2015 [64].

Trabajando con el *software* QGIS se puede descargar esta herramienta directamente desde el escritorio en la ventana complementos, pues es una herramienta que no viene de serie como el resto. Una vez descargada se puede hacer uso de ella cuando se quiera en la pestaña *Raster*. Una de las principales ventajas de esta herramienta es que permite seleccionar la porción del terreno que se quiere utilizar, a través de coordenadas o seleccionándolo directamente del MDT/Altimetría con ayuda del ratón. Con la porción del terreno seleccionada se pueden introducir parámetros como la dimensión del modelo de impresión, la escala de dicho modelo, el factor de escala vertical (factor de exagerado de la elevación) y la cota mínima a la que se quiere generar el modelo tridimensional. En la Figura 3-16 se puede apreciar estos parámetros tal y como aparecen en el *software* QGIS. Cabe mencionar que el factor de escala vertical también se podrá configurar en el propio *software* de impresión 3D, Ultimaker Cura.



**Figura 3-16. Parámetros de configuración para la generación del archivo STL en QGIS.**

En nuestro caso, a la hora de seleccionar la porción del terreno que se quiere imprimir, se utiliza la opción de seleccionar con el ratón en vez de por coordenadas, ya que es mucho más visual. Para la generación del modelo en formato STL utilizamos una escala normalizada 1:5000, que permita imprimir el modelo físico lo más grande posible teniendo en cuenta las limitaciones de la impresora 3D disponible en el Centro Universitario de la Defensa (CUD). Se genera así un modelo de 169,9 mm de ancho y 152,4 mm de largo. En la Figura 3-17 se puede apreciar este proceso descrito anteriormente.

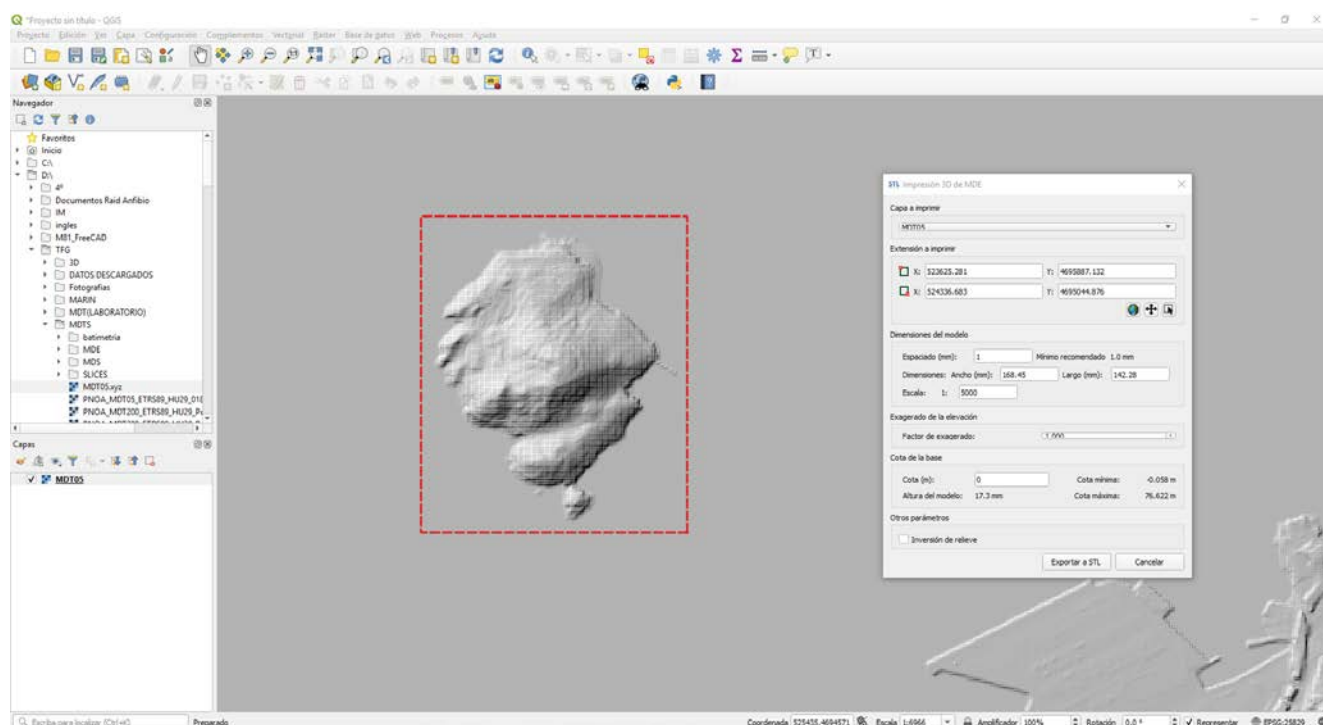


Figura 3-17. Selección del terreno a exportar y configuración del modelo 3D en formato STL.

### 3.2.1.3 Datos de salida

De los procesos anteriormente descritos se obtiene la altimetría en formato Esri ASCII. Este formato es de los más utilizados para obtener la altimetría de un territorio, ya que proporciona información acerca de las celdas de la capa ráster así como sus coordenadas planimétricas (X,Y). De este modo se obtienen los planos altimétricos de la Isla de Tambo. Estos planos se pueden generar en el propio *software* QGIS con la herramienta “Nuevo diseñador de impresión”.

Los planos altimétricos generados son: un primer plano a escala 1:10000, se puede observar en el Anexo A. Es necesario remarcar que el DATUM que se ha utilizado en todo el proceso es el ETRS89 (huso 29). Además de un segundo plano a escala 1:5000 que se utilizará de base para la maqueta formada por los diferentes *slices* o cortes horizontales (XY) que se realizarán en apartados siguientes.

El otro producto que se obtiene es el modelo digital del terreno 3D en formato STL. Un archivo STL (*Standard Tessellation Language*) es un archivo utilizado en CAD (*Computer aided-designed*) para definir la forma de un objeto a través de pequeños triángulos, sin incluir propiedades físicas como el color o la textura. A mayor número de triángulos y menor tamaño, mayor resolución. Evidentemente, a mayor resolución, mayor tamaño o peso de archivo (Figura 3-20).





Figura 3-18. Comparación de archivos STL [65].

### 3.2.2 Tratamiento del modelo 3D

En este apartado se suavizará el modelo 3D generado con DEMto3D. El modelo generado, al ser un formato STL, presenta muchas aristas y pequeños picos que se tratarán a través del *software* FreeCAD para conseguir una superficie más lisa y homogénea.

#### 3.2.2.1 Datos de entrada

En este apartado se parte del archivo STL obtenido como dato de salida en el apartado anterior (Figura 3-20). El acabado superficial del modelo generado con DEMto3D presenta muchas irregularidades. Para mejorar el aspecto del modelo, previo a su impresión, se suavizará con el *software* FreeCAD.

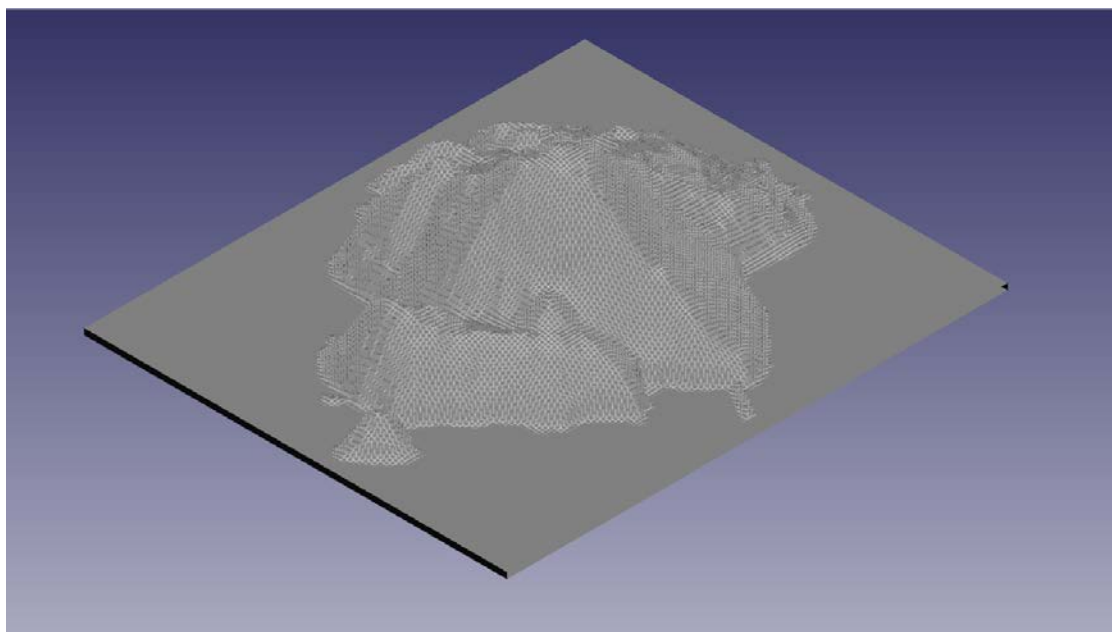


Figura 3-19. Modelo MDT sin suavizar.

#### 3.2.2.2 Software

En este proceso se trabaja con el *software* FreeCAD, ya que ni el DEMto3D, ni el *software* empleado para imprimir el modelo físico presentan la opción de alisar o suavizar superficies. Es importante recordar aquí que todos los *software* que se utilizan en este TFG son completamente gratuitos.

En este caso seleccionamos el FreeCAD, que es un *software* que permite diseñar y fabricar diferentes modelos en 3D. Estos modelos se pueden generar cargándose en la plataforma o generando diferentes croquis en 2D. Además, FreeCAD permite acotar los diferentes modelos o realizar análisis de elementos finitos. FreeCAD está disponible para Mac, Linux y Windows. En nuestro caso este *software* solo se utilizará para suavizar la superficie del modelo. En primer lugar, se carga el archivo STL en el programa activando la opción de “*Mesh Design*”. En la ventana “Mallas” se le aplica un suavizado que se carga directamente sobre la superficie de nuestro modelo. Podemos aplicarle un factor de iteración de hasta 90. En este caso, para el suavizado del MDT, utilizamos un suavizado de 90. Una vez aplicado el suavizado el archivo se vuelve a exportar en formato STL.

### 3.2.2.3 Datos de salida

Como resultado de este proceso, se obtiene el modelo MDT en 3D suavizado y en formato STL.

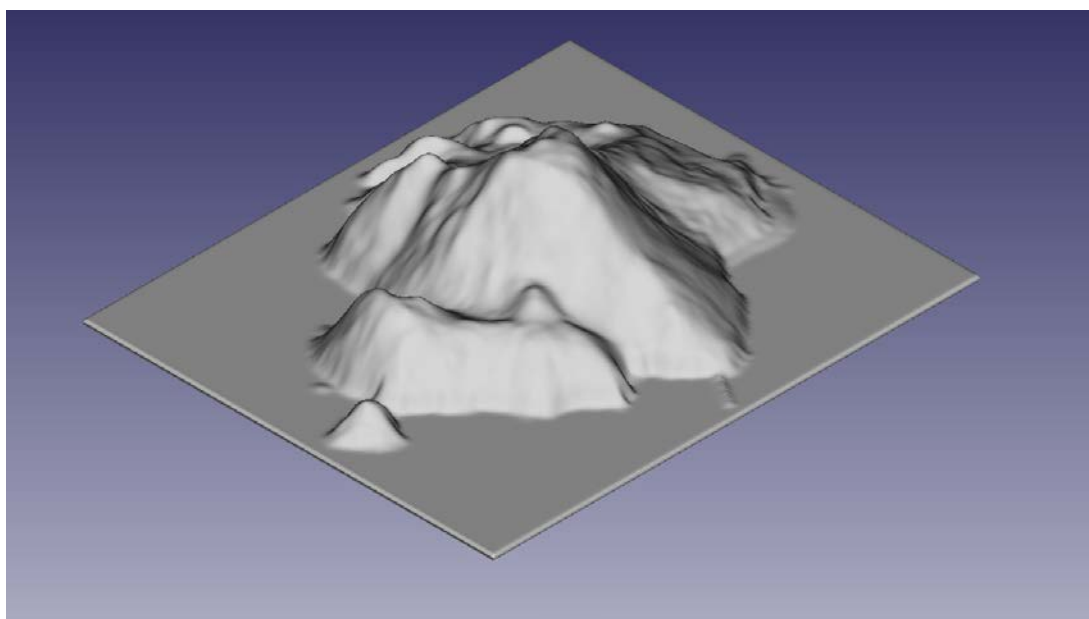


Figura 3-20. Modelo MDT suavizado.

### 3.2.3 Impresión del modelo 3D

En este apartado se imprimirá el modelo físico del MDT a través de una impresora Ultimaker Cura utilizando el *software* de la misma marca.

#### 3.2.3.1 Datos de entrada

Se utilizan los datos de salida del apartado anterior, que consiste en el archivo STL del modelo suavizado.

#### 3.2.3.2 Software

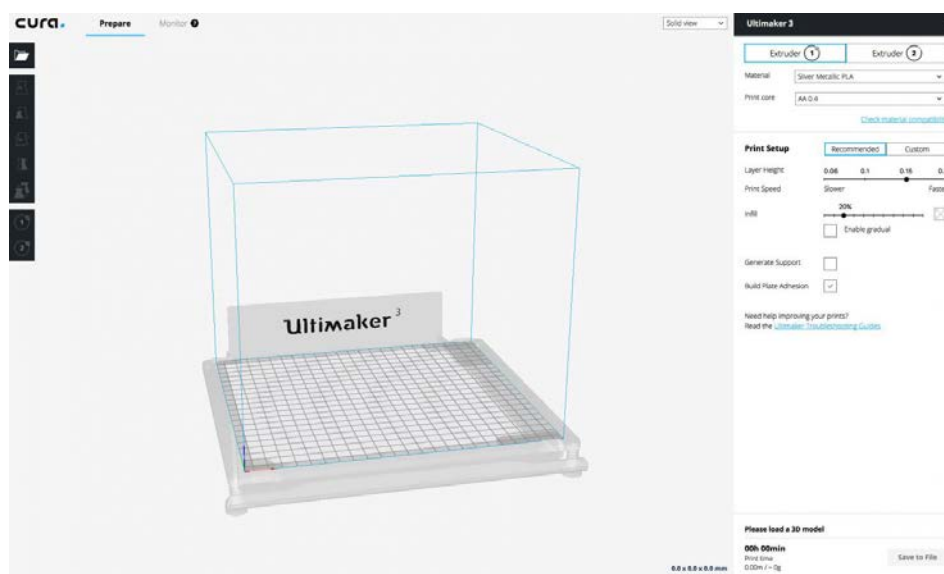
Para poder imprimir el modelo es necesario utilizar un programa de impresión que configure los movimientos de la impresora para generar un modelo sólido.

Ultimaker Cura es un *software* que se utiliza para imprimir en 3D. Este *software* es propiedad de la empresa que tiene este mismo nombre. Empresa que no solo comercializa el *software*, sino también impresoras de la misma marca. Esta empresa empezó en 2010 siguiendo el programa *RepRap*, para en 2011 hacerse un hueco en el mercado. Sus fundadores fueron los holandeses Martijn Elserman, Erik de Bruijn y Siert Wijnia, que fueron galardonados en 2014 con el mejor producto en el marco de impresión 3D. Su descarga es gratuita y entre sus ventajas destacan [66]:

- Permite abrir archivos en formato STL, OBJ, X3D y 3MF, aunque también puede abrir imágenes en formato GIF, JPG, PNG y BMP.

- Permite ajustar la escala del modelo en los 3 ejes (X,Y,Z), simultáneamente o incluso por separado.
- Puede configurarse desde la velocidad de impresión, hasta la anchura de la capa del modelo físico cuando se está imprimiendo, así como el material con el que se va a imprimir.
- La última versión permite importar modelos de forma directa desde otros programas como Siemens NX, Autodesk y SolidWorks.
- Existe la posibilidad de utilizar una configuración recomendada por el programa para optimizar las impresiones.

En la Figura 3-21 se puede observar cómo es la interfaz del *software* Ultimaker Cura.



**Figura 3-21. Interfaz del programa Ultimaker Cura.**

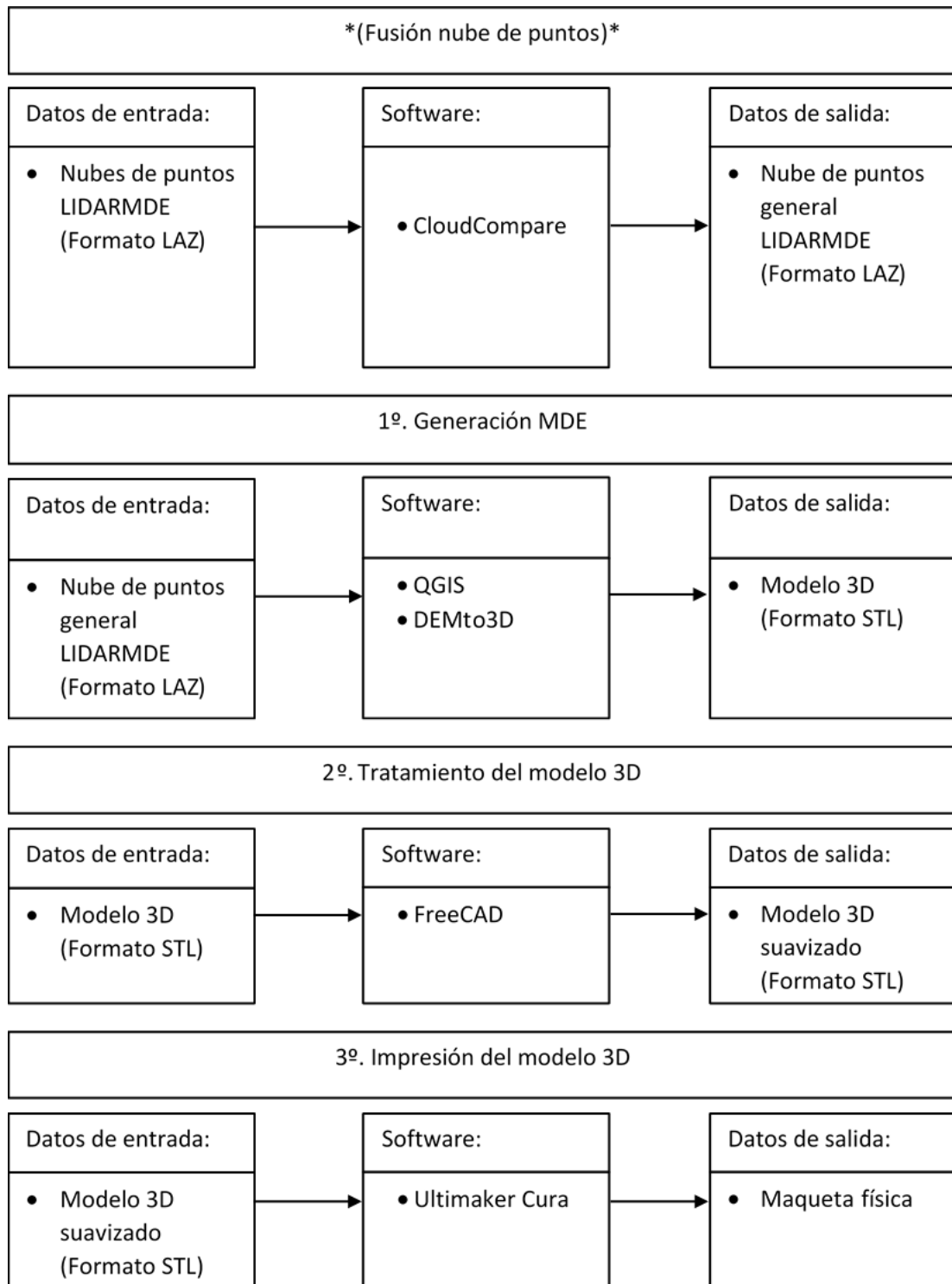
Para imprimir el archivo, primero se visualiza el modelo y se comprueba que el relieve no está muy deformado debido al factor de escala vertical seleccionado en el *software* DEMto3D.

En caso de que el modelo 3D esté muy deformado se puede modificar la escala vertical (Z) sin tener que modificar la escala en ninguno de los otros ejes (X,Y). En el caso de que se quisiera reducir aún más, para tener el relieve más realista y natural, se tendría que modificar el archivo STL generado a través del *software* DEMto3D. En este TFG, se han impreso hasta 3 maquetas con 3 diferentes factores de elevación o escalas verticales: una escala natural (factor 1), una escala duplicada (factor 2) para operaciones terrestres con el fin de estudiar la maniobra de las unidades, y una escala triplicada (factor 3) para el estudio de operaciones de aterrizaje y despegue de las aeronaves.

### **3.3 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de los modelos digitales de elevaciones**

De forma muy resumida, el primer proceso de la metodología consiste en la obtención de datos de levantamiento LIDAR a partir del centro de descargas del IGN. A continuación, se tratarán esos datos con los mismos *software* que se utilizaron para generar el MDT (QGIS y CloudCompare), para obtener el MDE en formato ASC. Este archivo, a través de la extensión de QGIS, DEMto3D, se transforma a un archivo STL para que pueda ser importado en el *software* de la impresora 3D (Ultimaker Cura), al igual que se hizo en el apartado anterior. A mayores, si fuese necesario, el modelo se podría suavizar a través del *software* gratuito FreeCAD, para que el acabado del modelo físico sea más homogéneo.

En el siguiente diagrama se desarrolla la metodología empleada:



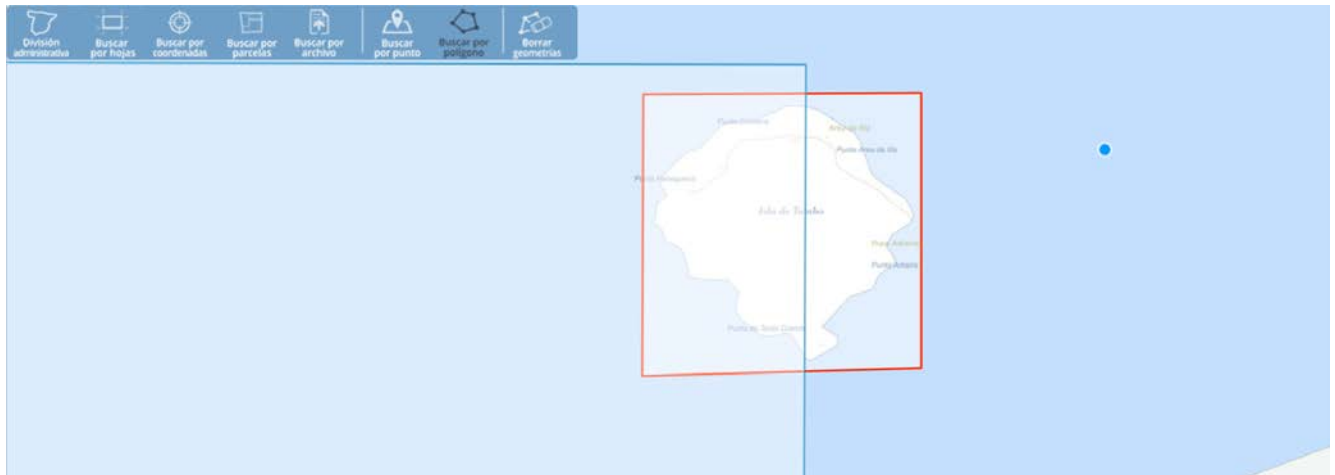
**Tabla 4. Diagrama de procesos para la elaboración del modelo MDE** [\*Este proceso solo sería necesario si para abarcar la totalidad del territorio bajo estudio hiciese falta más de una nube de puntos LIDAR].

### 3.3.1 \*Fusión de nubes de puntos

Este proceso no fue necesario para generar el modelo MDT. Sin embargo, para generar el modelo MDE sí lo fue, debido a las características de los datos de entrada. Por este motivo se decide explicar en este apartado de elaboración del MDE y no antes.

Este proceso es el que se debe realizar en el caso de que la nube de puntos que engloba nuestro territorio se descargue en dos o más archivos independientes.





**Figura 3-24.** Extensión del terreno que abarca la nube de puntos LIDARMDE, cara oeste de la isla [67].

Los datos más actualizados, para nuestra zona de estudio son de 2015. En la Tabla 5 se describen las características de las nubes de puntos LIDARMDE descargadas son las siguientes:

Características del LIDAR 2ª Cobertura (2015-Actualidad)	
<b>Descripción</b>	Ficheros de nubes de puntos 3D obtenidos con LIDAR y que están coloreados con su color natural o a través de infrarrojos. La densidad de la nube es como mínimo de 0,5 m/m <sup>2</sup>
<b>SGR</b>	ETRS89
<b>Unidad de descarga</b>	Superficies de 2 Km x 2 Km, aunque existen algunas excepciones de 1 Km x 1 Km
<b>Formato</b>	Fichero LAZ

**Tabla 5.** Características LIDAR 2ª Cobertura [25].

### 3.3.1.2 Software

En esta fase de procesado que no permite el *software* QGIS, la metodología se realiza con el *software* CloudCompare, que permite unir nube de puntos LIDAR.

CloudCompare es un *software* que permite modificar nubes de puntos, cortarlas, unir las, etc. Este *software* puede ser utilizado tanto en IOS, Linux y Windows [68]. Además, este *software* será el que se utilizará también para simplificar la nube de puntos y permitir su corte en diferentes “slices” o cortes horizontales (XY) del terreno.

Para unir ambas nubes de puntos, primero se deben cargar ambas nubes de puntos en el programa. Una vez cargados ambos archivos, se han de georreferenciar correctamente para que los dos archivos LIDAR coincidan espacialmente y se puedan exportar como un único archivo. Para poder exportarlos, ambas nubes de puntos deben de tener puntos en común.



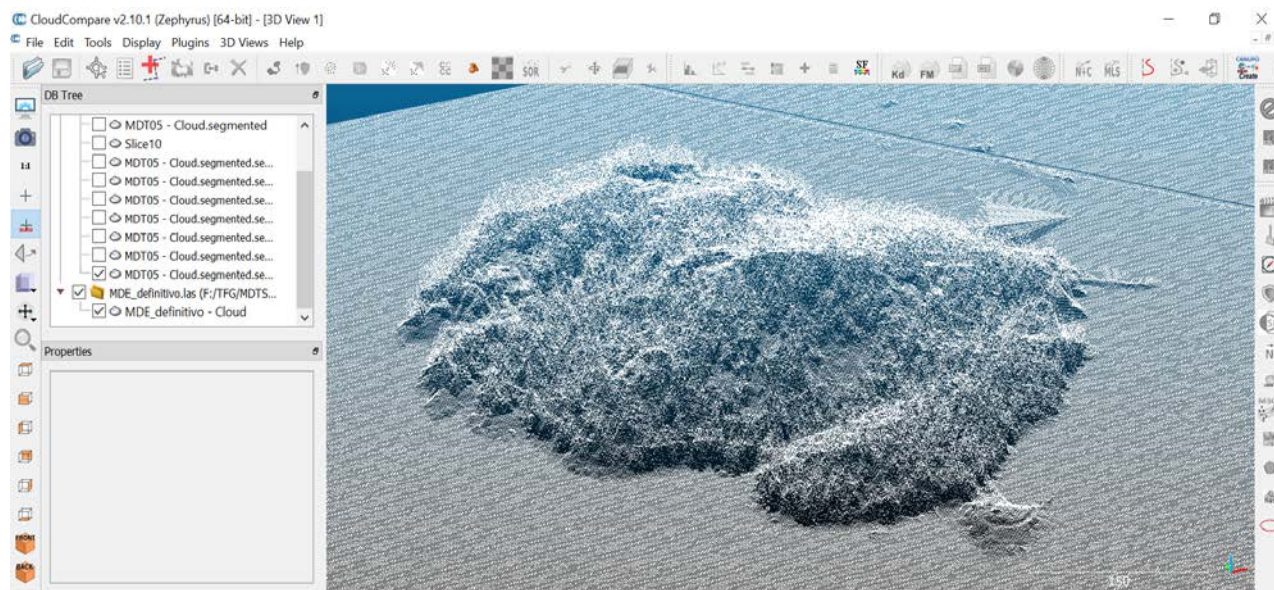


Figura 3-25. Nube puntos unificada de la Isla de Tambo.

### 3.3.1.3 Datos de salida

El archivo que se exporta como dato de salida es un único archivo en formato LAS con ambas nubes de puntos unidas.

### 3.3.2 Generación MDE.

En este apartado se tratarán los datos LIDARMDE a través de QGIS para poder utilizar el complemento DEMto3D y generar un archivo STL del MDE de la isla.

#### 3.3.2.1 Datos de entrada

Como datos de entrada se tiene los datos de salida del apartado 3.3.1.3.

#### 3.3.2.2 Software

Para trabajar con los datos LIDARMDE se utilizará el *software* QGIS empleado a lo largo del TFG. Cuando se abre este *software* surge la problemática de que no es capaz de trabajar con formatos LAS ni LAZ. Para poder trabajar con los datos de entrada, que están en este formato, es necesario descargar y configurar una serie de complementos de la red. Estos complementos se denominan LAStools y se pueden descargar de manera gratuita [69].

Una vez se han descargado estos complementos, es necesario instalarlos en el *software*. Para ello, accediendo a la barra de “herramientas Lidar”, se puede configurar el programa para que trabaje con los complementos que se acaban de descargar.

Una vez configurado el complemento es necesario cargar el archivo LAS en el *software* a través de la pestaña “caja de herramientas de procesos” y no abrirlo directamente desde la carpeta donde se encuentra guardado. Posteriormente, abriendo la caja de “herramientas LIDAR”, y utilizando el complemento LAStools, se selecciona “lasAdem”, que es el algoritmo que abrirá el archivo y permitirá visualizarlo de tal manera que posteriormente se pueda exportar en STL con DEMto3D.

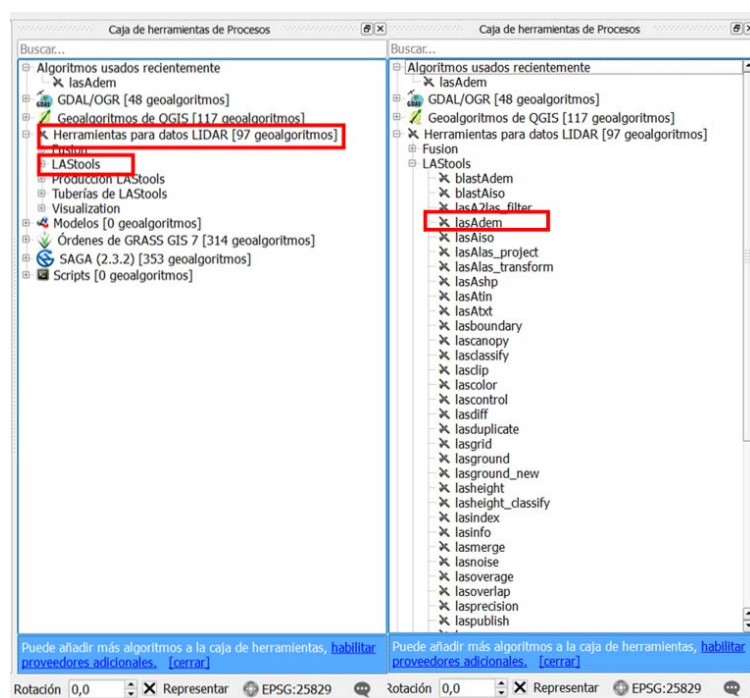


Figura 3-26. Proceso para abrir el archivo LAS en QGIS.

Al abrir el archivo se observa que está representado con el efecto de renderización “Gris-monobanda” que se cambiará a “Hillshade”, tal y como se hizo con la nube de puntos LIDARMDT05, para que resulte más visual.

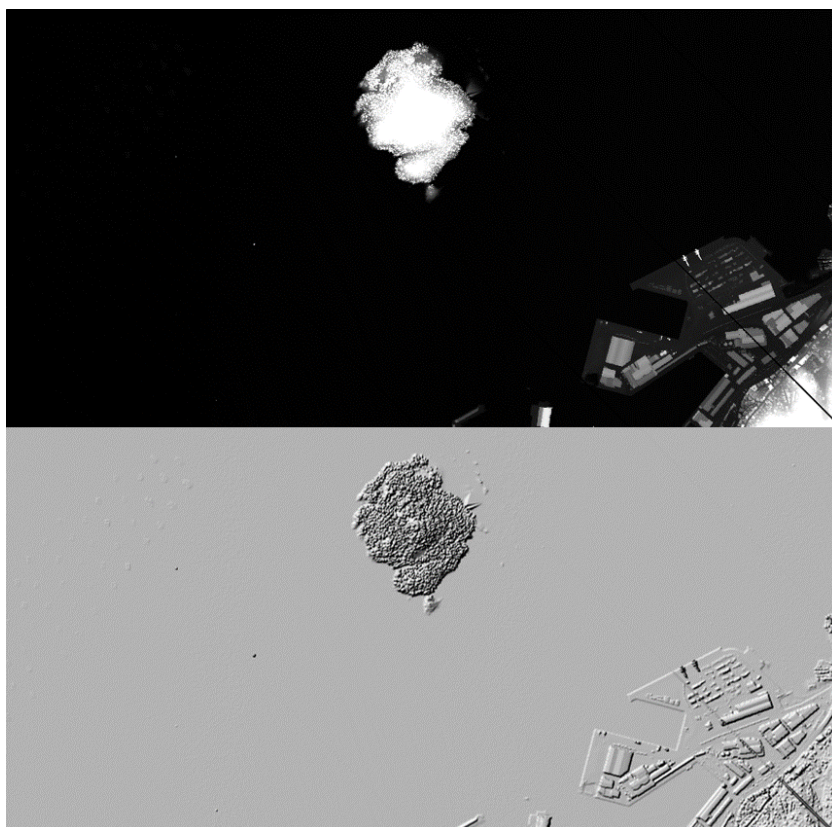


Figura 3-27. Comparación de efectos “Monobanda” y “Hillshade” sobre la nube de puntos MDE.

Para generar el archivo STL con el complemento DEMto3D se utilizará el mismo procedimiento que en el apartado 3.2.1.2.



### 3.3.2.3 Datos de salida

Como datos de salida se obtiene el modelo 3D del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en formato STL listo para ser tratado con FreeCAD.

### 3.3.3 Tratamiento del modelo 3D

El modelo 3D se tratará con el *software* FreeCAD para suavizarlo de la misma manera que se realizó en el apartado 3.2.2. En este caso el suavizado se realiza con 10 iteraciones.

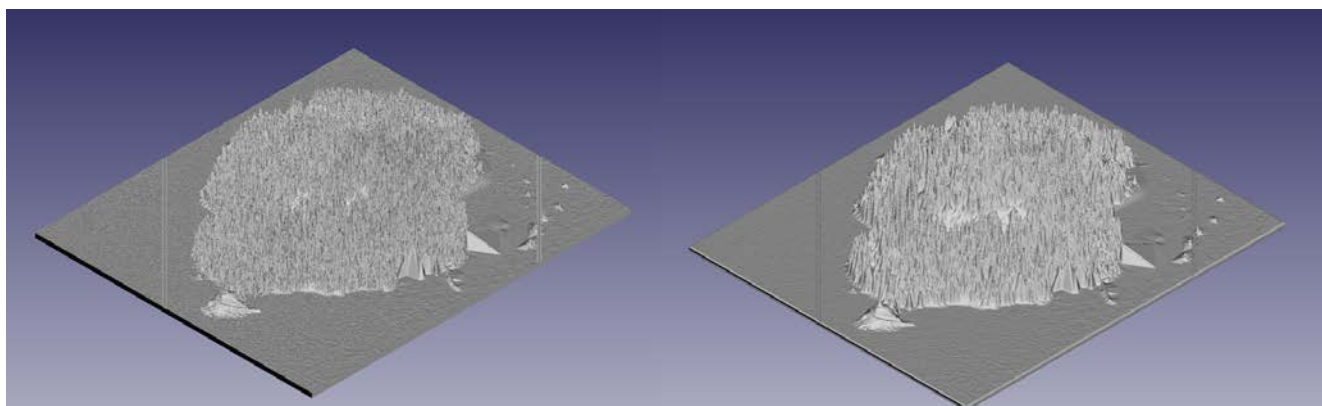


Figura 3-28. Comparación MDE sin suavizar (izquierda) y suavizado (derecho).

### 3.3.4 Impresión del modelo 3D

El modelo 3D se imprimirá con el mismo *software* y siguiendo los mismos pasos con los que se llegó a imprimir el modelo MDT en el apartado 3.2.3. En la Figura 3-29 se observa cómo quedaría el modelo previamente a ser impreso.

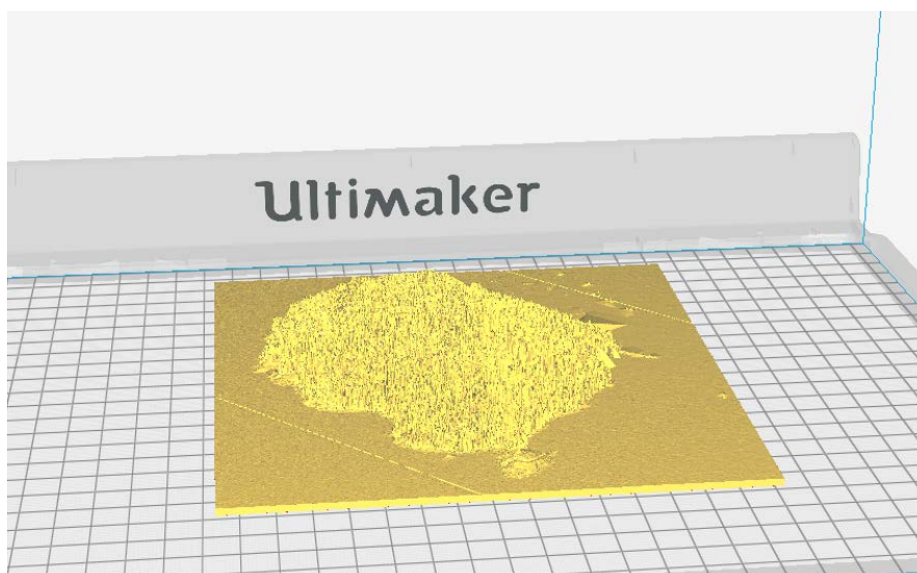


Figura 3-29. Vista previa del modelo 3D del MDS en el *software* Ultimaker Cura.

## 3.4 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de *slices* del MDT

En este apartado se desarrollará la metodología utilizada para realizar *slices* o cortes horizontales (XY) con el fin de facilitar el estudio y la interpretación de este, separándolo por curvas de nivel del MDT.

De forma muy breve, el proceso es el siguiente: primero se importará la nube de puntos del LIDARMDT05 al *software* QGIS donde con su extensión DEMto3D se realizará el modelo 3D, exportándose en formato STL. Posteriormente, con ayuda del *software* CloudCompare, se eliminará el soporte rectangular del modelo 3D que se genera involuntariamente en el proceso anterior. Una vez eliminado, se suaviza y se realizan los cortes horizontales (XY) con el *software* FreeCAD. Por último, los *slices* o cortes horizontales (XY) se imprimen con el *software* Ultimaker Cura.

En el siguiente diagrama se desarrolla la metodología empleada:

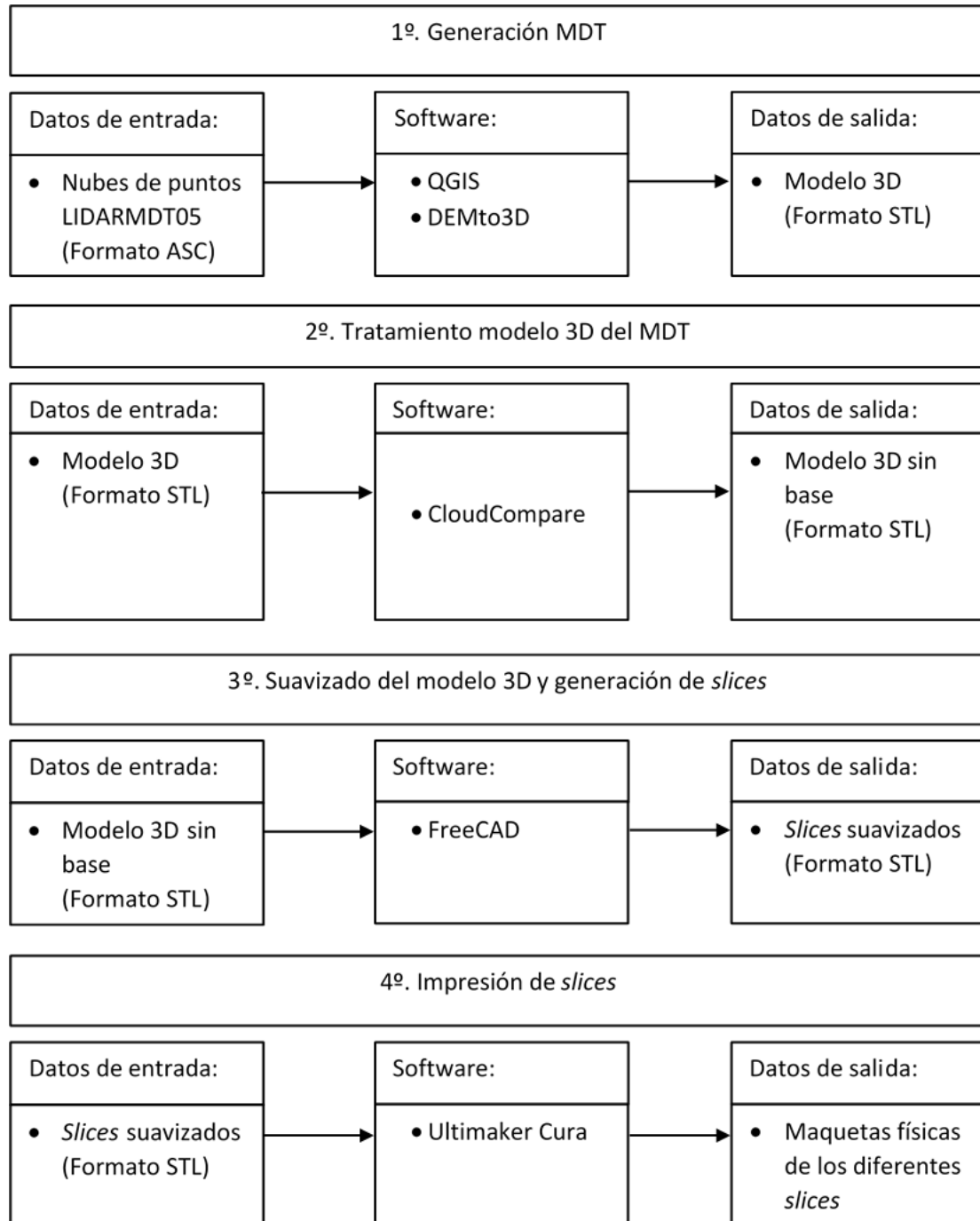


Tabla 6. Diagrama de procesos para la elaboración de los *slices* del modelo MDT.

### 3.4.1 Generación MDT

El primer paso es la generación del modelo MDT de la misma manera que en el apartado 3.2.1.

### 3.4.1.1 Datos de entrada

El dato de entrada para este apartado es la nube de puntos LIDARMDT05, utilizada en el apartado 3.2.1 y con las mismas características que aparecen en la Tabla 3.

### 3.4.1.2 Software

Una vez cargada la nube de puntos se procede a tratarla mediante el *software* QGIS de la misma manera que en el apartado 3.2.1.2. Sin embargo, debido a las limitaciones del *software* FreeCAD, que se utilizará para realizar los *slices* o cortes horizontales (XY), se debe de utilizar un factor de renderización mayor que en el apartado 3.2.1.2. En este caso se ha utilizado un factor de 1.5 en vez de 1 con el fin de disminuir el tamaño del fichero. Esta acción sin embargo tiene la limitación de disminuir también la calidad del modelo 3D, aunque en este caso resulta imperceptible.

### 3.4.1.3 Datos de salida

El formato de salida es un modelo 3D del MDT creado a través de una nube de puntos LIDARMDT05, con un factor de renderización de 1.5.

## 3.4.2 Tratamiento del modelo 3D del MDT

En este apartado eliminaremos, con el *software* CloudCompare, el soporte que se genera en todos los modelos 3D con el *software* DEMto3D.

### 3.4.2.1 Datos de entrada

El dato de entrada en este apartado es el modelo 3D del MDT en formato STL.

### 3.4.2.2 Software

Con los datos cargados en el *software* CloudCompare se retira el soporte del modelo 3D. Para ello se utiliza la herramienta “*Cross Section*” realizando un corte horizontal de 2 mm y removiendo el soporte. Sin el soporte, el modelo 3D se podría colocar en un plano de la misma escala que la maqueta física y trabajar con plano y maqueta simultáneamente. En la Figura 3-30 se puede observar la diferencia entre el modelo 3D con soporte y sin él.

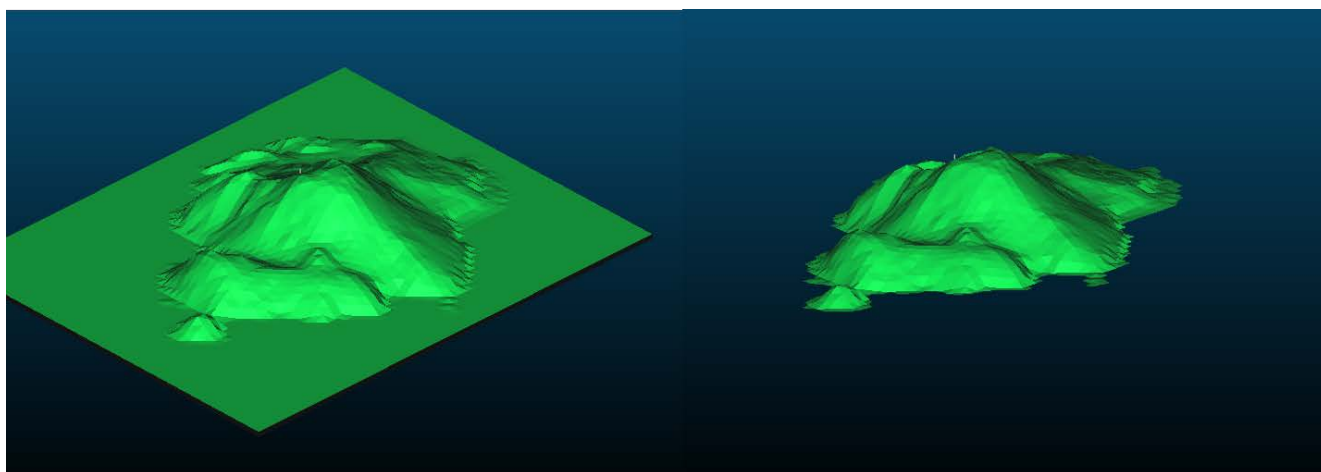


Figura 3-30. Comparación modelo con soporte (derecha) y modelo sin soporte (izquierda) en el *software* CloudCompare.

### 3.4.2.3 Datos de salida

Como datos de salida se obtiene el modelo 3D del MDT sin soporte en formato STL.

### 3.4.3 Suavizado del modelo 3D y generación de slices

En este apartado se utiliza el *software* FreeCAD para suavizar el modelo 3D como se hizo en apartados anteriores (3.2.2 y 3.3.3) y se realizarán los diferentes *slices* o cortes horizontales (XY) a diferentes alturas.

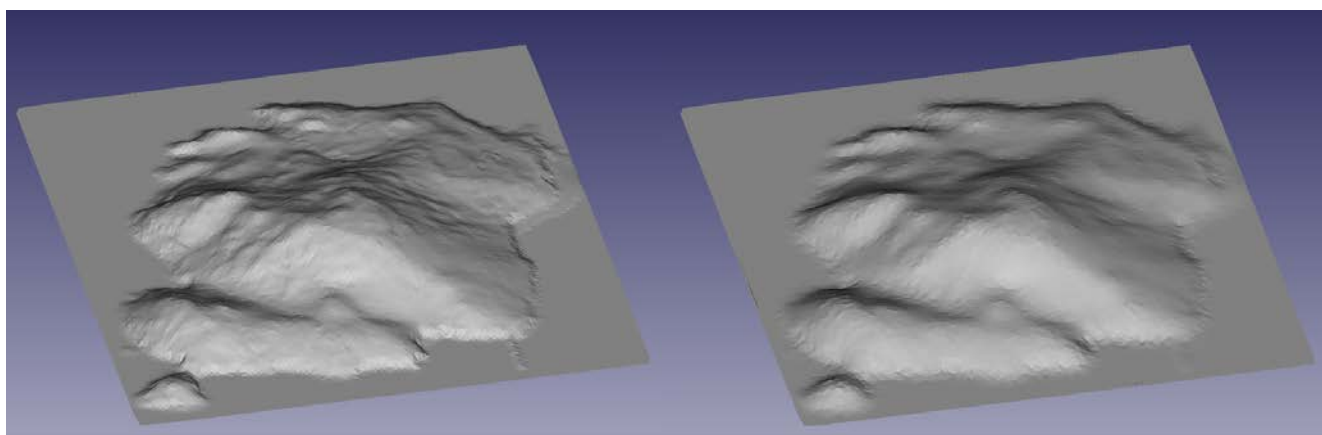
#### 3.4.3.1 Datos de entrada

Como datos de entrada se obtiene el modelo 3D del MDT sin soporte.

#### 3.4.3.2 Software

Utilizando el *software* FreeCAD se suavizará y cortará el modelo 3D del MDT. El orden para realizar las operaciones debe de ser el descrito. En el caso de que se realicen los cortes primero y posteriormente el suavizado, la superficie de corte se curvará de manera que resulte más difícil la colocación de los *slices* uno encima de otro.

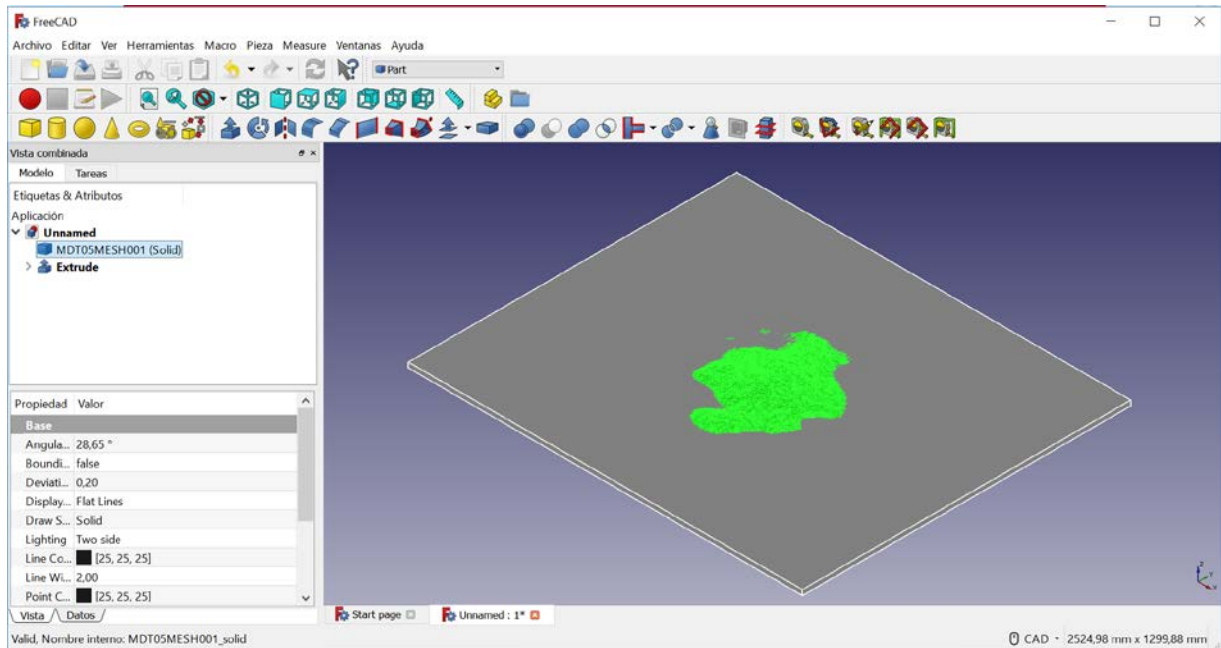
Para realizar el suavizado se emplea el proceso descrito en el apartado 3.2.2.2 con un factor de suavizado de 10. Se emplea este factor para que el modelo no pierda precisión y la punta de Tenlo Chico se pueda apreciar sin problemas.



**Figura 3-31. Comparación MDT sin suavizar (izquierda) con MDT suavizado (derecha).**

Una vez realizado el suavizado se procede a cortar la pieza. Los cortes o *slices*, se realizarán cada 20 metros para que se puedan apreciar los *slices* y se pueda realizar un mejor estudio del terreno. Por lo tanto, se realizarán 4 *slices*: (1) de 0-20 metros, (2) de 20-40 metros, (3) de 40-60 metros y (4) de 60-80 metros.

Primeramente, se convierte el archivo en una malla para luego transformarlo en un sólido. Estas operaciones se realizan dentro de la herramienta “*Part*”. Para realizar los cortes con FreeCAD se debe utilizar la operación booleana corte dentro de la herramienta “*Part*”. Primero se ha de crear un croquis de forma rectangular que envuelva la figura. Posteriormente se extruye el croquis y se coloca a la altura que se quiera realizar el corte. Una vez colocada la extrusión a la altura, se utiliza la operación corte, eliminando la parte del MDT que está en contacto con la extrusión.

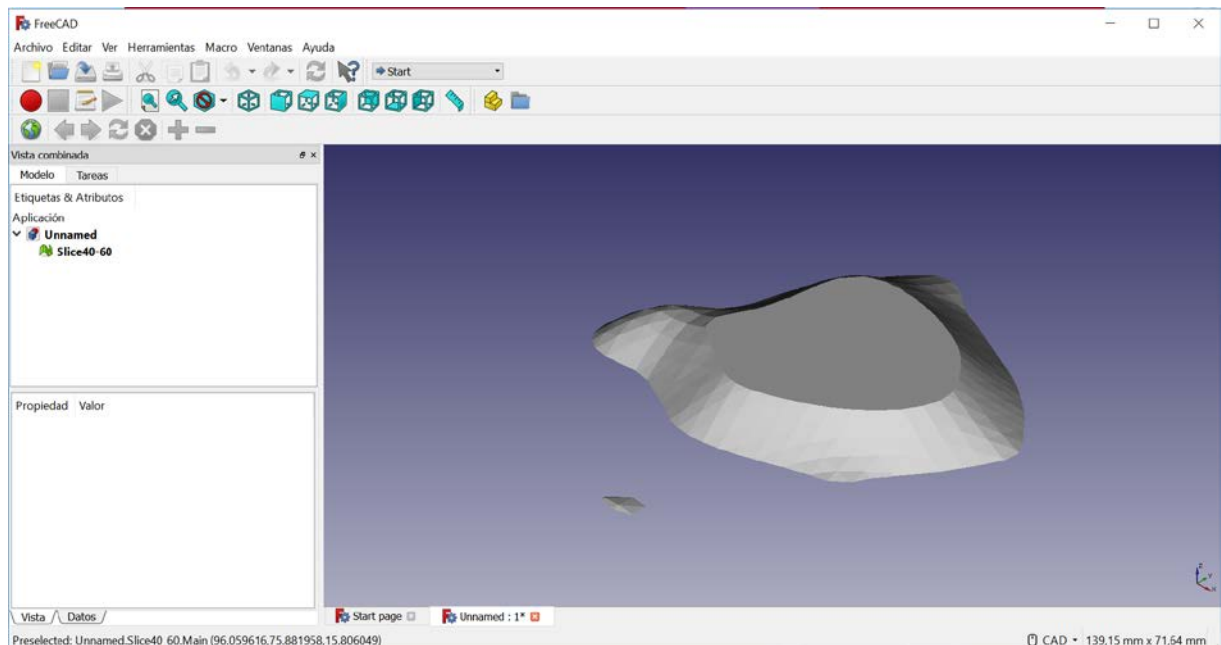


**Figura 3-32. Proceso para la realización de un corte con el software FreeCAD.**

Una vez se han realizado todos los *slices*, estos se exportan en formato STL para poder imprimirse en el software Ultimaker Cura.

### 3.4.3.3 Datos de salida

Los datos de salida son 4 *slices* en formato STL: (1) de 0-20 metros, (2) de 20-40 metros, (3) de 40-60 metros y (4) de 60-80 metros.



**Figura 3-33. Slice 40-60 metros en formato STL en el software FreeCAD.**

### 3.4.4 Impresión de slices

Los modelos se imprimirán con Ultimaker Cura siguiendo los mismos procesos que los descritos en los apartados 3.2.3 y 3.3.4.

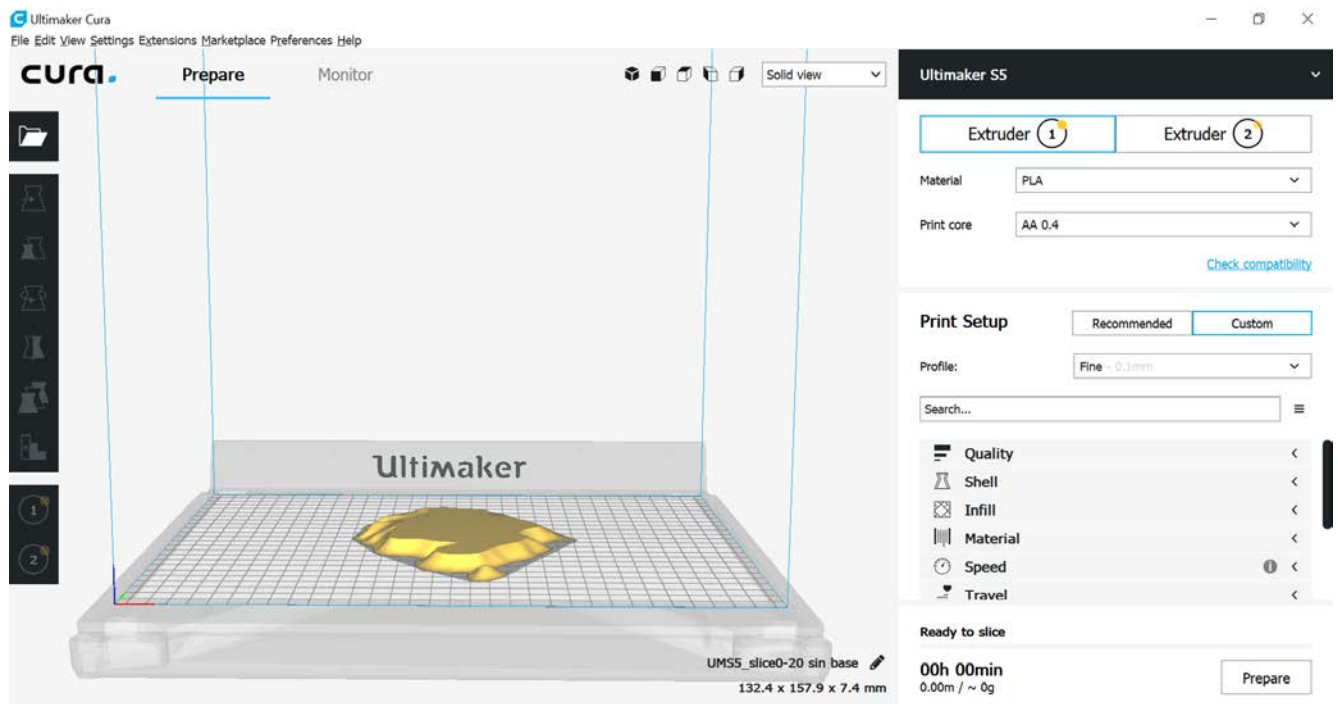


Figura 3-34. Vista previa del modelo 3D del *slice* de 0-20 metros en el *software* Ultimaker Cura.

### 3.5 Metodología desarrollada para la elaboración e impresión de la batimetría

En este apartado se presenta la metodología aplicada para generar la maqueta de la batimetría de la zona de la Isla de Tambo. Esta metodología no era un objetivo inicialmente planteado en este TFG, pero debido al carácter anfibio de la Infantería de Marina, se ha considerado de gran interés para abordar estudios de posibles desembarcos anfibios. De forma muy breve el proceso es el siguiente: en primer lugar, se procede a la descarga de la batimetría de la zona en formato ASC para, posteriormente, elaborar su modelo 3D (STL) mediante el *software* QGIS y su extensión DEMto3D. Para una completa integración y visión general del terreno de la isla, mediante el *software* CloudCompare, se unen los modelos 3D de la batimetría y del MDT y se recortan las zonas que están fuera de nuestro ámbito de interés. Por último, y al igual que en el resto de modelos, se le aplica un tratamiento de suavizado (FreeCAD) y se imprime la maqueta con el *software* Ultimaker Cura.

En el siguiente diagrama se desarrolla la metodología empleada:

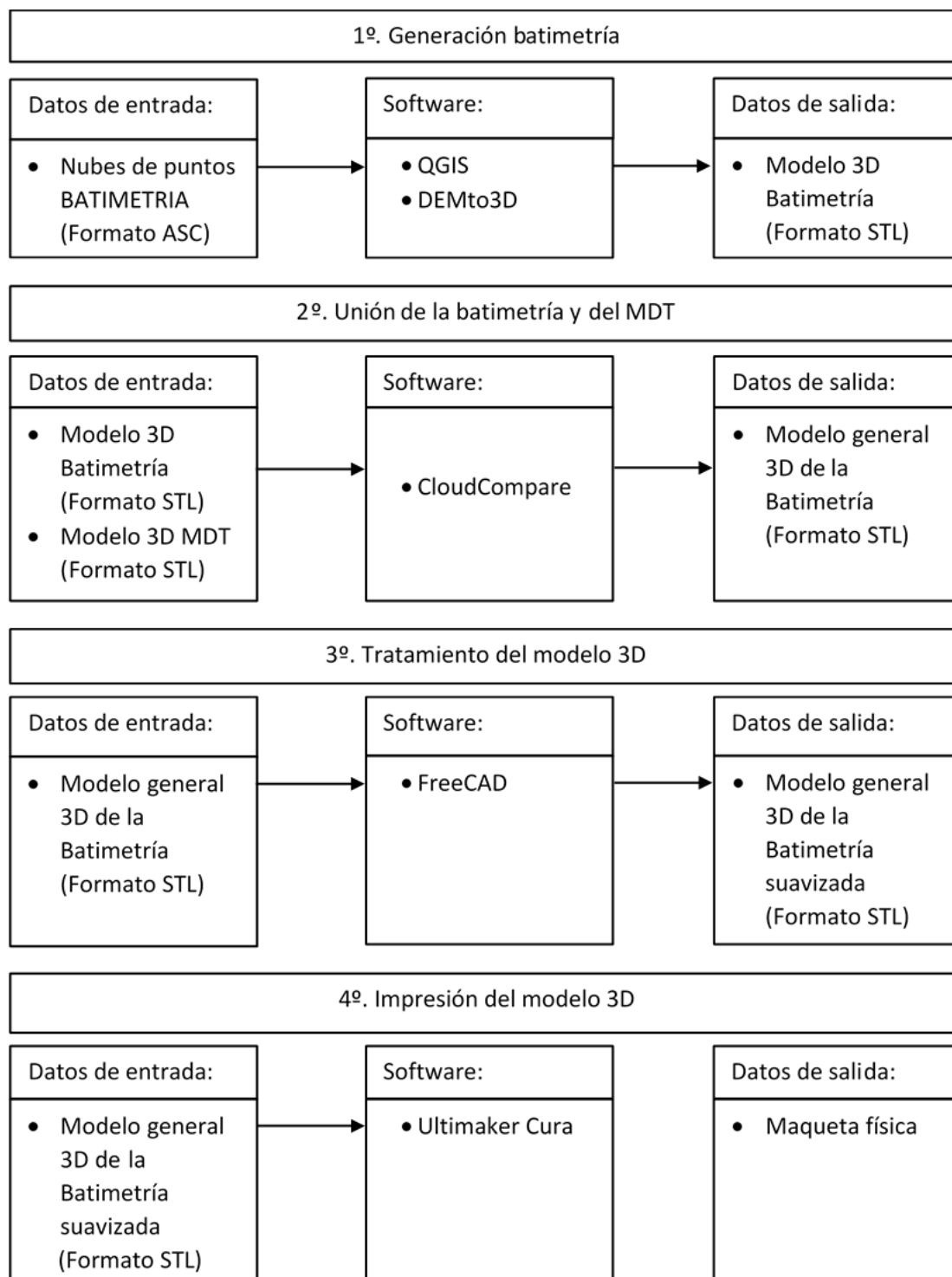


Tabla 7. Diagrama de procesos para la elaboración de la batimetría.

### 3.5.1 Generación batimetría

En este apartado se genera el modelo 3D de la batimetría utilizando el *software* QGIS y su extensión DEMto3D de la misma manera que se utilizó en apartados anteriores.

#### 3.5.1.1 Datos de entrada

Como datos de entrada se utilizará la batimetría de la Ría de Pontevedra en formato ASC. Esta batimetría fue facilitada por el Instituto Hidrográfico de la Marina (licencia de cesión de datos número



08/18), tomada en concreto por el buque hidrográfico “Tofiño”. En la Tabla 8 se describen las características de las nubes de puntos de la batimetría:

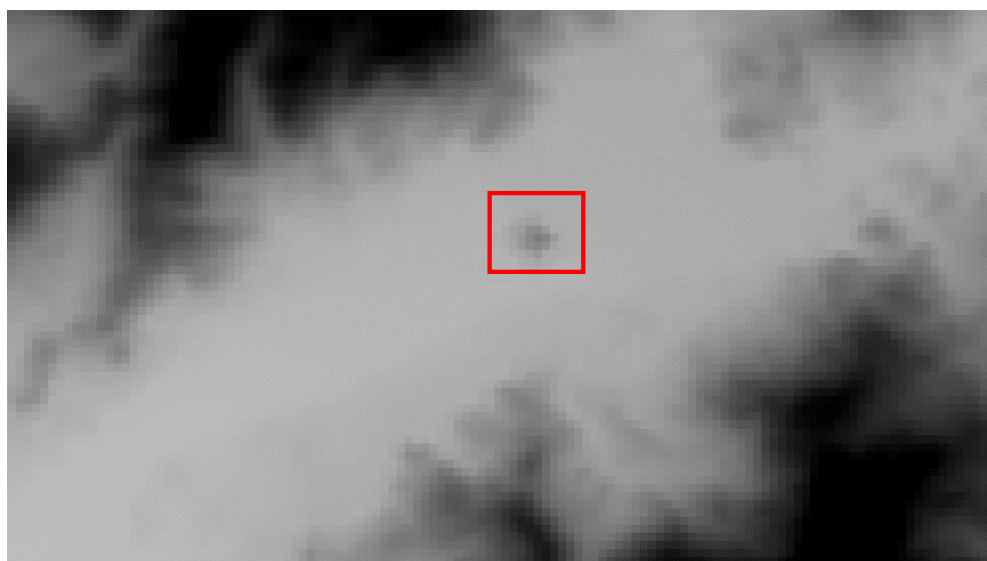
Características Batimetría	
<b>Descripción</b>	Fichero de nubes de puntos obtenidos por el Buque Hidrográfico "Tofiño" (A-32) clase “Malaspina”.
<b>SGR</b>	WGS84
<b>Unidad de descarga</b>	Interpolación bilineal con una resolución de 50 metros.
<b>Formato</b>	Fichero ASC

**Tabla 8. Características Batimetría.**

En el caso de no disponer de la batimetría proporcionada por el Instituto Hidrográfico de la Marina, los datos se pueden obtener a través de la página *web EMODnet Bathymetry* [38]. De la misma manera que ocurría con el PNOA, esta organización ofrece los datos batimétricos de manera gratuita gracias a su centro de descargas, pudiéndose descargar la zona de interés que se seleccione. Estos datos están actualizados desde septiembre de 2018, y desde 2016 tienen una resolución de 50 metros [38].

### 3.5.1.2 Software

Para trabajar con los datos de entrada se utiliza el *software* QGIS. Primeramente, se necesita reproyectar el archivo para poder unirlo posteriormente con el MDT. Para ello, con la herramienta “Transformar archivo” se cambia el SGR WGS84 por el ETRS89, que es con el que se estaba trabajando. Para transformar el archivo a STL, se utiliza la extensión de QGIS, DEMto3D. La metodología empleada es la misma que la del apartado 3.2.1.2. En la Figura 3-35 se puede observar la batimetría de la zona con el efecto “Unibanda pseudocolor”. Para intentar recabar el máximo terreno posible, y debido a las limitaciones de las impresoras 3D en cuanto al tamaño de la maqueta, el modelo se exporta a una escala 1:25000 y con un factor de elevación de 2, para que se pueda apreciar el calado correctamente.



**Figura 3-35. Imagen batimetría con renderización “Gris monobanda” importada en QGIS.**

### 3.5.1.3 Datos de salida

El dato de salida es la batimetría de la zona en formato STL a escala 1:25000.

### 3.5.2 Unión de la batimetría y del MDT

En este apartado, para facilitar la visualización y localización de la Isla de Tambo dentro del modelo batimétrico, se unirá el modelo 3D de la batimetría con el del MDT de la isla, ambos a la misma escala y con el mismo factor de elevación.

#### 3.5.2.1 Datos de entrada

Como datos de entrada se tienen los obtenidos en el apartado 3.5.1.3 (Figura 3-36), además del MDT de la Isla de Tambo a escala 1:25000 y con factor de elevación 2 (Figura 3-37).

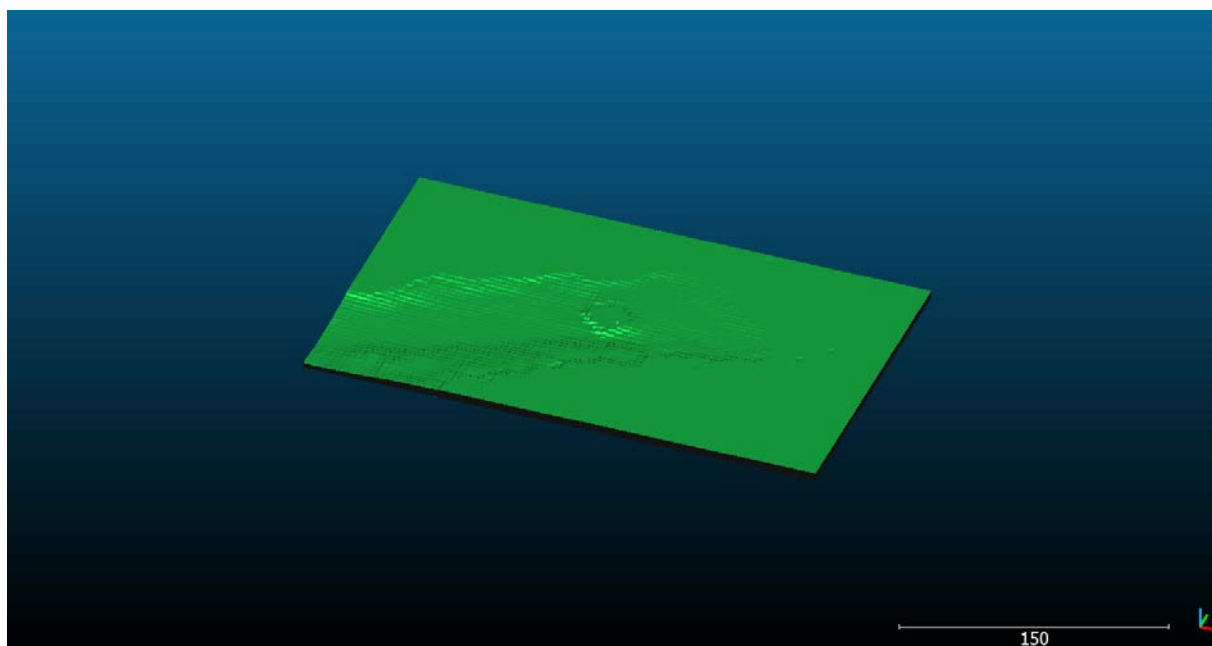


Figura 3-36. Batimetría zona Isla de Tambo en el *software* CloudCompare.

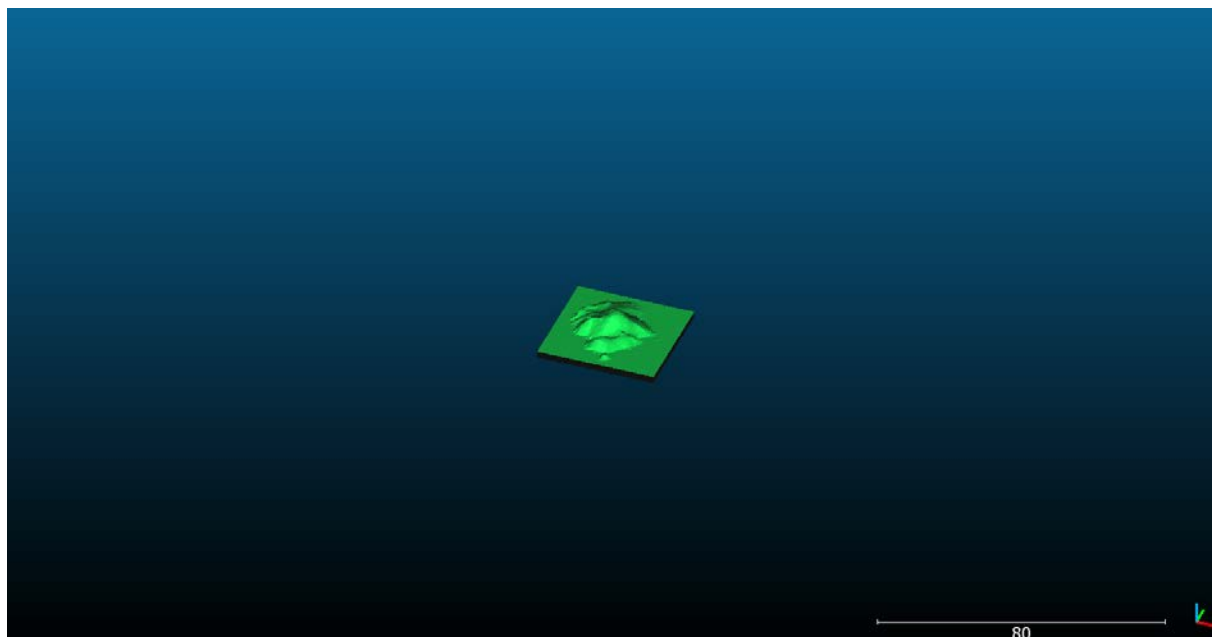


Figura 3-37. MDT Isla de Tambo en el *software* CloudCompare.

### 3.5.2.2 Software

En este apartado se unirán, en un mismo modelo, los dos archivos de entrada con el *software* CloudCompare. Para ello, primeramente se elimina la base del MDT de la isla de la misma manera que se realizó en el apartado 3.4.2. Una vez eliminada la base se unen ambos modelos que están georreferenciados con ayuda de la herramienta “*Merge multiple clouds*”. Es preciso mover manualmente uno de los modelos en el eje z para que lleguen a estar en contacto y poder unirlos sin ningún tipo de problemas.

Cuando ambos modelos están unidos formando un único modelo batimétrico 3D de la zona, se recortan las zonas del modelo que no interesan. El paso anterior es necesario para reducir el tamaño del modelo y cumplir con las limitaciones de la impresora 3D. Estos cortes se realizan con ayuda de la herramienta “*Segment*”.

### 3.5.2.3 Datos de salida

Como datos de salida se obtiene un único modelo batimétrico que aúna la batimetría y el MDT de la Isla de Tambo, en formato STL (Figura 3-38).

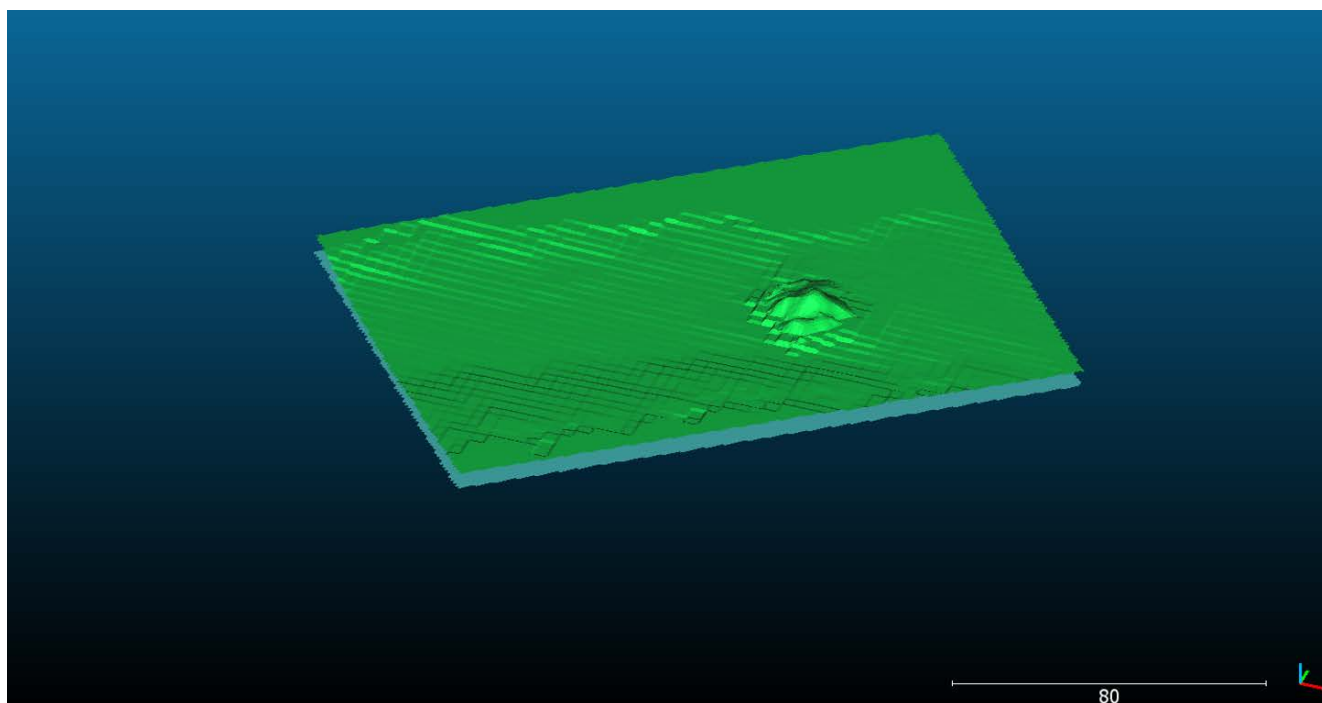


Figura 3-38. Modelo batimétrico general en el *software* CloudCompare.

### 3.5.3 Tratamiento del modelo 3D

El modelo 3D se tratará con el *software* FreeCAD para suavizarlo de la misma manera que se realizó en el apartado 3.2.2. En este caso el suavizado se realiza con 4 iteraciones, para evitar que la batimetría se suavice demasiado y pierda precisión (Figura 3-39).

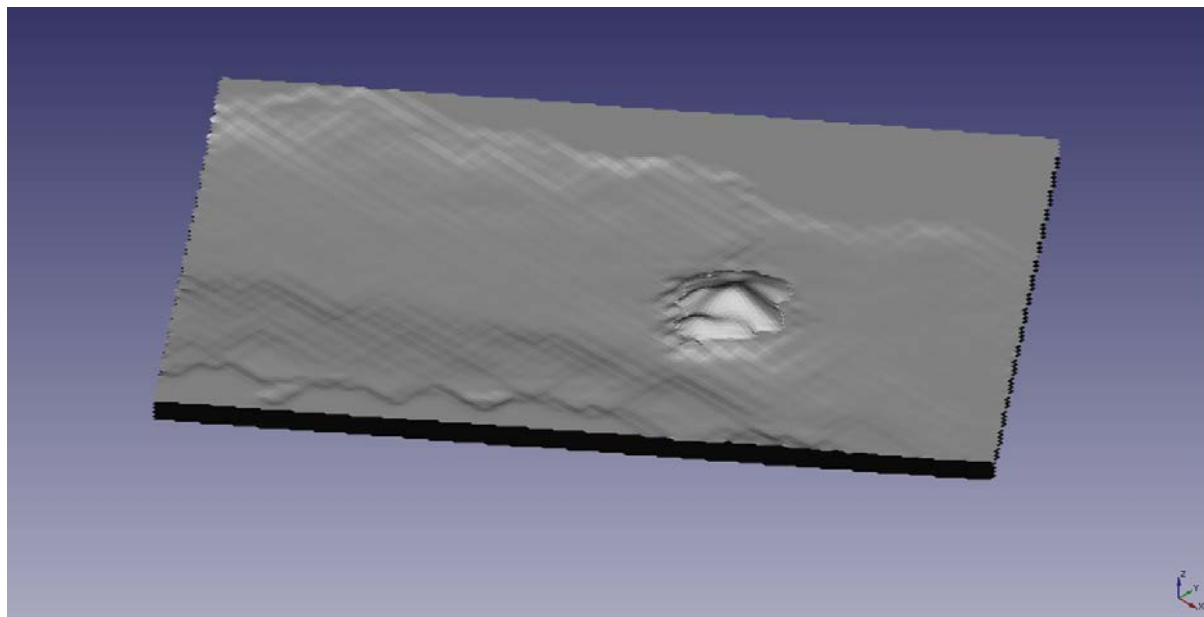


Figura 3-39. Suavizado modelo batimétrico general con el *software* FreeCAD.

#### 3.5.4 Impresión del modelo 3D

El modelo 3D se imprimirá con el mismo *software* y siguiendo los mismos pasos con los que se llegó a imprimir el modelo MDT en el apartado 3.2.3 . En la Figura 3-40 se observa la impresora Ultimaker Cura imprimiendo la maqueta.

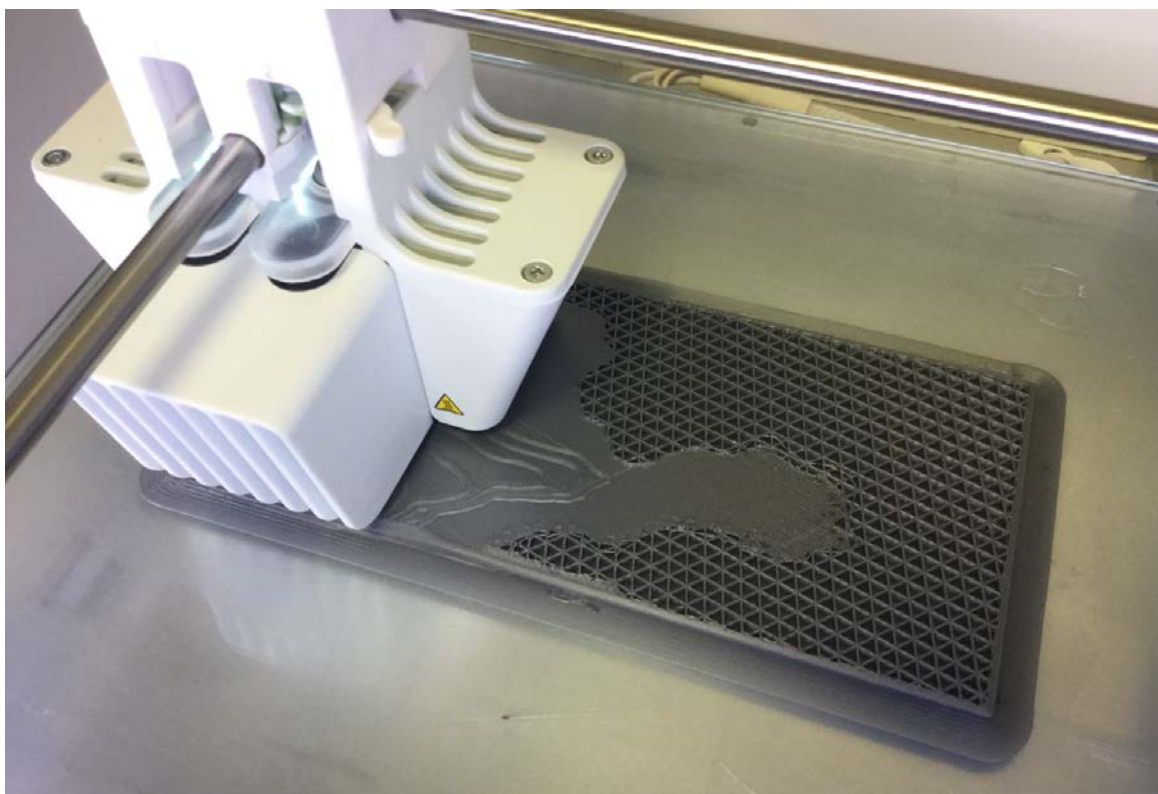


Figura 3-40. Vista previa del modelo 3D de la batimetría general en el *software* Ultimaker Cura.



## 4 RESULTADOS

En este apartado se presentan los diferentes productos obtenidos. Primero se expondrá la maqueta impresa del MDT de la Isla de Tambo, luego la maqueta del MDE de la isla y, finalmente, los diferentes *slices* a diferentes alturas. Además, se analizan y se comparan los diferentes modelos para ver su utilidad y sus ventajas con respecto al plano cartográfico (en papel) en el planeamiento de una operación militar.

En la Tabla 9 se muestra, a modo de resumen, los diferentes modelos realizados y el tiempo de impresión para cada uno de ellos.

Modelo físico 3D	Tiempo de impresión
MDT (factor de elevación: 1)	11 horas 40 minutos
MDT (factor de elevación: 2)	17 horas 55 minutos
MDT (factor de elevación: 3)	20 horas 11 minutos
MDE (factor de elevación: 1)	26 horas 14 minutos
<i>Slice</i> MDT 0-20 metros (factor de elevación: 2)	3 horas 17 minutos
<i>Slice</i> MDT 20-40 metros (factor de elevación: 2)	1 hora 40 minutos
<i>Slice</i> MDT 40-60 metros (factor de elevación: 2)	41 minutos
<i>Slice</i> MDT 60-80 metros (factor de elevación: 2)	16 minutos
Batimetría (factor de elevación: 2)	7 horas 33 minutos
Batimetría (factor de elevación: 10)	8 horas 24 minutos

Tabla 9. Resumen de las maquetas generadas y sus tiempos de impresión.

### 4.1 Maquetas MDT

Se han llegado a imprimir tres modelos diferentes del MDT. Una de las ventajas que tiene la impresión de los modelos físicos del terreno es el factor de elevación que, a partir de su modificación, permite elaborar diferentes modelos en función de la maniobra o fase de la operación militar a planear. Por ejemplo, en el caso de tener operaciones en las que el movimiento de inserción y extracción del personal se hace a través de helicópteros, un modelo físico con un factor de elevación mayor puede



permitir visualizar de forma más rápida qué zonas son óptimas para la toma y despegue de helicópteros. Sin embargo, para la realización de operaciones terrestres y combinadas como un *Raid Anfibio*, un modelo con factor de elevación al natural, sin exagerar el relieve y con gran detalle del terreno, sería lo más adecuado.

En nuestro caso se ha llegado a imprimir un modelo con factor de elevación al natural (factor 1), otro con factor 2 y un tercer modelo con factor 3. Además, la maqueta con factor de elevación 3 se ha impreso con tratamiento del suavizado y o sin él para evaluar su diferencia.

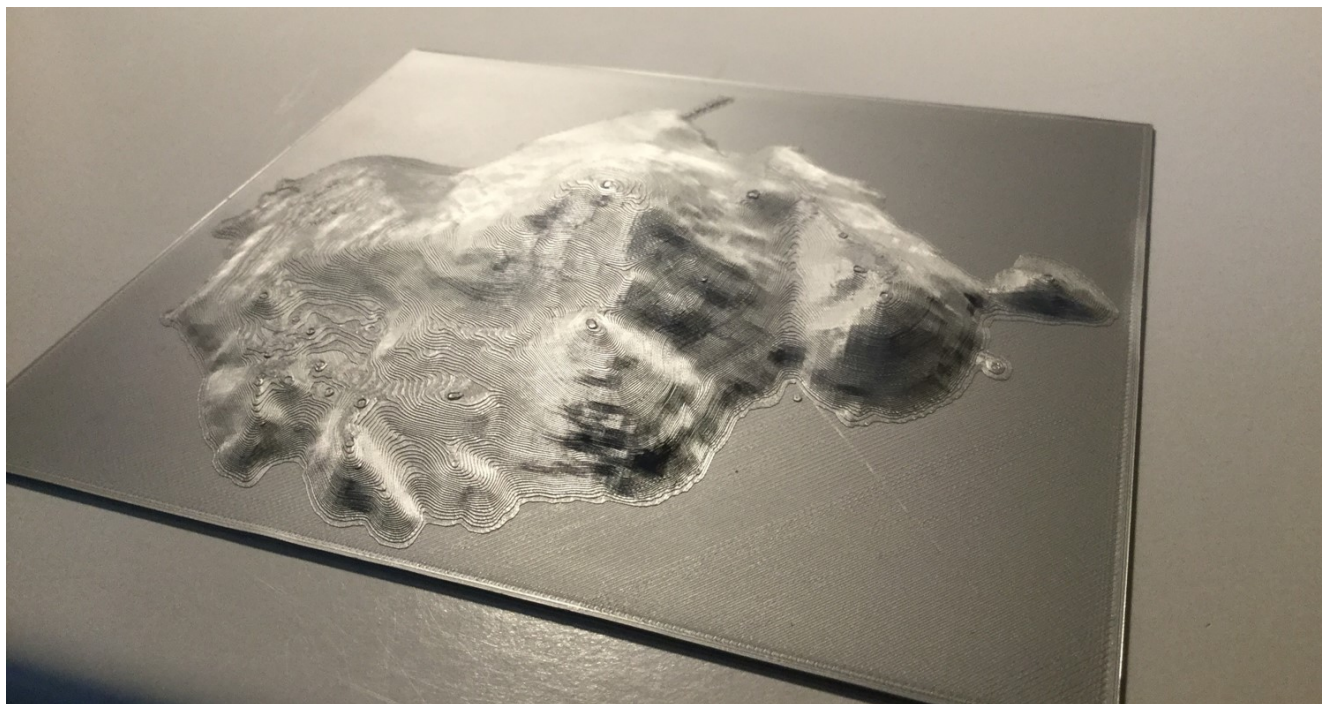
En la Figura 4-1 se puede observar una comparativa de la Isla de Tambo en nuestra maqueta con factor de elevación 1, junto con una ortofoto obtenida del PNOA. Se puede observar cómo se distingue el muelle y la punta de Tenlo Chico. Además, esta maqueta del MDT nos permite observar los pequeños salientes rocosos que posee la isla en su cara oeste; mientras que en la ortofoto, al tener la presencia de la vegetación, es menos claro este accidente geográfico.

En la Figura 4-2 podemos observar la impresión de la Isla de Tambo en perspectiva. La maqueta tiene una altura de 17,3 mm a escala 1:5000.



**Figura 4-1. Comparación de la maqueta del MDT (factor 1) con la ortofoto de la Isla de Tambo.**

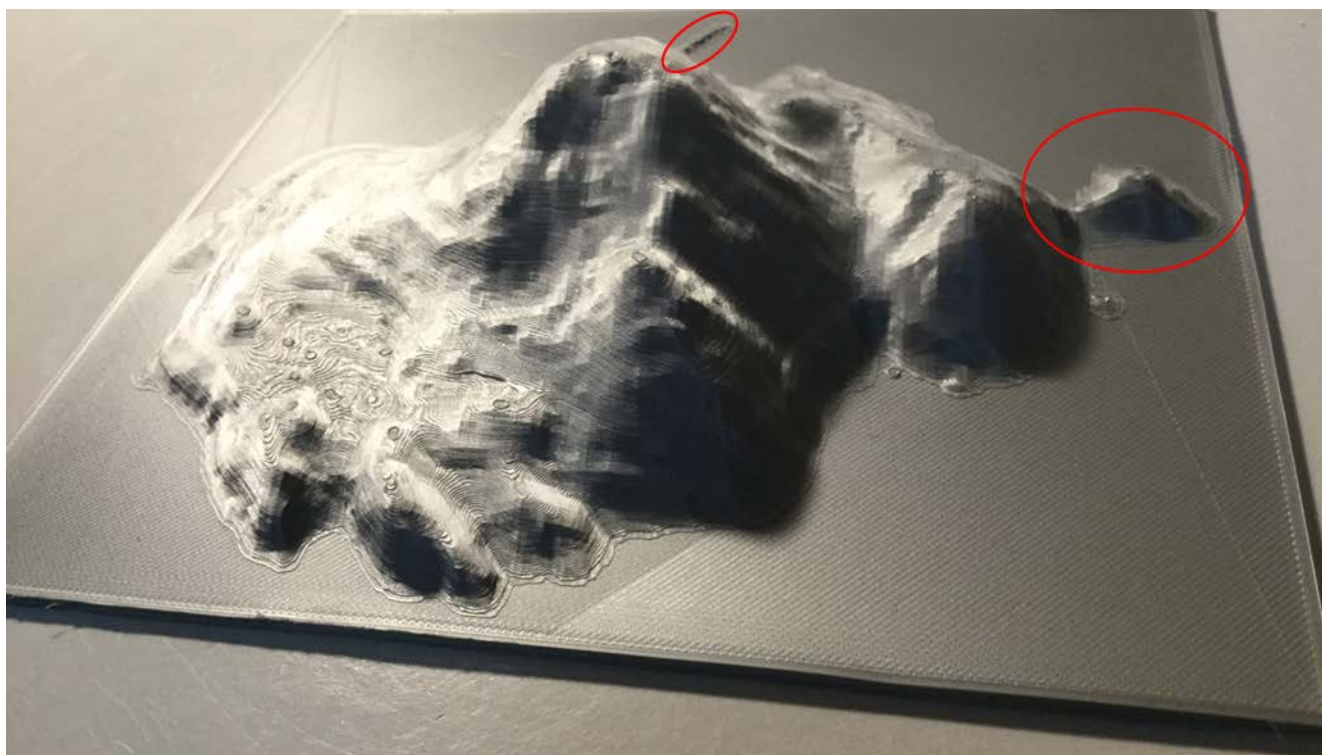




**Figura 4-2. Maqueta del MDT de la Isla de Tambo con factor de elevación 1.**

El segundo modelo que se ha impreso es el que tiene un factor de elevación 2 (Figura 4-3). Esta maqueta tiene una altura de 34,6 mm. En ella se aprecia con mayor detalle el muelle y como la punta de Tenlo Chico está separada de la isla y unida únicamente por una línea de rocas y una pasarela muy estrecha (marcado en rojo), cosa que en la maqueta con factor de elevación 1 era más difícil de apreciar. Sin embargo, vemos como el relieve es mucho mayor, apreciándose mucho más la diferencia en la parte norte donde se sitúa la playa de Area da Illa. La maqueta muestra las alturas de salida de la playa más pronunciadas de lo que realmente son. En la comparación de la Figura 4-4, al ser una vista de planta, no se aprecia tanto. Sin embargo, la apreciación en perspectiva es más significativa (Figura 4-5).

En la Figura 4-5 se puede apreciar la diferencia entre la maqueta con factor de elevación 1 y 2.

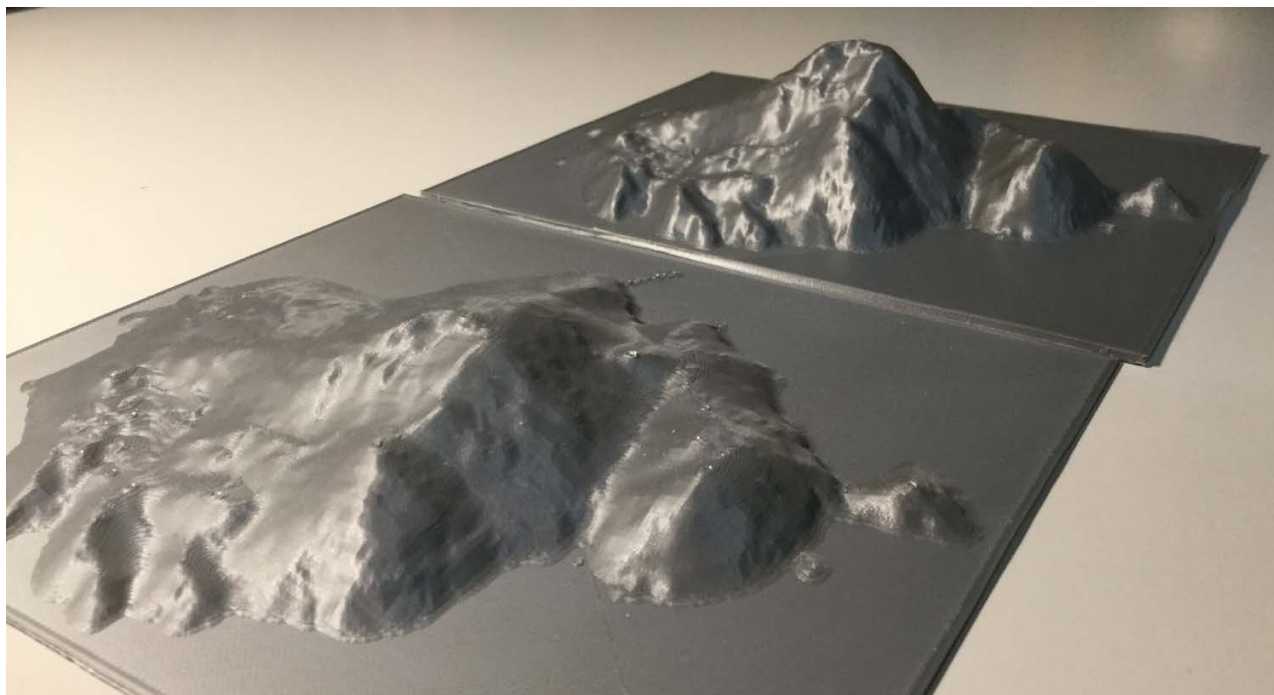


**Figura 4-3. Maqueta del MDT de la Isla de Tambo, factor elevación 2.**



**Figura 4-4. Comparación de la maqueta del MDT (factor 2) con la ortofoto de la Isla de Tambo.**

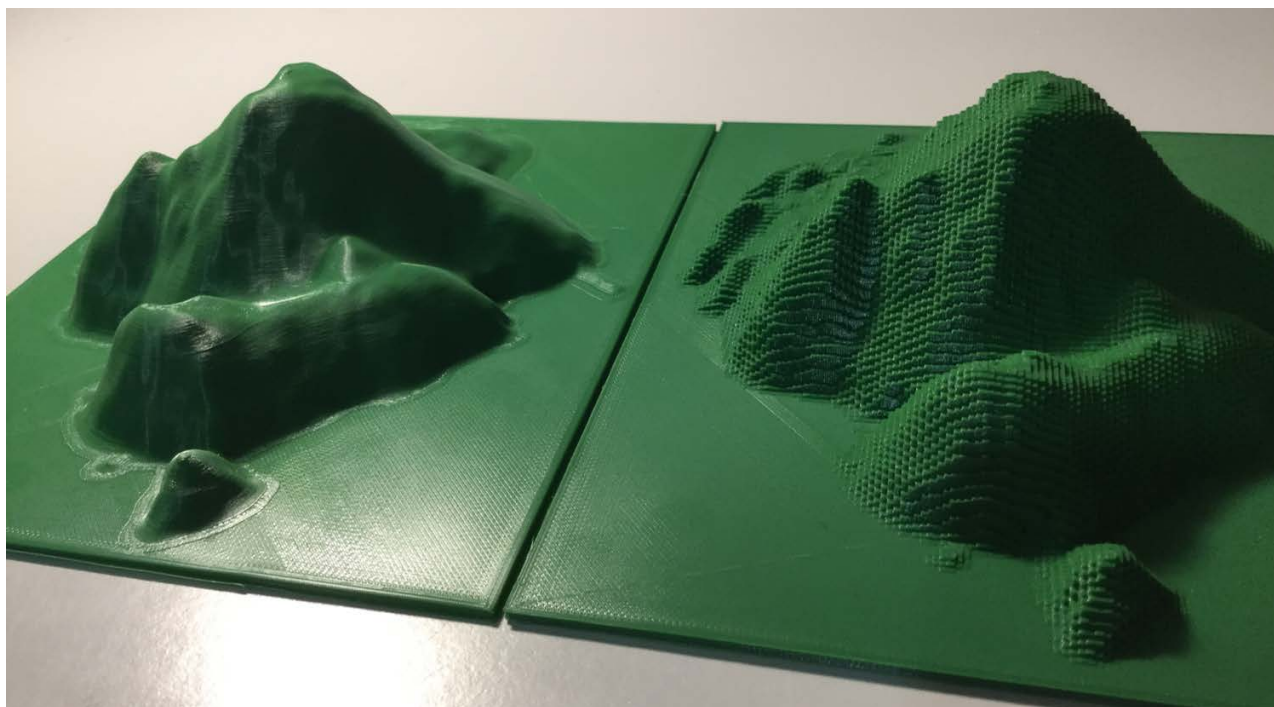




**Figura 4-5. Comparación de las maquetas MDT con factor de elevación 1 (delante) y 2 (detrás).**

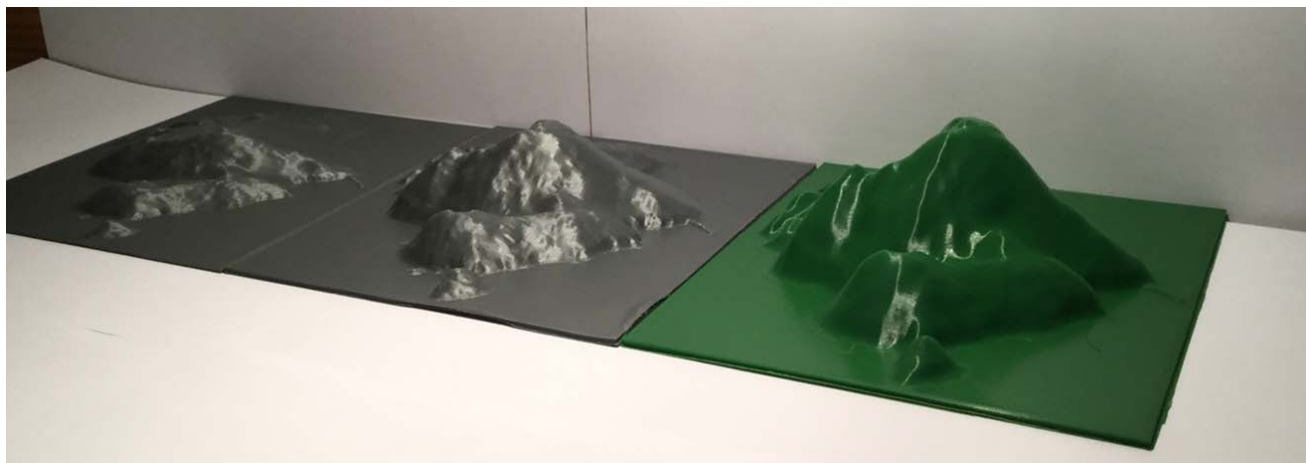
Para concluir con las impresiones de los modelos MDT, el último modelo que se ha impreso es el que tiene un factor de elevación 3. Esta maqueta, con una altura de 48 mm, se ha impreso aplicando un suavizado con FreeCAD y sin él para apreciar la diferencia. El relieve está mucho más exagerado que en los modelos anteriores. Sin embargo, esta sería la maqueta que permite definir qué partes del terreno son aptas para el aterrizaje de una aeronave, al resaltarse las planicies (llanuras y valles) de las zonas de cota y pequeños espolones donde los aterrizajes no son aconsejables.

En la siguiente Figura 4-6 se puede observar la diferencia entre el modelo con el tratamiento de suavizado aplicado y sin él.

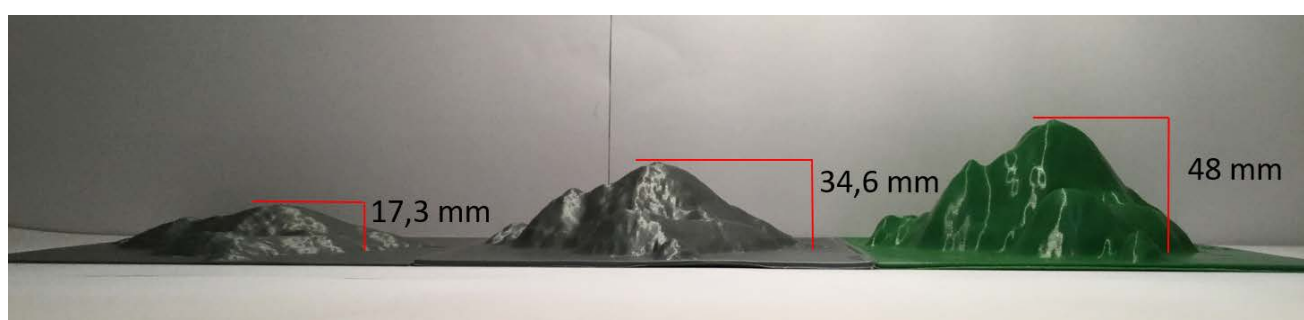


**Figura 4-6. Comparación de las maquetas del MDT suavizada (izquierda) y sin suavizar (derecha).**

En las Figura 4-7 y Figura 4-8 se pueden apreciar la diferencia entre las distintas maquetas impresas.



**Figura 4-7. Comparación de las 3 maquetas MDT.**



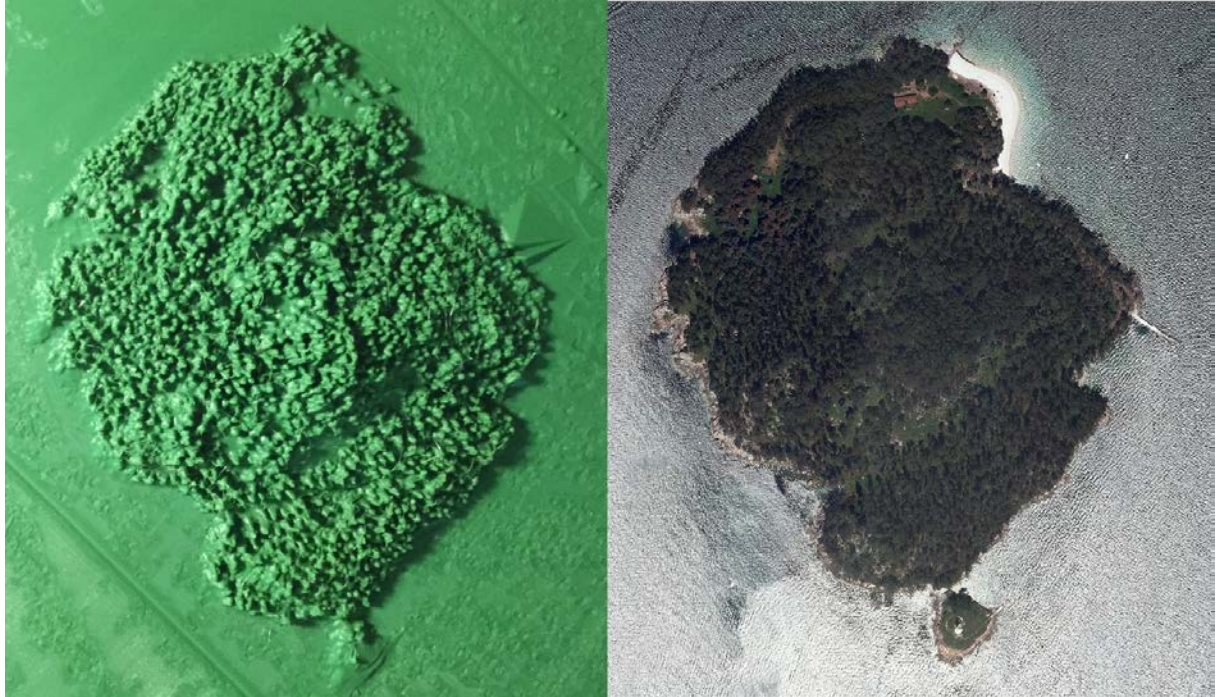
**Figura 4-8. Comparación de las 3 maquetas MDT con sus respectivas alturas.**

## 4.2 Maqueta MDE

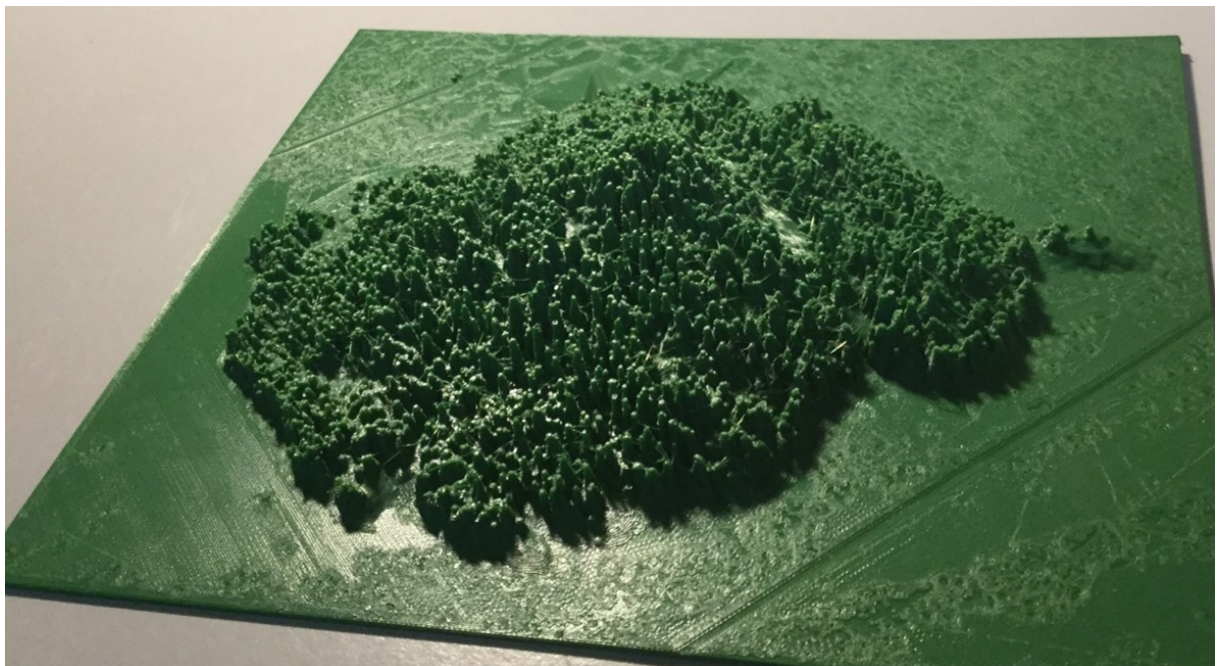
La impresión del MDE permite la visualización de la superficie del terreno de estudio, con la vegetación relativa a este terreno, así como las edificaciones que se encuentren en él. La ventaja que nos proporciona la impresión 3D del MDE con respecto al plano es la claridad con la que se presenta la vegetación. El plano, a pesar de tener temática e indicarnos el tipo de vegetación en la zona, no llega a ser suficiente puesto que no se aprecia su cobertura y densidad. En operaciones militares, una zona del terreno sobre el plano puede parecer apta para la maniobra planeada, mientras que cuando se está “*in situ*” no lo es. Este hecho provoca retardos en la operación y que los comandantes de las unidades tengan que planear sobre la marcha una nueva maniobra. La impresión del MDE del terreno evita esto último. Al imprimir el MDE podemos observar claramente qué zonas están más pobladas de vegetación que otras, su proximidad a instalaciones y edificaciones, etc. Además, al compararlo con el MDT de la misma zona, se puede estimar la densidad de la vegetación, si es más alta o baja, evitando el “engaño” que se sufre muchas veces en operaciones por parte del plano.

En nuestro caso, el MDE de la isla se ha impreso con un factor de elevación 1 para poder compararlo con el MDT de factor de elevación 1 que se ha impreso anteriormente. Por lo tanto, maqueta MDE tiene la misma escala y una altura de 26,6 mm. En la Figura 4-9 se puede apreciar la comparación de la maqueta impresa con una ortofoto de la isla.



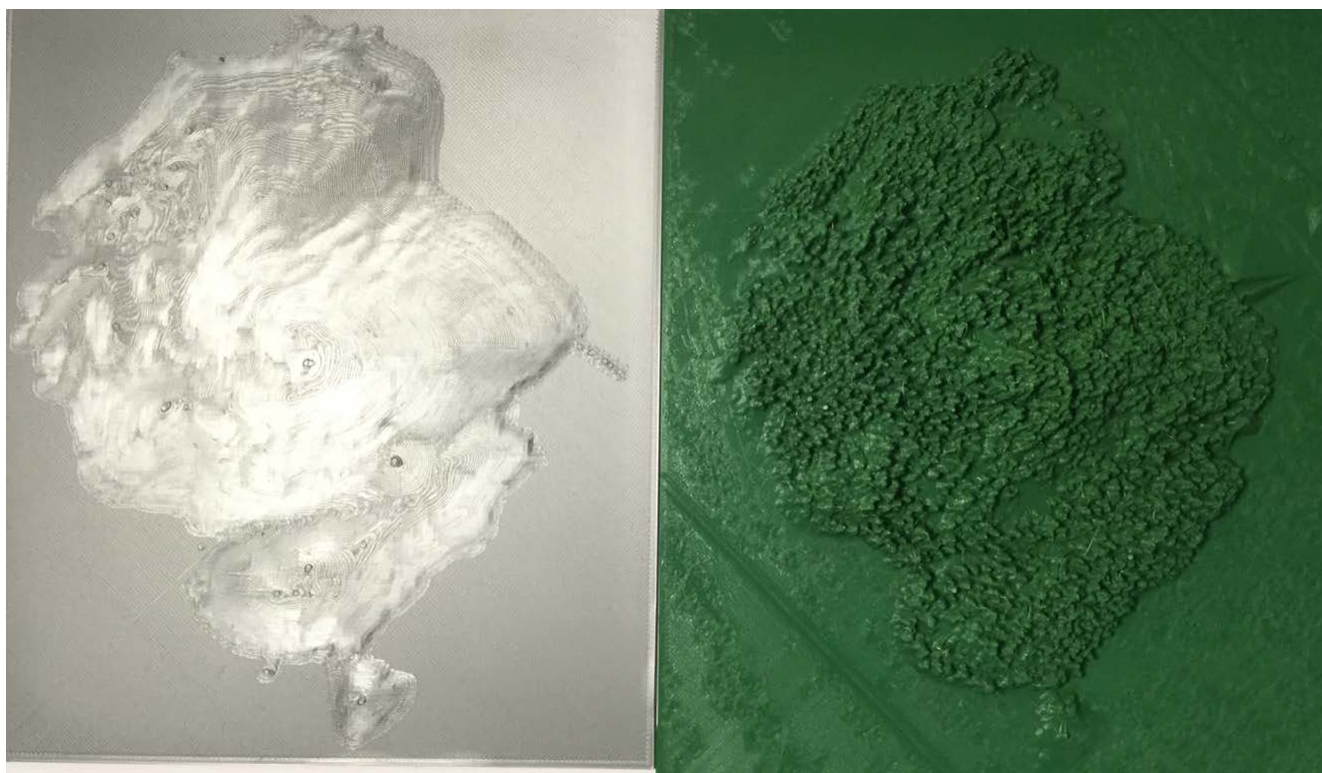


**Figura 4-9. Comparación de la maqueta MDE (factor de elevación 1) con la ortofoto de la Isla de Tambo.**

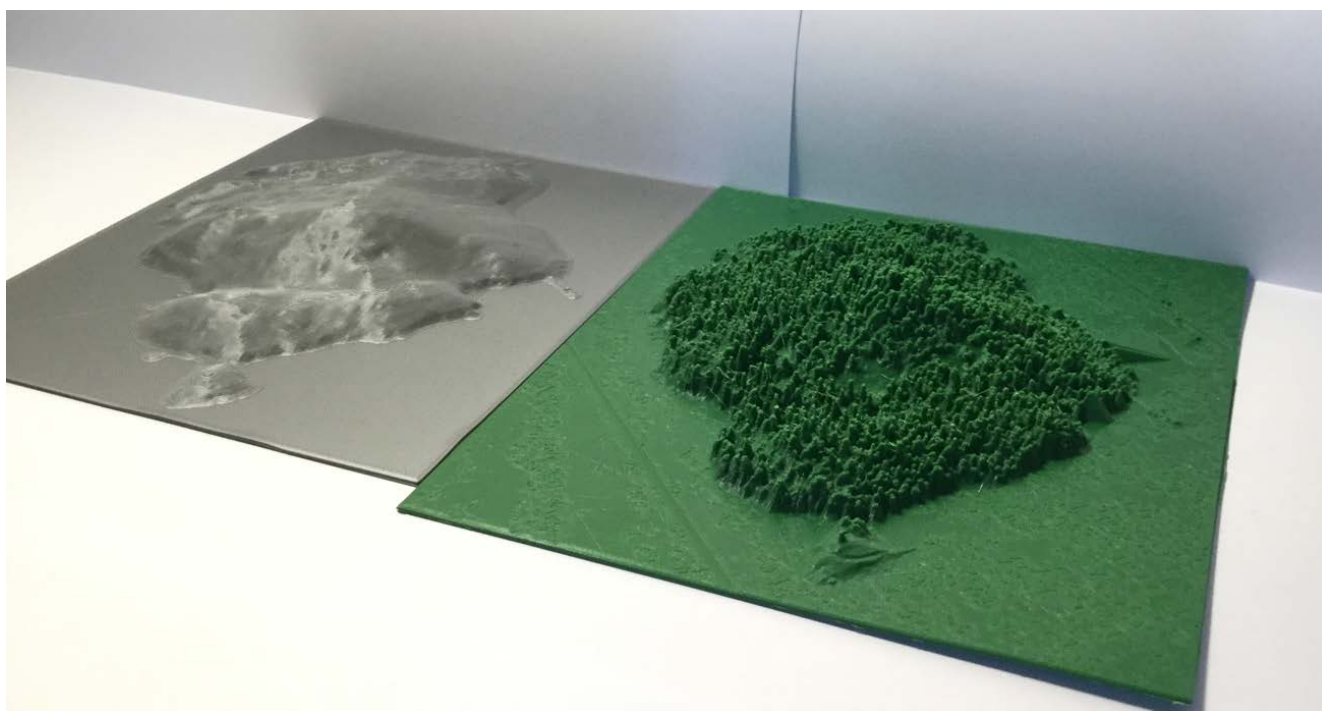


**Figura 4-10. Maqueta MDE de la Isla de Tambo con factor de elevación 1.**





**Figura 4-11. Comparación de la maqueta del MDT (izquierda) con la del MDE (derecha), en planta.**



**Figura 4-12. Comparación de la maqueta del MDT (izquierda) con la del MDE (derecha), en perspectiva.**



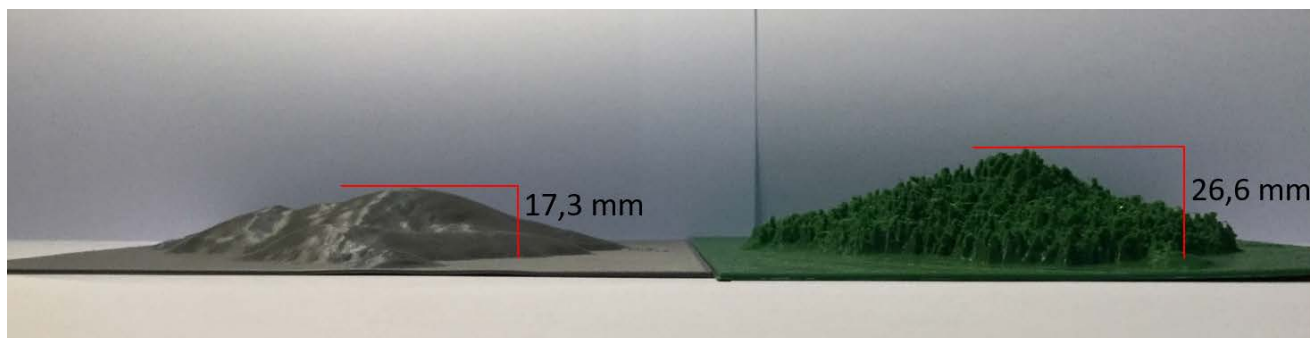


Figura 4-13. Comparación de las maquetas del MDT (izquierda) y del MDE (derecha) con sus alturas correspondientes.

### 4.3 Maqueta de los diferentes *slices* del MDT

Una de las ventajas que poseen las maquetas es que se pueden modificar para poder estudiarlas mejor. En este caso en particular, los cortes horizontales (XY) o los diferentes *slices* del MDT permiten determinar más claramente que zonas del terreno están a una determinada altura.

Por ejemplo, cuando se planea una operación militar y se interpreta el plano para buscar la localización de un punto, se deben de seguir las curvas de nivel y medir a que altura se encuentra dicho enclave, de qué forma es más fácil atacarlo, de qué manera es más conveniente llegar hasta él, etc. Realizar *slices* facilita este proceso, ya que agiliza la localización del punto, permitiendo al usuario que estudia la maqueta determinar más rápidamente la altura de este, así como posibles itinerarios hasta él.

La maqueta se ha cortado en 4 *slices* siguiendo las curvas de nivel directoras o maestras. Para poder apreciar estos *slices*, sin necesidad de aplicarles un factor de elevación muy grande, se ha cortado la maqueta del MDT cada 20 metros, permitiendo que los *slices* se aprecien a la perfección con un factor de elevación de 2.

Los cortes horizontales que se han realizado son: (1) *slice* de 0-20 metros (Figura 4-14), (2) *slice* de 20-40 metros (Figura 4-15), (3) *slice* de 40-60 metros (Figura 4-16) y (4) *slice* de 60-80 metros (Figura 4-17).

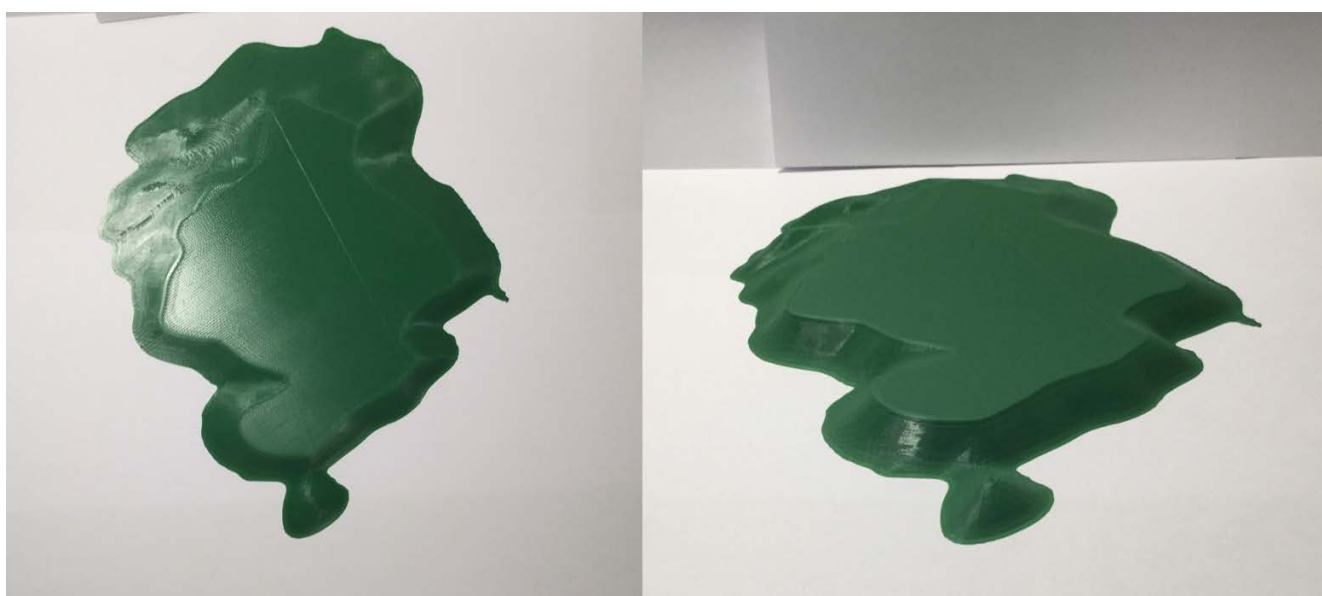
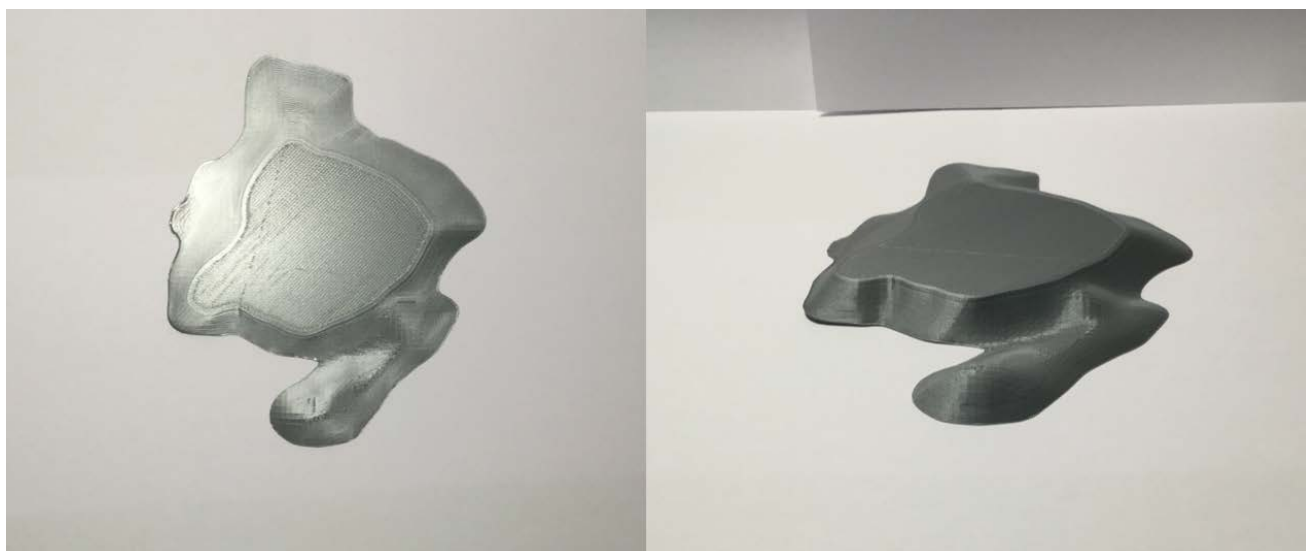
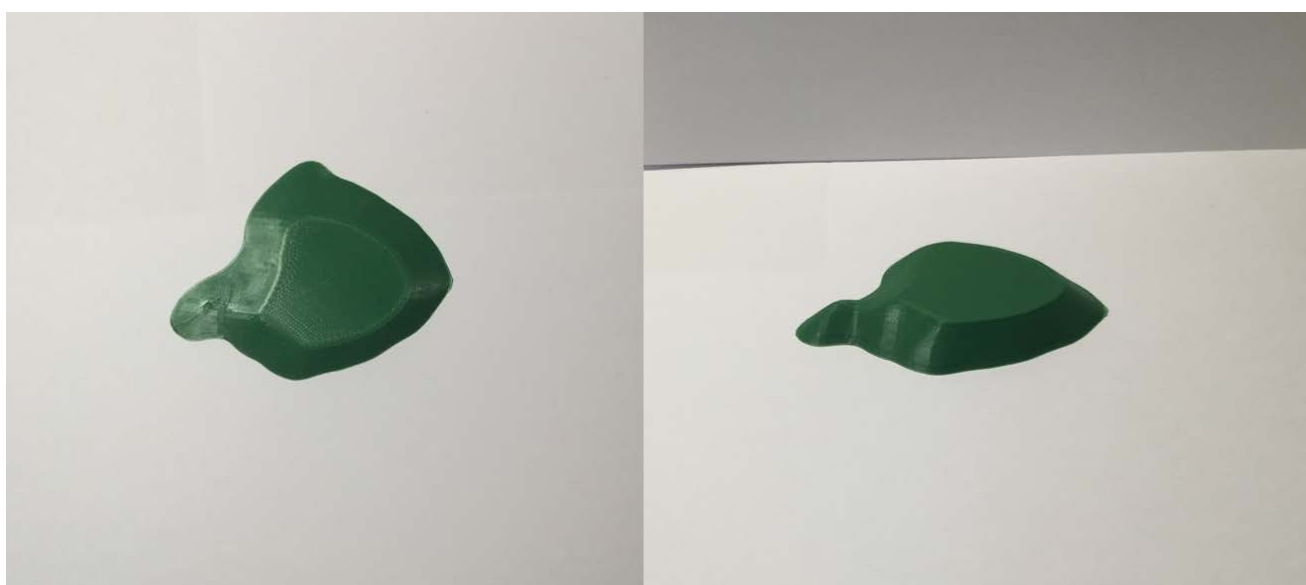


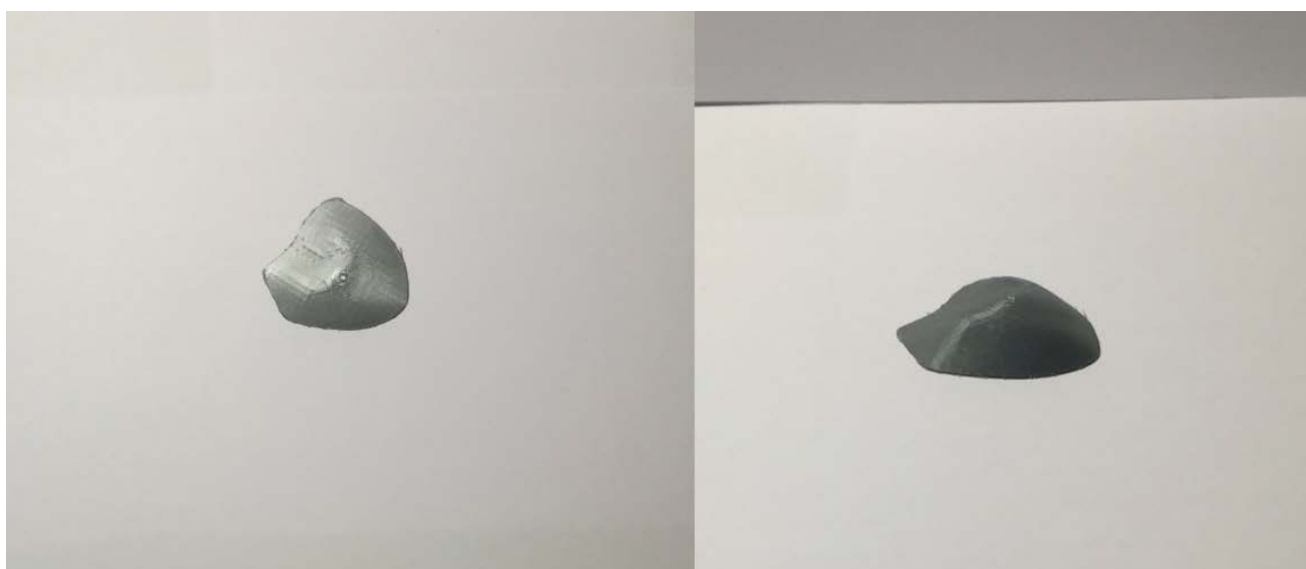
Figura 4-14. *Slice* de 0-20 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha).



**Figura 4-15.** *Slice* de 20-40 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha).



**Figura 4-16.** *Slice* de 40-60 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha).



**Figura 4-17.** *Slice* de 60-80 metros. Vista en planta (izquierda) y vista en perspectiva (derecha).

De los *slices* se puede apreciar que la zona sur de la isla es la más llana, siempre que uno se encuentre por debajo de los 40 metros. Además, es la que tiene menor pendiente entre los 20 y 40 metros de altura, desde donde se realizaría el itinerario idóneo para alcanzar la cota. En la Figura 4-18 se puede apreciar cómo quedaría la isla al ir superponiéndole *slices*.

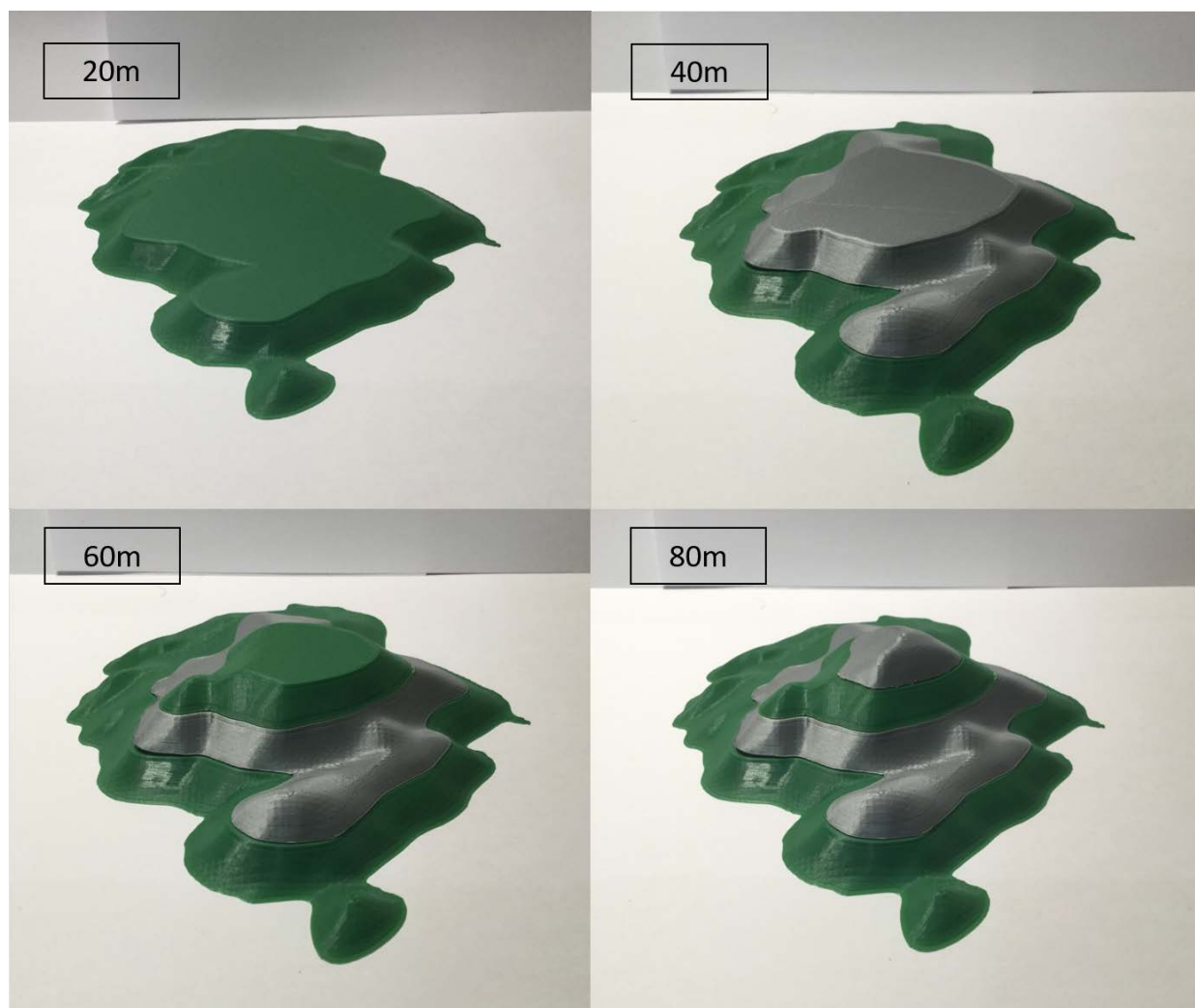


Figura 4-18. Mosaico que refleja la Isla de Tambo por alturas, superponiendo *slices*.

#### 4.4 Maqueta batimetría

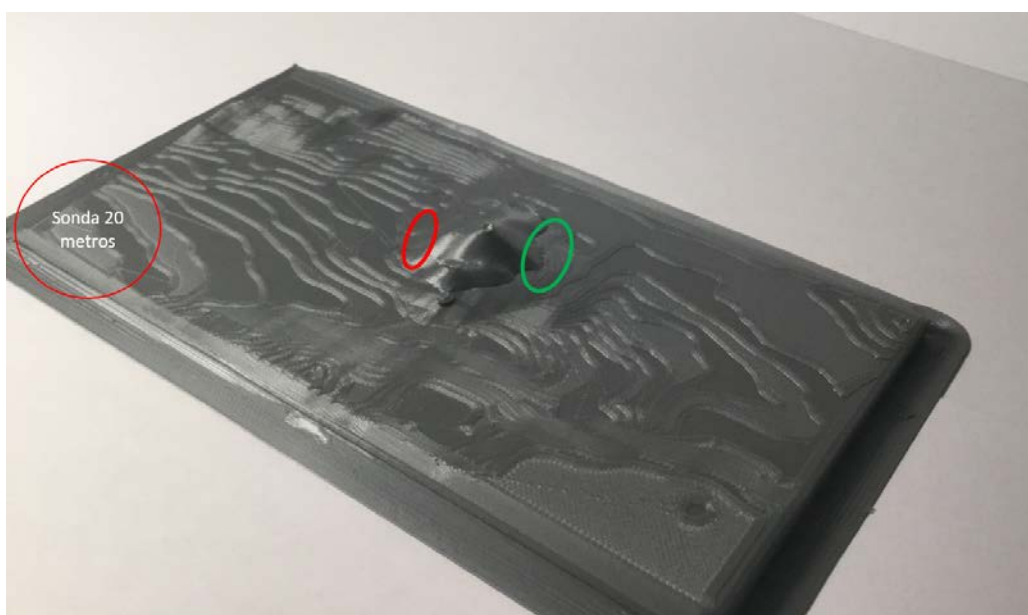
La batimetría es un factor clave a estudiar en un desembarco anfibio, ya que permite determinar las zonas por donde las embarcaciones podrán navegar sin ningún tipo de complicación. Una de las ventajas que posee la maqueta de la batimetría es que de un simple vistazo permite determinar si existe algún bajo que no se ha planeado o tenido en cuenta para el Movimiento Buque-Costa (MBC), además de indicar qué zonas tienen una mayor sonda.

En la Figura 4-19 se muestra una vista en planta de la maqueta, en la que se pueden apreciar las isóbatas, producidas por el cabezal de la impresora a la hora de imprimir dada la escasa resolución vertical de la batimetría a escala 1:25000. Estas líneas, que inicialmente en el modelo digital no son apreciables, favorecen la interpretación de la maqueta, ya que estas isóbatas indican diferentes profundidades.



**Figura 4-19. Vista en planta de la maqueta de la batimetría.**

Observando la maqueta se aprecia que la parte con una mayor sonda o calado (rojo) es la que se encuentra al suroeste de la isla, y que las proximidades de la playa de Area da Illa es la de menor calado (verde). Además, la zona con más sonda de la maqueta son 20 metros, que se encuentra en su esquina inferior izquierda correspondiendo al suroeste de la isla (Figura 4-20).



**Figura 4-20. Vista en perspectiva con las zonas con mayor o menor sonda marcadas.**

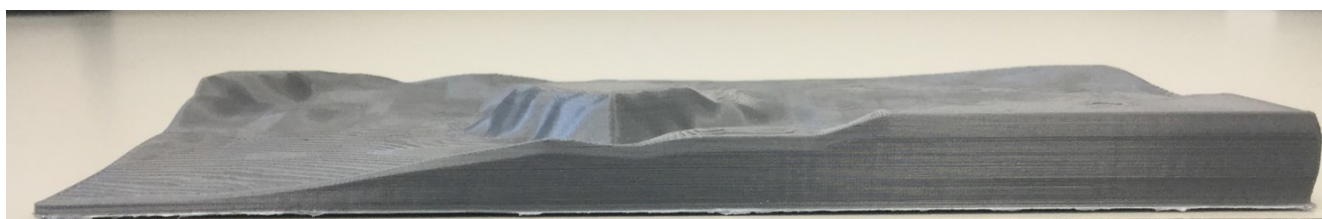
Sin embargo, uno de los inconvenientes que posee la maqueta de la batimetría es que, debido a las características de la impresora y la escala elegida (1:25000), la diferencia de alturas entre sondas no queda claramente marcada más que por unos pocos milímetros y las isóbatas. La diferencia en alturas se puede apreciar en la Figura 4-21 con una vista en alzado.



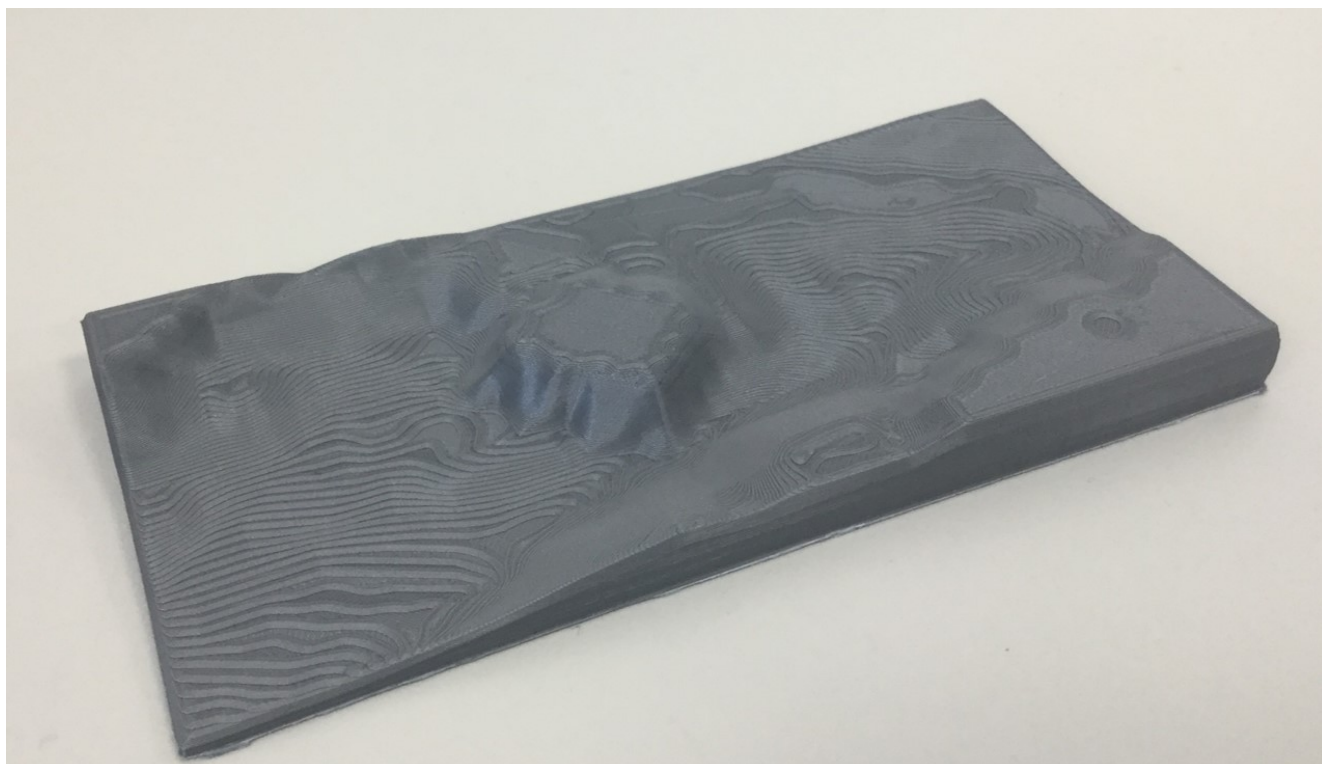


**Figura 4-21. Vista en alzado de la maqueta de la batimetría.**

Por este motivo, se imprime otra maqueta pero con factor de elevación de 10 (Figura 4-22 y Figura 4-23). En esta maqueta se puede apreciar mejor la diferencia de alturas del relieve marino. Además, se aprecia como el cabezal de la impresora dibuja de nuevo, esas isóbatas anteriormente mencionadas.



**Figura 4-22. Vista en alzado de la maqueta de la batimetría con factor de elevación 10.**



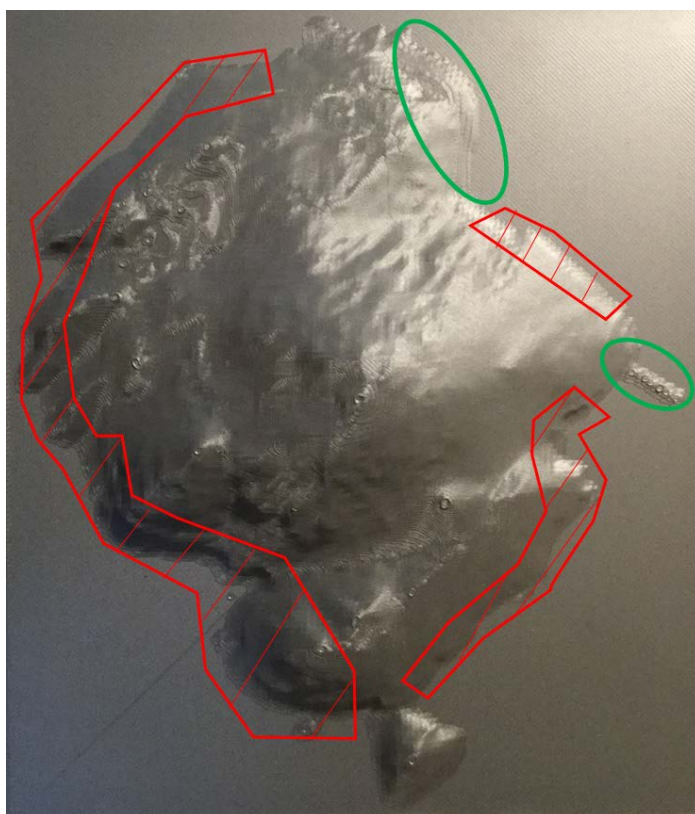
**Figura 4-23. Vista en perspectiva de la maqueta de la batimetría con factor de elevación 10.**

#### **4.5 Interpretación de ambas maquetas (MDT y MDE) para un desembarco anfibio**

Como se ha comentado en apartados anteriores, uno de los objetivos de este TFG es que las maquetas impresas de los modelos digitales del terreno se puedan utilizar para el planeamiento de una operación militar. En este apartado se analizarán ambas maquetas, con la hipótesis de un posible

desembarco en la Isla de Tambo y el estudio de esta para poder ocupar un punto crítico del terreno como es la cima del Monte San Facundo.

A la hora de realizar un desembarco, uno de los primeros aspectos que se deben estudiar son los denominados “sectores de desembarco”. Estos sectores se estudian y analizan eligiendo el más conveniente para la operación y eligiendo de éste una posible playa. En el caso específico de la Isla de Tambo, la elección de la playa de desembarco no es tarea laboriosa ya que solo disponemos de una. Sin embargo, esto se puede corroborar y estudiar en la maqueta impresa del MDT. Como se observa, no existe ninguna porción de costa cuya elevación permita el desembarco (Figura 4-24). Además, una de las características más importantes a la hora de elegir una playa es la salida que tenga esta para las unidades que desembarcan. Se debe de intentar que la playa no esté dominada por ningún accidente geográfico cercano, ya sea un espolón o una cota cercana que tenga campo de tiro suficiente sobre la misma.



**Figura 4-24. Zonas aptas para el desembarco (aptas en verde y no aptas en rojo).**

Además, observando la maqueta vemos que la playa Area da Illa no está bajo el control de ningún punto crítico del terreno. Esto es mucho más complicado de observar en el plano. En la Figura 4-25 observamos una comparación del plano y la maqueta, y como en la maqueta es más sencillo identificar los puntos dominantes del terreno y como la playa de Area da Illa no está bajo el control de ninguno de ellos. Sin embargo, el muelle que *a priori* podría ser una zona óptima para algún desembarco logístico, vemos que puede estar controlado por uno de esos puntos.



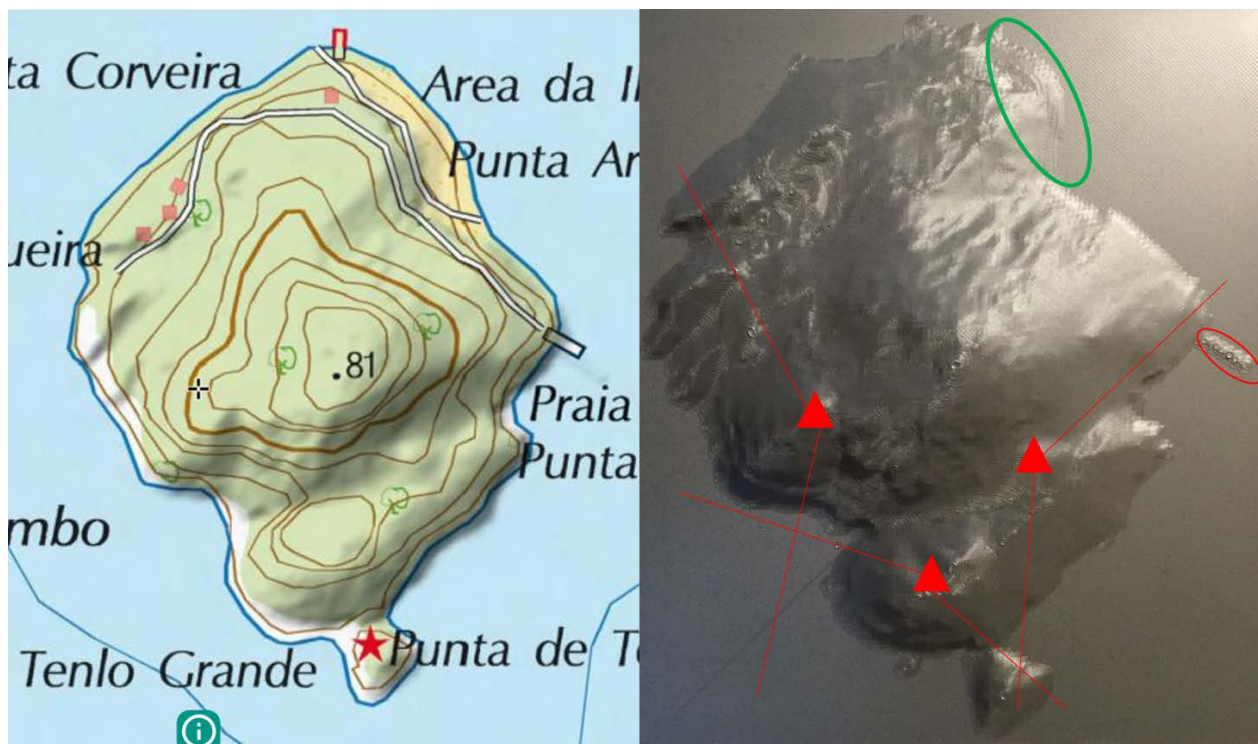


Figura 4-25. Comparación del plano (izquierda) con la maqueta MDT (derecha) y los puntos dominantes del terreno marcados en esta última.

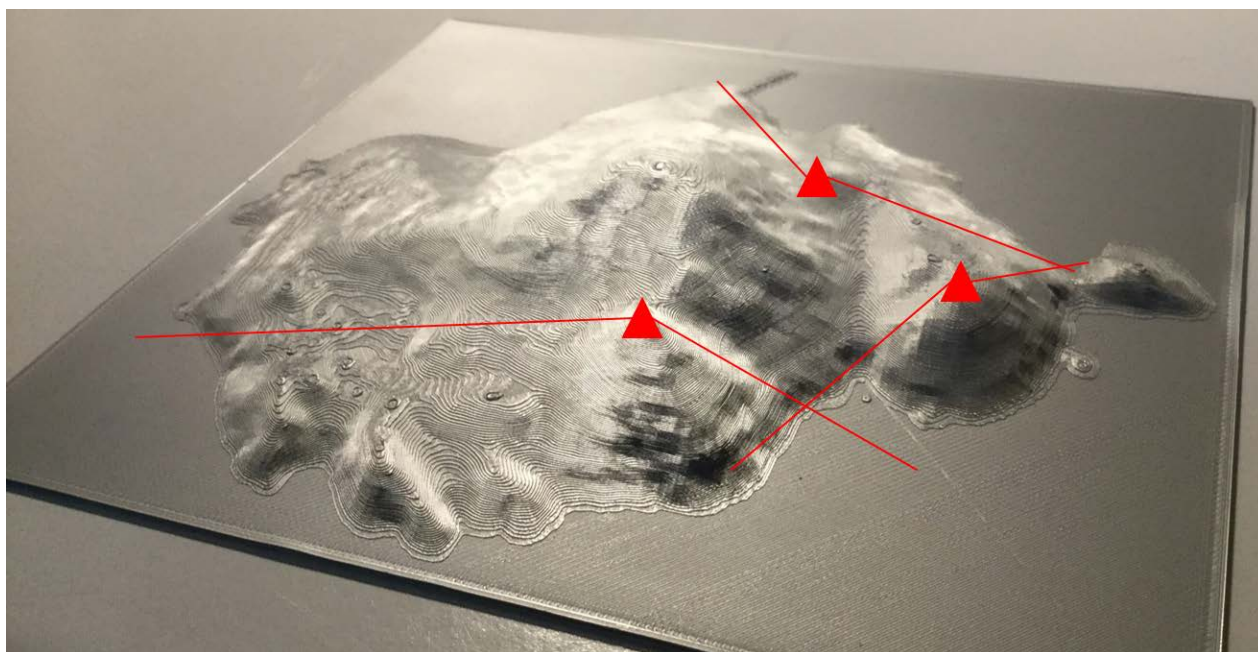
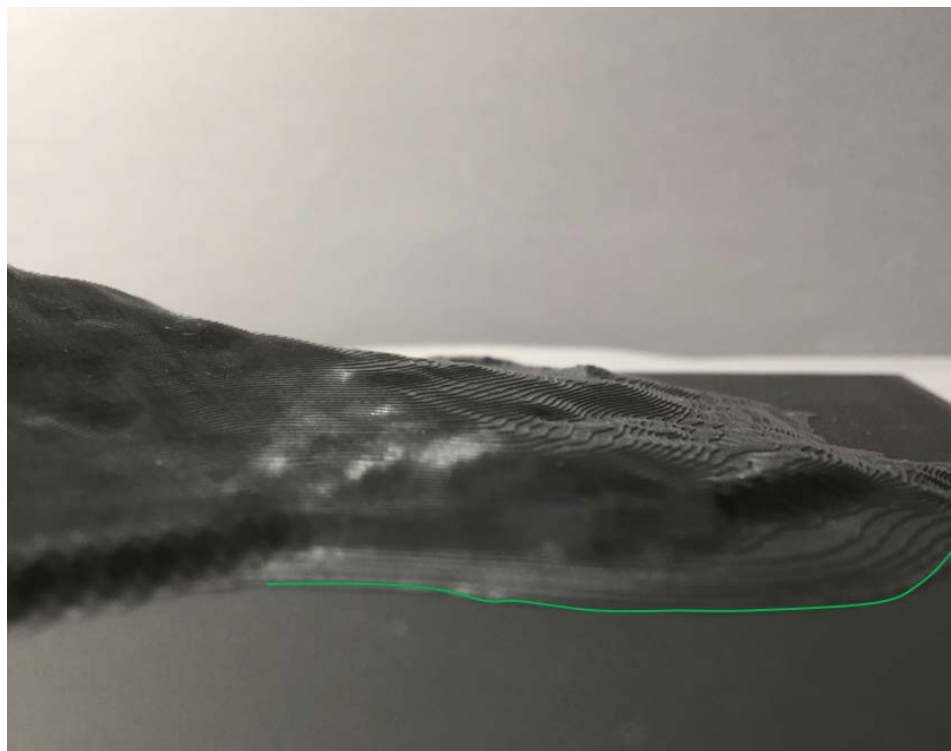


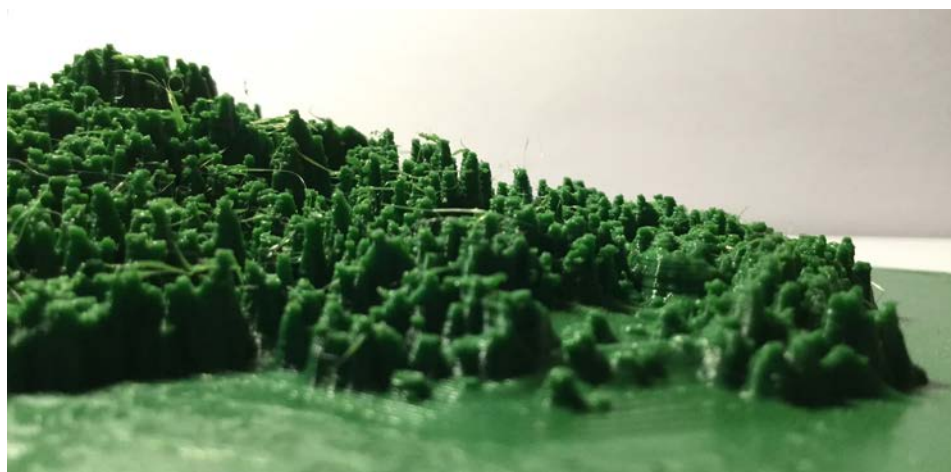
Figura 4-26. Puntos dominantes del terreno de la Isla de Tambo.

Es cierto que para el desembarco en la playa, si se observa detenidamente la maqueta, esta podría estar bajo el control de algún punto de la pendiente que se encuentra al sur de la isla (Figura 4-27).



**Figura 4-27. Playa Area da Illa en la maqueta MDT.**

Sin embargo, si observamos la maqueta del MDE, nos damos cuenta que la observación de la playa desde algún punto de la pendiente es prácticamente imposible debido a la abundante y densa vegetación que presenta esa zona (Figura 4-28). No obstante, en la salida de la playa se encuentra un pequeño claro al norte. En este claro se encuentra una edificación rodeada por una arbolada densa. Si se tuviera inteligencia suficiente para saber las dimensiones que presenta esa edificación, se podría estimar la altura de la vegetación al compararla con esta y determinar si es suficiente para proporcionar cubierta y ocultación a las unidades.



**Figura 4-28. Playa Area da Illa en la maqueta MDE.**

Dentro del estudio del terreno, en una operación militar, se realiza un documento que apoya al mando en su idea de maniobra. Este documento se denomina SAC (Superponible de Avenidas y Corredores). En este documento se señalan con diferentes colores las zonas que imposibilitan la maniobra (rojo) y las zonas por la que una unidad puede maniobrar pero significativamente más lento (amarillo). Entra las zonas se marcan unas avenidas de aproximación por donde la unidad puede

moverse con relativa facilidad y rapidez. En nuestro caso de estudio, y analizando el terreno en la maqueta, se marcan las zonas *Slow go* en amarillo y las avenidas de aproximación por las que una unidad podría moverse (líneas negras). Existen avenidas de aproximación en la isla desde tamaño equipo de fuego (1 punto) hasta tamaño sección (3 puntos). Este documento, o interpretación, se puede observar en la Figura 4-29.

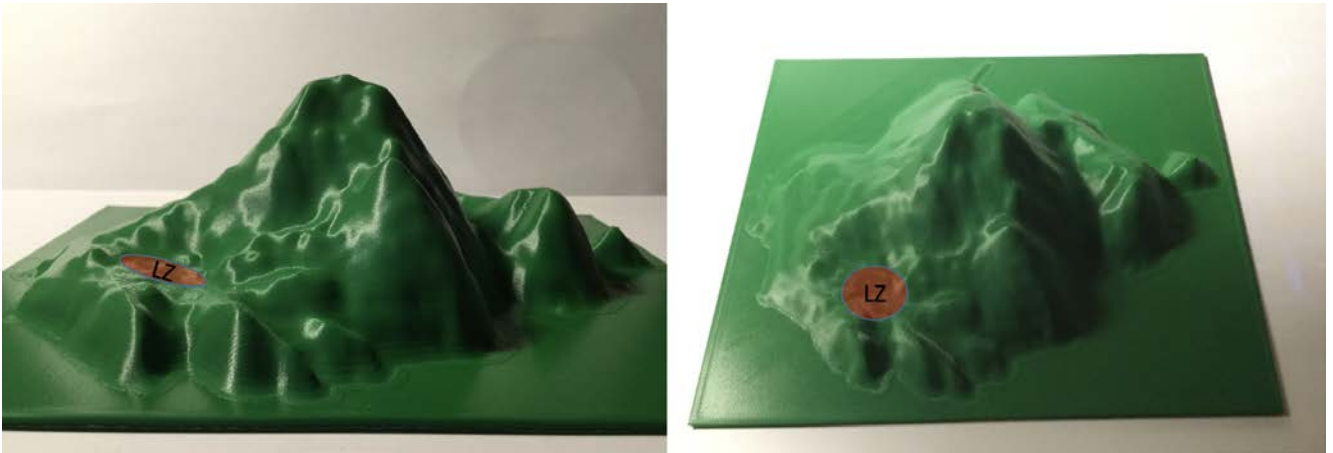


**Figura 4-29. SAC Isla de Tambo.**

Como se observa en la fotografía, la zona que mejor beneficia la maniobra de una unidad es la zona norte, ya que es la zona que cuenta con menor pendiente. Además, a pesar de la abundante vegetación que podría retrasar el movimiento, esta última podría suponer una ventaja para la ocultación de las unidades.

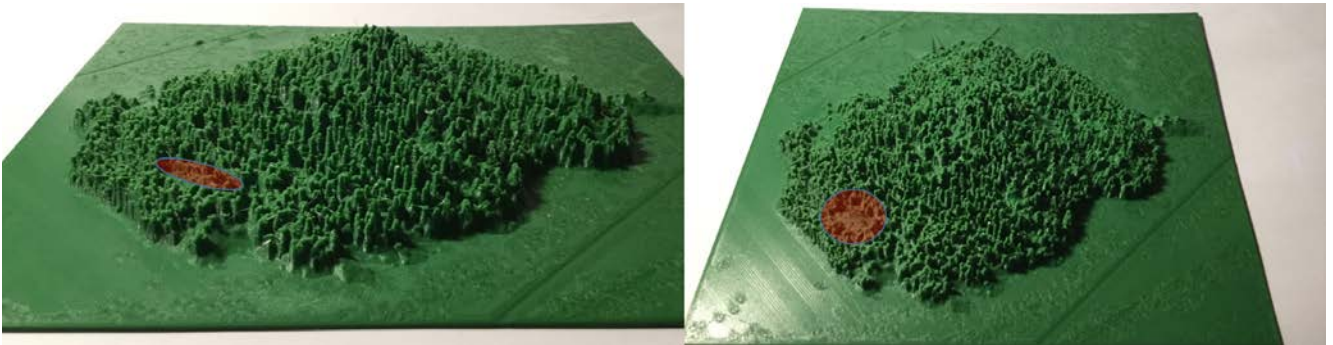
Por otro lado, si se tuviera que planear una extracción de la zona de operaciones a través de helicópteros, se podría utilizar la maqueta para obtener una información más rápida. Una de las características fundamentales para la toma de una aeronave es la búsqueda en el terreno de una zona que no se encuentre en pendiente. Para localizar estas zonas con mayor facilidad, se puede utilizar una maqueta 3D del MDT con un factor de elevación mayor. De esta manera, las pendientes, cotas y espolones se resaltarán más, aumentando su diferencia con valles y llanuras, haciendo que sea más fácil su identificación. En el caso de la isla, analizando solo el modelo MDT, se observa que podría existir una zona que permitiese la creación de una *Landing Zone* para helicópteros (Figura 4-30).





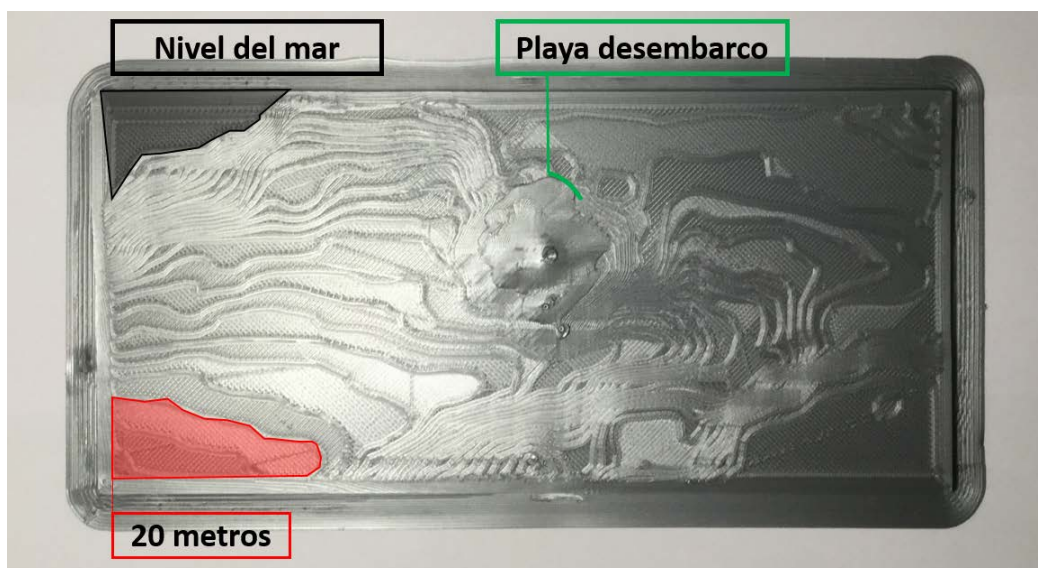
**Figura 4-30.** Localización de una posible *Landing Zone* para helicópteros (MDT).

Sin embargo, si se observa el modelo MDE se puede observar que toda esa zona está ocupada por una arboleda, lo que imposibilita la creación de esa *Landing Zone*, y por tanto las operaciones con helicópteros. En la Figura 4-31 se pueden apreciar las zonas marcadas anteriormente pero en el modelo MDE y como la zona está repleta de vegetación alta y árboles.



**Figura 4-31.** Localización de una posible *Landing Zone* para helicópteros (MDE).

Finalmente, estudiando la batimetría se pueden observar las zonas más favorables para el movimiento de las embarcaciones dependiendo de la sonda. Es verdad que, en comparación con los modelos anteriores, es más difícil determinar la profundidad únicamente teniendo en cuenta la maqueta. Aun así, se puede apreciar claramente las zonas de mayor y menor sonda (Figura 4-32).



**Figura 4-32.** Batimetría Isla de Tambo.

Dependiendo del calado del buque, este se podría aproximar más o menos a la isla. Sin embargo, el itinerario que mejor se adapta transcurriría por el sur, ya que como se aprecia en la Figura 4-33 es la zona con mayor sonda.



**Figura 4-33. Batimetría de la isla con las zonas más favorables para el movimiento de un buque marcadas en color rojo.**





## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se analizan las diferentes conclusiones obtenidas de la realización de este TFG y se incluye la propuesta de diferentes líneas futuras.

### 5.1 Conclusiones

Una vez alcanzados los objetivos y estudiando a fondo el trabajo realizado se pueden sacar las siguientes conclusiones:

El estudio del terreno es un factor fundamental en el proceso de planeamiento de una operación militar, y más si cabe en el planeamiento de una operación anfibia en el que no solo intervienen fuerzas terrestres, sino que además intervienen fuerzas marítimas y se realiza un Movimiento Buque Costa (MBC). La batimetría de la zona es imprescindible, así como el análisis de los puntos críticos dominantes del terreno desde donde se controlan los distintos sectores de desembarco y las respectivas playas. Normalmente, estas operaciones tienen la colaboración de aeronaves, por lo que el estudio de avenidas de aproximación y zonas de aterrizaje protegidas resulta primordial.

A lo largo de la historia se han venido realizando “cajones de arena” y maquetas en 3 dimensiones de la zona de operaciones para facilitar la interpretación del terreno y apoyar el planeamiento. Con la realización de este TFG se ha querido demostrar la ayuda tan significativa de las impresiones 3D al proceso de planeamiento de una operación militar, así como introducirlas como una herramienta más a la hora de reconocer y estudiar el terreno, como un complemento del plano, imágenes satelitales y los reconocimientos físicos en la zona de operaciones.

Por otro lado, cabe resaltar la importancia de obtener datos SIG de una zona de operaciones, debido a la cantidad de información del terreno que se puede generar. Existen además organizaciones nacionales como el PNOA, que permite la descarga gratuita de la información necesaria. Por otro lado, la utilización de *software* gratuito permite que el trabajo y el estudio del terreno a un coste cero. Asimismo, la impresión 3D ofrece una alternativa rápida y económica para la realización de maquetas. Para este TFG, el tiempo total de impresión fue de 97 horas y 51 minutos, con un coste de hilo de impresión del orden de 30 euros.

El empleo de impresoras 3D para la representación del terreno durante el planeamiento permite imprimir los modelos a las escalas que sean necesarias, ya sean para operaciones de vuelo con un mayor aumento en el factor de elevación, como para operaciones especiales donde se necesita una gran precisión y detalle, a mayor escala. Sin embargo, esta ventaja viene condicionada al tipo de impresora y el tamaño de esta, pues dependiendo del tipo, del tamaño y más aún del precio, la escala y detalle del

modelo pueden variar. Si se llegase a implantar la impresión 3D en los procesos de planeamiento sería interesante adquirir una impresora que permitiese la impresión de modelos a escalas mayores.

Por otra parte, la incorporación de las impresoras 3D en el planeamiento de operaciones sería más adecuada en situaciones estáticas, instalaciones fijas y permanentes, preferentemente, a nivel Batallón y Estados Mayores, por las servidumbres logísticas que acarrea. También sería apto su empleo en las bases semipermanentes, y por tanto en la mayoría de las operaciones actuales en las que se cuenta con instalaciones e infraestructuras adecuadas.

En cuanto a las conclusiones obtenidas de la metodología empleada, cabe destacar la dificultad para cargar archivos de gran tamaño (más de 2-3 MB) con el *software* FreeCAD. A pesar de ofrecer la ventaja de ser un *software* gratuito, FreeCAD no permite la transformación de formatos STL a sólidos que ocupen gran tamaño. Esto supone una problemática, principalmente porque la extensión del *software* QGIS, DEMto3D, genera archivos STL de una calidad muy alta pero a su vez de un grandísimo tamaño. Por este motivo se tiene que disminuir la calidad del modelo para poder realizar los cortes horizontales (XY) o *slices* si finalmente se desea trabajar con este *software*.

Por otro lado, hay que tener en cuenta el factor de suavizado que se le aplica a los modelos STL. El factor de suavizado es una ayuda para facilitar la interpretación del modelo y favorecer la estética de este. Sin embargo, no debe de ser un inconveniente. A medida que se aumenta el factor de suavizado de una pieza, esta sufre algunas deformaciones, como el hecho de que las zonas planas las acaba curvando. Para la batimetría, a pesar de que estéticamente era mejor, llegaba a deformar el fondo demasiado, no pudiendo realizar suavizados con un factor mayor a 6.

Por último, las escalas de las maquetas, al estar subordinadas al tipo de impresora con la que se trabaja, si se quiere trabajar con grandes extensiones de terreno hay que aplicarles un factor de elevación mayor al original (factor 1). La batimetría, con profundidades máximas de 20 metros, no se apreciaría si no se le hubiese aplicado un factor de elevación 2; al igual que no se hubiesen apreciado los cortes horizontales (XY) o *slices*. Aún así, para la maqueta de la batimetría haría falta una impresora capaz de imprimir maquetas de mayores dimensiones. Para obtener una maqueta con una representación considerable del terreno hay que aplicarle una escala menor, a lo que las alturas y profundidades se ven muy afectadas, teniéndoles que aplicar un factor de elevación más elevado a expensas de que se deforme el relieve.

## 5.2 Líneas futuras

En este capítulo se tratarán las posibles líneas futuras de desarrollo de este TFG, aportando ideas para próximos trabajos fin de grado.

### 5.2.1 “Cajones de arena”

Aunque representa un primer paso como herramienta de ayuda al planeamiento, los modelos que se han generado en este TFG tienen un tamaño bastante reducido como para que se puedan utilizar para la finalidad anteriormente comentada. Sería interesante plantear la opción de realizar una maqueta de una extensión mayor uniendo pequeñas representaciones del terreno, como si se tratara de un puzle. De esta manera, imprimiendo porciones del terreno como las que se han impreso hasta el momento y uniéndolas, podría realizarse una maqueta de un tamaño mucho mayor y que cumpla las funciones de un “cajón de arena” (Figura 5-1).



**Figura 5-1. Cajón de arena preparado por la Bandera Paracaidista “Ortiz de Zárate” [70].**

Por otro lado, otra alternativa sería realizar las impresiones con otro tipo de impresoras que permitan la representación de modelos a escalas mayores. Normalmente, las impresoras FDM generan modelos de tamaños parecidos a los que se han realizado en este TFG, por lo que no solo se cambiaría de impresora, sino también de técnica de impresión para la generación de las maquetas. Esta nueva línea de trabajo no solo serviría para la generación de maquetas más grandes, sino que además estas últimas podrían compararse con las realizadas en este TFG; evaluando cuál de las técnicas utilizadas es más precisa y se adapta mejor al apoyo del planeamiento de una operación anfibia.

### *5.2.2 Maquetas del terreno y tecnología AR Sandbox en el planeamiento militar*

Otra posible línea de investigación sería el estudio de la integración de los modelos 3D del terreno con la tecnología *A.R. Sandbox (Augmented Reality Sandbox)* en el planeamiento de operaciones militares.

Esta tecnología, que está todavía en desarrollo, está formada por un *software*, un proyector y un cajón de arena. Este sistema permite moldear formas del terreno con la arena, mientras que el proyector y el *software* proporcionan las curvas de nivel que van captando de las formas realizadas en el momento; así como proporcionando color dependiendo de las alturas, e incluso proyectar sobre la arena ortofotos del terreno [71].

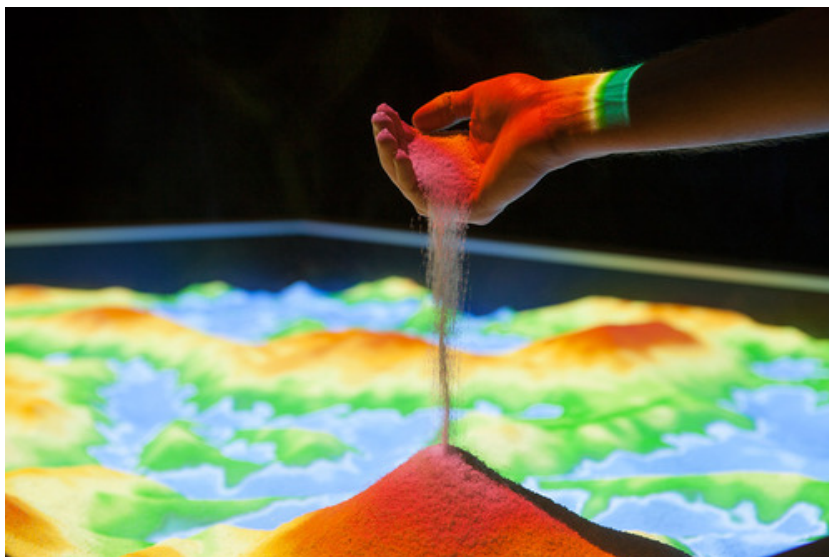


Figura 5-2. Sistema *AR Sandbox* donde se puede apreciar el escalado de colores por alturas [71].

La opción de integrar dentro de este sistema maquetas realizadas a través de las impresiones 3D permite no solo proyectar ortofotos sobre estas, sino reflejar sobre estas mismas las curvas de nivel o cuadrículas de un plano, aprovechando las ventajas que este *software* proporciona. Por este motivo, sería interesante el estudio de este *software* junto con las maquetas del terreno para el planeamiento de operaciones militares.

#### 5.2.3 Aplicación para la Compañía de alumnos de la ENM

Si la finalidad de esta técnica es implantarla como apoyo al planeamiento de operaciones anfibias de la Brigada de Infantería de Marina, es interesante estudiar su posible aplicación en el planeamiento de las operaciones que realiza la Compañía de Alumnos de la Escuela Naval Militar. De esta manera, se pretende favorecer la labor de apoyo al mando, imprimiendo maquetas de las zonas donde esta compañía suele realizar maniobras, así como la zona donde se realice ese año la operación anfibia.

#### 5.2.4 Independencia total

Para la realización de este proceso es necesario disponer de una fuente de información que nos proporcione una nube de puntos de la zona de operaciones. Dependiendo de la situación táctica, puede que se requiera que la información de la zona esté totalmente actualizada, o puede darse el caso de que la fuente de información no tenga los datos de la zona en cuestión.

Con el fin de no depender de ninguna organización, sería interesante el estudio de la implantación de sistemas LIDAR en los UAV que posee Infantería de Marina (Figura 5-3). De esta manera, la independencia del sistema sería total y ofrecería una mayor flexibilidad.



**Figura 5-3.** UAV *Sacan Eagle* transportado en un vehículo URO VAMTAC [72].





## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A-RIM-101 Método de planeamiento de las operaciones. Nivel táctico., 2013.
- [2] MCWP 5-10. Marine Corps Planning Process., 2016.
- [3] A. W. Pearson, «Allied Military Model Making during World War II.,» *Cartography and Geographic Information Science.*, vol. 29, nº 3, pp. 227-241., 2002.
- [4] R. A. Española. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/?id=7keiXrA>.
- [5] M. R. Morales, «La evolución de los mapas a través de la historia,» 2006.
- [6] J. M. P. Gutiérrez, «La cartografía histórica como fuente para la investigación histórica y patrimonial (Antigüedad y Edad Media),» *Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico* , nº 77, pp. 54-61, 2011.
- [7] R. N. d. I. Cuevas, «El poder de los mapas,» *Estudios Geográficos* , vol. 73, pp. 581-598 , 2012.
- [8] M. Heffernan, «Geography, cartography and military intelligence: the Royal Geographical Society and the First World War,» *Transactions of the Institute of the British Geographers*, vol. 21, nº 3, pp. 504-533, 1996.
- [9] «Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía. Universidad politécnica de Madrid,» [En línea]. Available: [http://www.geo.upm.es/userfiles/file/EPADA/R\\_Perez.pdf](http://www.geo.upm.es/userfiles/file/EPADA/R_Perez.pdf).
- [10] «Musée des Plans-reliefs,» [En línea]. Available: <http://www.museedesplansreliefs.culture.fr/>.
- [11] «BBC. The war at Sea 1914-1918,» [En línea]. Available: [http://www.bbc.co.uk/history/worldwars/wwone/war\\_sea\\_gallery\\_06.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/worldwars/wwone/war_sea_gallery_06.shtml).
- [12] F. J. V. Simón y F. J. A. López, «Evolución de la producción de mapas en relieve, desde las técnicas manuales hasta la impresión 3D,» *Técnica Industrial*, vol. 314, pp. 62-69, 2016.
- [13] «Terrain Models,» [En línea]. Available: <http://www.terrainmodels.com/computer.html>.
- [14] D. R. Caldwell, «Physical Terrain Modeling for Geographic Visualization,»

*Cartographic Perspectives* , nº 38, 2001.

- [15] «<https://www.formacad.es>,» [En línea]. Available: <https://www.formacad.es/catia-v5/catia-v5-impresion-3d/>.
- [16] R. V. Ponce, «Impresoras 3D: Marco teórico, modelos de desarrollo y campos de aplicación. (Tesis)».
- [17] X. M. Prieto, *Un viaje a la historia de la informática.*, Valencia: Universitat Politècnica de Vallència, 2016.
- [18] «3dprint,» [En línea]. Available: <https://3dprint.com/106689/sls-2015-inventor-of-the-year/>.
- [19] «Manufactura aditiva,» *Plastics Technology México*, p. 69.
- [20] A. Trevejo-Bocanegra, D. Fernández y V. Calderón-Ubaqui, «Estereolitografía: Conceptos básicos,» *Revista Estomatológica Herediana*, 2013.
- [21] «3d Natives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>.
- [22] «Ziacom,» Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://ziacom.es/>.
- [23] «Plan Nacional de Ortofotografía Aérea,» [En línea]. Available: <http://pnoa.ign.es/>.
- [24] «Infraestructura de Datos Espaciales de España,» [En línea]. Available: [www.idee.es/europeo-inspire](http://www.idee.es/europeo-inspire).
- [25] «Centro de Descargas de IGN,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es>.
- [26] «ASPRS,» [En línea]. Available: <https://www.asprs.org/>.
- [27] F. Q. Linares y F. F. Garcia, «Los orígenes de la fotografía aérea en España. El servicio de aerostación militar (1896-1913),» *Ería*, nº 41, pp. 173-188, 1996.
- [28] F. F. García, «Fotografía aérea histórica e historia de la fotografía aérea en España,» *Ería*, nº 98, pp. 217-240, 2015.
- [29] L. J. S. Pérez, «Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lidar, el posible futuro de la cartografía catastral urbana,» *Catastro*, pp. 131-154, 2005.
- [30] «INEGI,» [En línea]. Available: <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/>.
- [31] D. S. Clavero, «Fotogrametría usando plataforma aérea UAV. Proyecto de fin de carrera,» Universitat politècnica de Catalunya, 2014.
- [32] P.Fricker, F.Gervais, R.Roth, P.Llorens, J.Delgado y J.Cardenal, «Utilización de sensores aerotransportados para la generacion de MDT y ortofotografías: LH ADS40 y LH ALS40,» de *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, 2002.
- [33] J. M. L. S. S. F. I. G. C. I. G. G. Antonio Manuel Montufo Martín, «Integración de sensores aéreos y terrestres para la producción de cartografía multiescala 3D en la Alhambra y su territorio.,» *Virtual Archaeology Review* , vol. 3, nº 7, pp. 50-54, 2012.
- [34] E. Palop-Navarro, M. J. Bañuelos y M. Quevedo, «Combinando datos LiDAR e inventario forestal para identificar estados avanzados de desarrollo en bosques caducifolios.,»

*Ecosistemas*, vol. 3, nº 25, pp. 35-42, 2016.

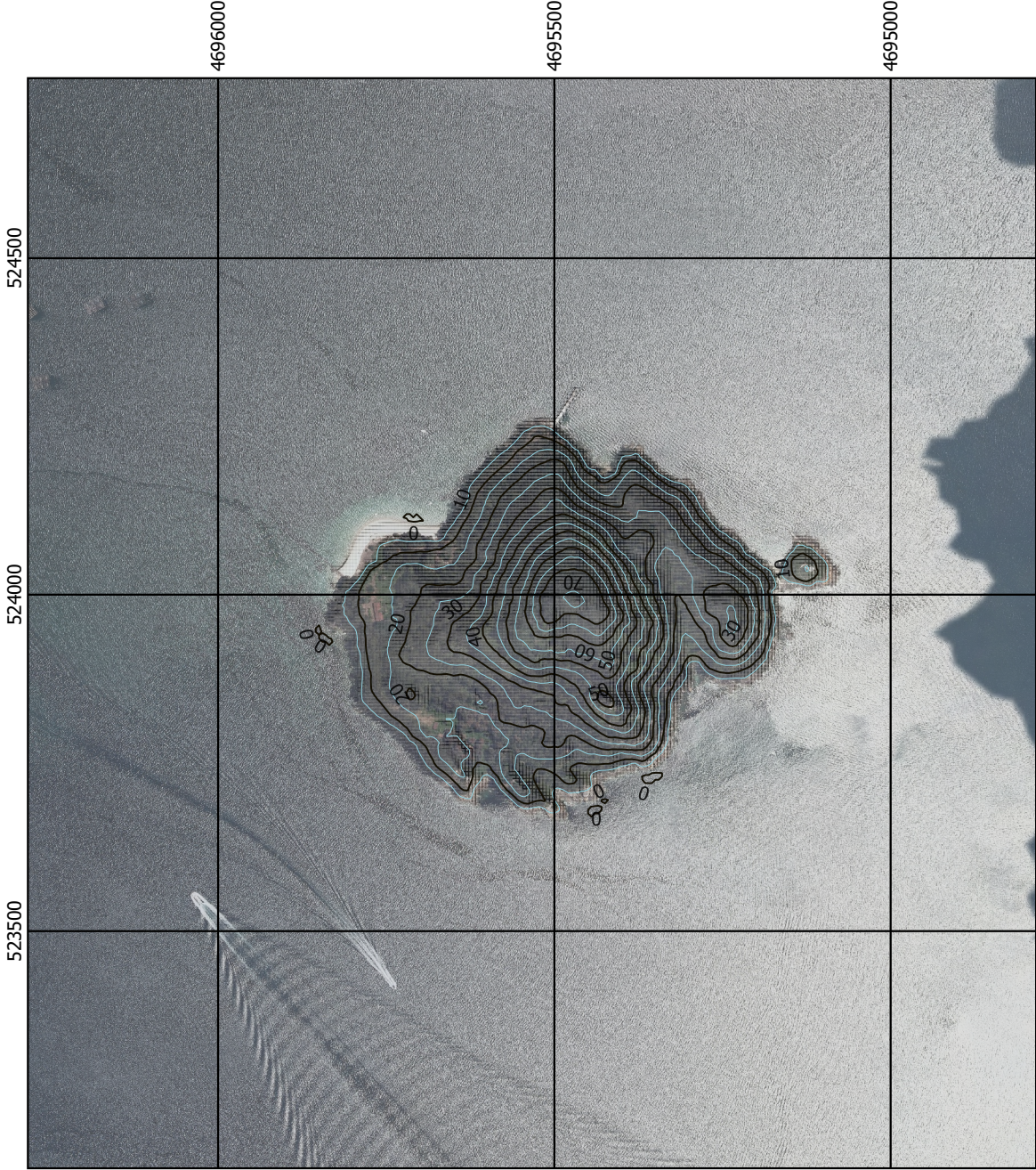
- [35] A. Bulysheva, D. Pierrottetb, F. Amzajerdianc, M. V. George Buschb y R. Reissecc, «Processing of 3-dimensional flash lidar terrain images generated from an airborne platform».
- [36] «Comunidad ISM,» [En línea]. Available: <http://www.comunidadism.es/actualidad/estimacion-de-la-vegetacion-arbustiva-con-sensores-aerotransportados>.
- [37] «Armada Española. Instituto Hidrográfico de la Marina.,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/cienciainformacion-es/01Presentacion--03mision>.
- [38] «EMODnet Bathymetry,» [En línea]. Available: <http://www.emodnet-bathymetry.eu>.
- [39] «Batimetría. Real Academia de la Lengua.,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/?id=5DpIRCq>.
- [40] O. G. L. Rodríguez, «Batimetría, modelos de elevación digital y sus aplicaciones,» Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), 2014.
- [41] M. Farjas, « Levantamiento Batimétricos. Universidad Politécnica de Madrid.,» 2010.
- [42] M. S. Carracelas, «Tema 5. Introducción a las Técnicas Geomáticas. (Fundamentos de Topografía).,» 2018.
- [43] «Doppler incorpora un sistema multihaz en su equipamiento oceanográfico.,» *Aqua*, pp. 71-73.
- [44] «Buque Hidrográfico Tofiño A-32. Armada Española.,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/cienciainformacion-es/03BuquesHidro--Buques--02tofinno-es>.
- [45] «Instituto Geográfico Nacional (Centro Nacional de Información Geográfica),» [En línea]. Available: <http://www.ign.es/web/ign/portal>.
- [46] «Geopaisa,» [En línea]. Available: <https://geopaisa.blog/2017/03/08/que-es-un-sig/>.
- [47] D. F. Escobar, A. P. G. Hunter, A. P. I. Bishop y D. A. Zerger, «Introduction to GIS».
- [48] «ESRI,» [En línea]. Available: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>.
- [49] «GRASS GIS,» [En línea]. Available: <https://grass.osgeo.org/>.
- [50] «Gvsig Asociación,» [En línea]. Available: <http://www.gvsig.com/es>.
- [51] «Hexagon. Safety and Infrastructure,» [En línea]. Available: <https://www.hexagonsafetyinfrastructure.com/products/gis-and-geospatial-data-management/geomedia>.
- [52] «Openjump,» [En línea]. Available: <http://www.openjump.org/>.
- [53] «QGIS,» 09 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.qgis.org/es/site/index.html>.
- [54] A. M. S. José, «Comparative de GIS,» *Sobbi*, pp. 26-27, 2014.

- [55] «Pontevedra viva,» [En línea]. Available: [https://pontevedraviva.com/xeral/12726/tambo-  
isla-concello-poio-combarro-montes-accion-costeira-universidad-vigo/?lang=es](https://pontevedraviva.com/xeral/12726/tambo-<br/>isla-concello-poio-combarro-montes-accion-costeira-universidad-vigo/?lang=es).
- [56] «Galicia.info,» [En línea]. Available: <https://www.galicia.info/isla-de-tambo.html>.
- [57] «Galicia el buen camino. Xunta de Galicia,» [En línea]. Available: [http://www.turismo.gal/recurso/-/detalle/36818/illa-de-tambo?langId=es\\_ES&tp=9&ctre=44](http://www.turismo.gal/recurso/-/detalle/36818/illa-de-tambo?langId=es_ES&tp=9&ctre=44).
- [58] «Iberpix,» [En línea]. Available: <https://www.ign.es/iberpix2/visor/>.
- [59] «Plan de Ordenación do Litoral de Galicia,» Xunta de Galicia.
- [60] «MFE de máxima actualidad. Comunidad autónoma de Galicia,» [En línea]. Available: [https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/desarrollo-  
rural/mfe\\_galicia.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/desarrollo-<br/>rural/mfe_galicia.aspx).
- [61] «USGS (U.S. Geological Survey),» [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/>.
- [62] «Descarga Ortofotos y Fotogramas IGN,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>.
- [63] «Descargar modelos digitales de elevaciones,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>.
- [64] «DEMto3D,» Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://demto3d.com/>.
- [65] «R3ALD. Innovation for real 3D prints,» [En línea]. Available: [www.r3ald.com](http://www.r3ald.com).
- [66] «Ultimaker Cura,» [En línea]. Available: [https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-  
cura-software](https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-<br/>cura-software).
- [67] «LIDAR 2ª Cobertura 2015-Actualidad,» [En línea]. Available: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>.
- [68] «CloudCompare,» [En línea]. Available: <https://www.cloudcompare.org/main.html>.
- [69] «MappingGIS. Cómo configurar LAsTools en QGIS para manejar datos LiDAR,» [En línea]. Available: <https://mappinggis.com/2015/04/como-configurar-las-tools-en-qgis/>.
- [70] «Ejercito de Tierra,» 09 Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://www.ejercito.mde.es/noticias/2014/05/3377.html>.
- [71] «A.R. Sandbox. University of California,» [En línea]. Available: <https://arsandbox.ucdavis.edu/>.
- [72] «Armada Española,» [En línea]. Available: <http://www.armada.mde.es/>.
- [73] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- [74] ATP-08 (D), Doctrine for Amphibious Operations Volume 1, North Atlantic Treaty Organization.

## **ANEXO I:**

### **PLANO DE ALTIMETRÍA DE LA ISLA DE TAMBO (I)**





LEYENDA	
—	Curvas maestras (10m)
—	Curvas secundarias (5m)

DATUM: EPSG 25829-ETRS89
HUSO:29N

TFG: Modelado tridimensional del terreno a partir de datos geomáticos y realización de maqueta 3D	
ALUMNO: Ignacio del Cuvillo Vélez	Nº PLANO: 1
TÍTULO: Altimetría de la Isla de Tambo	ESCALA: 1:10000



## **ANEXO II: PLANO DE ALTIMETRÍA DE LA ISLA DE TAMBO (II)**

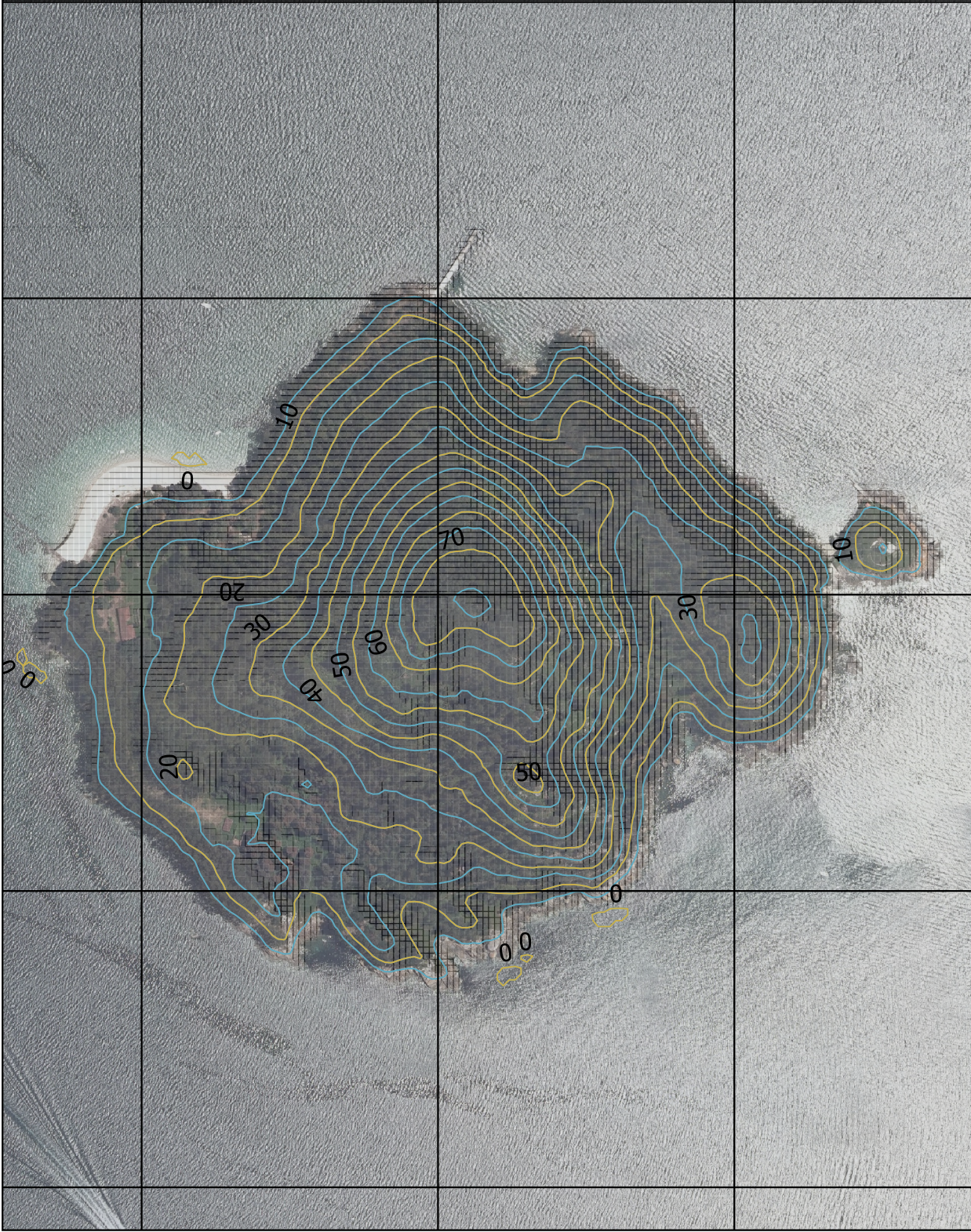


523500 523750 524000 524250 524500

4695750

4695500

4695250



### Leyenda

- Curvas maestras (10m)
- Curvas secundarias (5m)

DATUM: EPSG 25829-ETRS89  
HUSO: 29N

TFG: Modelado tridimensional del terreno a partir de datos geomáticos y realización de maqueta 3D

ALUMNO: Ignacio del Cu vill o Vélez

Nº PLANO: 2

TÍTULO: "Slices" de la Isla de Tambo

ESCALA: 1:5000