

# Trabajo de Fin de Máster

## Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Evaluación y modelización de los cambios geomorfológicos del volcán Isla Decepción (Antártida) desde 1956 y su implicación en la actividad científica.

Autor: Jorge de la Fuente Jurado

Tutora: Dña. Cristina Torrecillas Lozano

Cotutora: Dña. Carmen Zarzuelo Romero

**Dpto. Ingeniería Gráfica**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Departamento de  
**Ingeniería Gráfica ETSI**



Trabajo de Fin de Máster  
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Evaluación y modelización de los cambios  
geomorfológicos del volcán Isla Decepción  
(Antártida) desde 1956 y su implicación en la  
actividad científica.**

Autor: Jorge de la Fuente Jurado

Tutoras:

Dña. Cristina Torrecillas Lozano  
Profesora titular

Dña. Carmen Zarzuelo Romero  
Profesora titular

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2023



*A mis padres y hermanos, que siempre me han apoyado en todos los años de duro estudio y me han facilitado el poder alcanzar el sueño de ser ingeniero de caminos, canales y puertos y desarrollar la profesión que siempre quise.*

*A aquellas personas que han estado a mi lado durante todos estos años, sin vosotros no habría sido igual el camino recorrido.*



# Agradecimientos

---

Agradecer a mi tutora, Cristina, por su paciencia en este reto en el que no siempre he dispuesto de todo el tiempo necesario y que me habría gustado para poder progresar rápidamente en este Trabajo, y por permitirme participar en mi primer artículo científico sobre esta genial isla volcánica de la Antártida.

A Carmen, por prestar su ayuda incluso cuando más necesitaba el tiempo para ella misma y su familia.

A Bismarck Jigena Antelo y a Gonzalo Prates por su apoyo y ayuda a la hora de proporcionarnos datos para la realización del estudio.

*Jorge de la Fuente Jurado*  
*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*  
*Sevilla, 2023*



Este Trabajo surge a raíz de la oportunidad de participar en la realización de un artículo científico en el que se realiza la *Evaluación y modelización de los cambios geomorfológicos costeros de la isla Decepción desde la erupción de 1970 y su involucración en la actividad científica* [1] para la revista científica Remote Sensing, en el cual se expone de manera resumida el trabajo realizado y los resultados que se desarrollan en el presente Trabajo de Fin de Máster.

La Isla Decepción es un volcán activo con una caldera sumergida abierta al mar, lo que le confiere una forma de herradura. Varios eventos volcánicos posteriores al colapso de la caldera, así como la hidrodinámica dentro de esta bahía natural, han modificado su línea de costa interna, modelando los nuevos depósitos de tefra y cambiando el paisaje.

Se ha realizado un modelo hidrodinámico para predecir las futuras ubicaciones de acreción y erosión en la línea de costa interna, que afectan a la movilidad de investigadores y turistas ya sea a pie o en barco. Se han empleado imágenes ortográficas históricas y las diferencias espaciotemporales entre modelos digitales de elevación y batimétricos con fines de validación de los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico.

El modelo muestra que la línea de costa de la bahía interna que mira hacia el sur (zona norte de la bahía) es más sensible a la erosión, mientras que la línea de costa que mira hacia el norte (zona sur de la bahía) tiene una leve tendencia a la sedimentación. Los cambios batimétricos cerca de la costa y las plumas sedimentarias de fusión de nieve y glaciares se explican mediante el modelo. Sin embargo, el retroceso del Glaciar Negro no está relacionado con la hidrodinámica, donde el modelo sugiere una zona de acreción. El modelo tiene limitaciones en los lagos abiertos a la bahía interna que bordean su costa, donde solo se obtuvo erosión, influenciado por el depósito de sedimentos procedentes del deshielo que serán redistribuidos por la afección de la marea, en la representación de la bahía interior (Port Foster) durante los meses en los que su superficie se encuentra congelada, y en los cambios sufridos en aquellas zonas de la línea de costa ocupadas por taludes/acantilados en las que presenta la hidrodinámica de la playa a sus pies. Además, varios cráteres en tierra muestran signos de aumento de acreción en los últimos años, ya que algunos de los cuales se han rellenado con hasta 9 metros de sedimento de un abanico aluvial en aproximadamente 15 años.



# Abstract

---

This work arises from the opportunity to participate in the development of a scientific article entitled "Evaluation and modelling of the coastal geomorphological changes of Deception Island since 1970 eruption and its involvement in research activity", intended for the scientific journal Remote Sensing. The article provides a summarized overview of the work conducted and the results obtained in this master's thesis.

Deception Island is an active volcano with a submerged caldera open to the sea, giving it a horseshoe shape. Several volcanic events following the collapse of the caldera, as well as the hydrodynamics within this natural bay, have modified its inner coastline, shaping new tephra deposits and altering the landscape.

A hydrodynamic model has been developed to predict future accretion and erosion locations along the inner coastline, which impact the mobility of researchers and tourists on foot or by boat. Historical orthographic images and spatiotemporal differences in digital elevation and bathymetric models have been used for validation purposes of the hydrodynamic model's results.

The model shows that the inner bay coastline facing south (northern part of the bay) is more prone to erosion, while the coastline facing north (southern part of the bay) exhibits a slight tendency towards sedimentation. Bathymetric changes near the coast and sediment plumes from snow and glacier melting are explained by the model. However, the retreat of the Black Glacier is not related to hydrodynamics, as the model suggests an accretion zone. The model has limitations in lakes open to the inner bay that border its coast, where only erosion was observed, influenced by sediment deposition from melting that will be redistributed by tidal effects during the months when its surface is frozen, as well as changes in areas of the coastline occupied by slopes/cliffs affected by beach hydrodynamics. Additionally, several craters on land show signs of increased accretion in recent years, with some of them being filled with up to 9 meters of sediment from an alluvial fan in approximately 15 years.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de ilustraciones</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto geográfico	1
1.2 Problemática	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Estructura del documento	6
<b>2 Datos de Partida</b>	<b>7</b>
2.1 Imágenes satélites y otra información geoespacial	7
2.2 Líneas de costa	10
2.3 Modelos digitales de elevación	15
2.4 Modelos digitales batimétricos	16
<b>3 Metodología</b>	<b>19</b>
3.1 Metodología general y software empleado	19
3.1.1 Metodología general	19
3.1.2 Software empleado	20
3.2 Estudio Altimétrico	25
3.2.1 Estudio altimétrico en SIG	25
3.2.2 Estudio DINSAR	26
3.3 Estudio batimétrico	27
3.4 Estudio de los cambios visuales en la línea de costa	28
3.5 Modelo DELFT 3D	32
3.5.1 Descripción del Modelo	32
3.5.2 Datos del modelo	33
3.5.3 Calibración del Modelo	37
<b>4 Resultados</b>	<b>41</b>
4.1 Cambios altimétricos (MDE)	41
4.1.1 Estudio altimétrico en SIG	41
4.1.2 Estudio DINSAR	46
4.2 Cambios batimétricos	47
4.3 Cambios en la línea de costa	50
4.4 Resultados obtenidos en el modelo numérico realizado en DELFT3D	56
4.5 Discusión de los resultados	57
<b>5 Conclusiones y Líneas de Estudio Futuras</b>	<b>61</b>
5.1 Conclusiones	61

5.2	<i>Líneas de estudio futuras</i>	62
	<b>Referencias</b>	<b>63</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Información de las imágenes satélite e información cartográfica de partida .....	10
Tabla 2-2. Información sobre las distintas líneas de costa analizadas y delineadas. ....	11
Tabla 2-3. Información sobre los modelos de elevación del terreno disponibles como datos de partida. ....	15
Tabla 2-4. Información sobre los modelos de elevación batimétrica disponibles como datos de partida. ....	17
Tabla 3-1. Características de los arroyos generados por el deshielo y sus puntos de descarga introducidos al modelo hidrodinámico realizado en DELFT3D.....	36
Tabla 3-2. Resultados de amplitud y fase de los datos de corriente medidos y calculados para los componentes armónicos M2 y K1:.....	38
Tabla 4-1. Datos estadísticos de las diferencias altimétricas entre de los MDEs. ....	43
Tabla 4-2. Diferencias en la altura elipsoidal del interior de los cráteres obtenida entre el MDE del CGE de 2006 y el REMA de 2020. Fuente de los datos: Propio y [17].....	45
Tabla 4-3. Datos estadísticos de las diferencias entre los modelos digitales batimétricos.....	48



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1. Isla Decepción: (a) Situación en el mapa utilizando el Servicio de Mapas Web del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) en EPSG 3395; (b) Altimetría, hidrología, bases científicas históricas y activas, rutas de caminata y evacuación, y principales cambios en las zonas internas [5] en EPSG 32720, al igual que todas las figuras representadas posteriormente. ....	1
Ilustración 1-2. Marco geológico de la Isla Decepción. Fuente de los datos: [ [6] [7]] .....	2
Ilustración 1-3. Marco Geomorfológico de la Isla Decepción. Fuente de los datos: SIMAC [28]].....	3
Ilustración 1-4. Algunos cambios geomorfológicos visuales de los años 1968 a 2003 y 2003 a 2020 en la Isla Decepción antes de la última erupción (las letras están relacionadas con los cuadrados rojos en la Ilustración 1-1.b: (a) Relleno de cráteres de la erupción de 1970; (b) Retroceso del glaciar; (c) Apertura del "Lago Escondido" y (d) Apertura del Lago Kroner, en este caso utilizando una nueva ortofoto de 1968. ....	4
Ilustración 2-1. (a) Ortofoto resultante del procesamiento realizado sobre la imagen aérea correspondiente al vuelo realizado en el año 1957. (b) Ortofoto resultante del procesamiento realizado sobre la imagen aérea correspondiente al vuelo realizado en el año 1968. Fuente de los datos: [26]. ....	7
Ilustración 2-2. Ortofoto tomada en el año 2003 correspondiente al QB una vez realizada su nueva georreferenciación y representada con nuevos valores en los parámetros que definen su estructura visual (gamma = 1.94, contraste = 74, brillo = 167 y saturación = -40). Fuente de la imagen: [25] y edición propia.....	9
Ilustración 2-3. Representación de la delineación de las líneas de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondientes a los años 1968 y 1970 sobre la ortofoto del año 1968 proporcionada por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35].....	12
Ilustración 2-4. Representación de la delineación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondiente al año 2003. Junto a ella se representa la delineación del contorno de la Isla Decepción realizada por el CGE. Ambas se representan sobre la ortofoto QuickBird del año 2003 proporcionada por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino(gamma = 2.25, contraste = 9, brillo = 25 y saturación = -60). Fuente de los datos: Elaboración propia, QB y CGE [25]. ....	13
Ilustración 2-5. Representación de la delineación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondiente al año 2020. Se representan sobre la ortofoto K3 del año 2020 (gamma = 2.00, contraste = 17, brillo = 36 y saturación = 33). Fuente de los datos: Elaboración propia y K3 [26].....	14
Ilustración 2-6. Representación de los modelos digitales de elevación del terreno empleados para el estudio de cambios altimétricos en SIG. (a) MDE proporcionado por el CGE correspondiente al año 1968. (b) MDE proporcionado por el REMA correspondiente al año 2022 tras la corrección de su altura elipsoidal 20 metros. Fuente de los datos: propio, CGE y REMA.....	16
Ilustración 2-7. Datos de la expedición Laurence M. Gould proporcionados por el MGDS. Fuente de los datos: MGDS [33] [34] [35] [36] [37]. ....	18
Ilustración 2-8. (a) BEM proporcionado por el SIMAC correspondiente al año 1991 (b) BEM proporcionado por el IHM correspondiente a los años 2012-2016. Fuente de los datos: SIMAC [7] e IHM [20]. ....	18
Ilustración 3-1. Esquema de la metodología seguida para la obtención de los resultados. ....	20
Ilustración 3-2. A la izquierda se muestra el logotipo oficial del Software ArcGIS Pro, creado por la empresa ESRI. A la derecha se muestra el logotipo oficial de ESRI España. Fuente: ESRI, 2023. ....	21
Ilustración 3-3. Logotipo oficial del software QGIS. Fuente: Asociación de QGIS España. ....	22
Ilustración 3-4. A la izquierda se muestra el logotipo oficial del Software DELFT3D, creado por la empresa Deltares. A la derecha se muestra el logotipo oficial de la empresa Deltares. Fuente: Deltares, 2023. ....	23
Ilustración 3-5. Logotipo oficial de la Agencia Espacial Europea. Fuente: ESA, 2023. ....	24
Ilustración 3-6. Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 1968 sobre la ortofoto a este mismo año. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35]. ....	29
Ilustración 3-7. Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 1970 sobre la ortofoto del año 1968. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35]. ....	29
Ilustración 3-8. Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 2003 sobre la ortofoto QuickBird de este mismo año. Fuente de los datos: Elaboración propia, QB y CGE [25]. ....	30

Ilustración 3-9. Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 2020 sobre la ortofoto K3. Fuente de los datos: Elaboración propia y K3 [26].	30
Ilustración 3-10. Representación de los perfiles y puntos de intersección implementados en el módulo DSAS para el estudio de los cambios visuales de las líneas de costa entre los años 1970-2003 y 2003-2020.	32
Ilustración 3-11. Grid generado para el modelo junto a los puntos de descarga generados, la estación COLA, los cauces generados por el deshielo junto a sus afluentes y la condición de contorno implementada para mareas.	34
Ilustración 3-12. Representación de la batimetría junto a los puntos de descarga introducidos en el modelo implementado dentro del entorno de DELFT3D.	34
Ilustración 3-13. Calibración de la estación COLA. Los círculos azules corresponden a los datos del nivel del agua medido y los círculos blancos con el borde negro a los datos del nivel del agua obtenido.	38
Ilustración 3-14. Resultados del estudio de sensibilidad sobre las corrientes, en el que se varió el coeficiente de Chèzy a 45,60 y 100.	38
Ilustración 4-1. Resultados obtenidos de los cambios altimétricos en toda la Isla Decepción de 2003/1968-2022 tras realizar la diferencia entre los MDE.	42
Ilustración 4-2. Histograma del ráster obtenido de la diferencia entre los MDE del CGE (2003-1968) y del REMA (2022).	42
Ilustración 4-3. (a) Cambios altimétricos de 2003/1968-2022 sobre el sombreado de colinas de REMA y nieve permanente (línea azul). (b) Rangos de pendiente a partir del DEM de CGE. (c) Tendencia altimétrica de 1956 a 2020 (principalmente cuadrado rojo) y cuencas internas. (d) Áreas de plumas satelitales (fuente propia) y algunos elementos geomorfológicos de [7].	44
Ilustración 4-4. (a) Identificación de los cráteres en el año 2006 sobre la imagen satelital del año 2003. (b) Resultados obtenidos de la evaluación del relleno de los cráteres de 1970 desde el año 2006 hasta el año 2022 sobre la imagen satelital del año 2020. Fuente de los datos: Propio y [17].	45
Ilustración 4-5. Media de los valores altimétricos de los modelos digitales del terreno resultantes de la aplicación de la metodología DINSAR sobre imágenes satélites del Sentinel 1 de la ESA.	47
Ilustración 4-6. Representación de las tasas de sedimentación en la batimetría de la bahía interior concluidos por Cooper en su estudio [3] sobre una ortofoto de la Isla Decepción. Fuente de los datos: [3]	49
Ilustración 4-7. (a) Estudio batimétrico temporal de Port Foster. Arriba, diferencias batimétricas entre 1991-2005. (b) 2005-2012. (c) 1991-2012. (d) Abajo, áreas de pendiente en grados. (e) Número de puntos en celdas de 50m a partir de datos MDGS. (f) Tendencia de estos datos MDGS a lo largo de su período.	50
Ilustración 4-8. Cambios visuales obtenidos en el análisis de las líneas de costa delineadas. (a) Cambios producidos entre 1968 y 1970. (b) Cambios producidos entre 1970 y 2003. (c) Cambios producidos entre 2003-2020.	51
Ilustración 4-9. Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Retroceso en el área central del Glaciar Negro.	52
Ilustración 4-10. Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Sedimentación al sur del Glaciar Negro.	52
Ilustración 4-11. Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Erosión del talud ubicado delante de la base española.	53
Ilustración 4-12. Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Erosión del talud y zona cercana a costa ubicado delante de la base argentina.	53
Ilustración 4-13. Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Cambios sufridos por la zona de costa al norte de Port Foster.	54
Ilustración 4-14. Movimiento neto de la línea de costa calculado en el módulo DSAS para los intervalos de tiempo analizados: (a) Movimiento neto entre 2003-1970. (b) Movimiento neto entre 2020-1970.	55
Ilustración 4-15. Ratios anuales de avance y retroceso de la línea de costa obtenidos en el módulo DSAS de la	

diferencia entre las líneas de costa delineadas. (a) Ratios anuales entre 2003-1970. (b) Ratios anuales entre 2020-2003 .....	55
Ilustración 4-16. Patrones de sedimentación (verde) y erosión (rojo) después de un año de simulación con el modelo numérico implementado en DELFT3D y la identificación de las zonas de estudio. ....	56

ASPA	Áreas Especialmente Protegidas de la Antártida
BEM	Bathymetry Elevation Model
CGE	Centro Geográfico del Ejército
DINSAR	Diferencial de Interferometría SAR
DOS	Directorate of Overseas Surveys
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPSG	European Petroleum Survey Group
ESA	Agencia Espacial Europea
GCPs	Ground Control Points
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
IEO	Instituto Español de Oceanografía
IHM	Instituto Hidrográfico de la Marina
INSAR	Interferometría SAR
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MDT	Modelo Digital del Terreno
MGDS	Marine Geosciences Data system
QB	QuickBird
REGID	Red Geodésica Isla Decepción
REMA	Reference Elevation Model of Antarctica
SAR	Synthetic Aperture Radar
SGE	Servicio Geográfico del Ejército Español
SHNA	Servicio de Hidrografía Naval Argentino
SIG	Sistema de Información Geográfica
SNAP ESA	Sentinel Application Platform ESA
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos



# 1 INTRODUCCIÓN

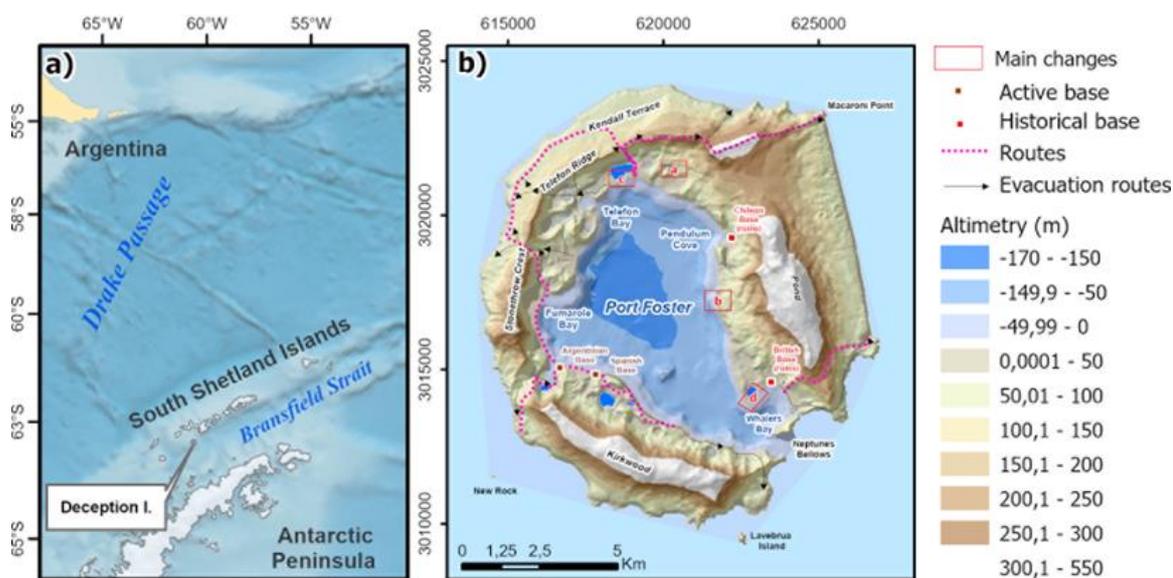
Como inicio de este Trabajo de Fin de Máster, se presenta una introducción que sitúa a la Isla Decepción en su contexto geográfico y proporciona una visión general de su historia reciente. Además, se aborda la problemática existente en la isla y se plantea la intención de contribuir a su resolución a través del estudio realizado. Se exponen los objetivos a cumplir en este Trabajo de Fin de Máster y se detalla la estructura del documento. El propósito de esta introducción es establecer el marco necesario para comprender la relevancia y el enfoque del presente Trabajo.

## 1.1 Contexto geográfico

La isla Decepción es un volcán activo con forma de herradura ubicado en el estrecho de Bransfield, con una bahía interior llamada Port Foster (Ilustración 1-1 (a) e Ilustración 1-1 (b)). Este gran puerto natural ha sido un centro de actividad humana en las Islas Shetland del Sur desde principios del siglo XIX. La isla fue visitada por una sucesión de barcos balleneros y de caza de focas, culminando con el establecimiento de una estación ballenera noruega (1911-1931) y el entierro de 45 hombres en su cementerio [2].

Desde 1944 se establecieron tres estaciones científicas, pero dos de ellas fueron destruidas durante el último período de erupción (la estación chilena en la Cueva del Péndulo y la estación británica en Whalers Bay, ver Ilustración 1-1 (b)). Desde entonces, para proteger su paisaje y ecosistemas, algunas áreas han sido declaradas como Áreas Especialmente Protegidas de la Antártida (ASP) bajo el Sistema del Tratado Antártico.

La Antártida es una zona libre de gobierno, por lo que la producción de mapas de la Isla Decepción es llevada a cabo por los países interesados, o por encargo de instituciones científicas como el Comité Científico de Investigación en la Antártida (SCAR, por sus siglas en inglés). Tanto la cartografía histórica como la actualizada han sido producidas utilizando diferentes sistemas geodésicos y de proyección, lo que dificulta evaluar los cambios en la superficie terrestre y submarina a través de sus cartografías [3] [4].



**Ilustración 1-1. Isla Decepción: (a) Situación en el mapa utilizando el Servicio de Mapas Web del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) en EPSG 3395; (b) Altimetría, hidrología, bases científicas históricas y activas, rutas de caminata y evacuación, y principales cambios en las zonas internas [5] en EPSG 32720, al igual que todas las figuras representadas posteriormente.**

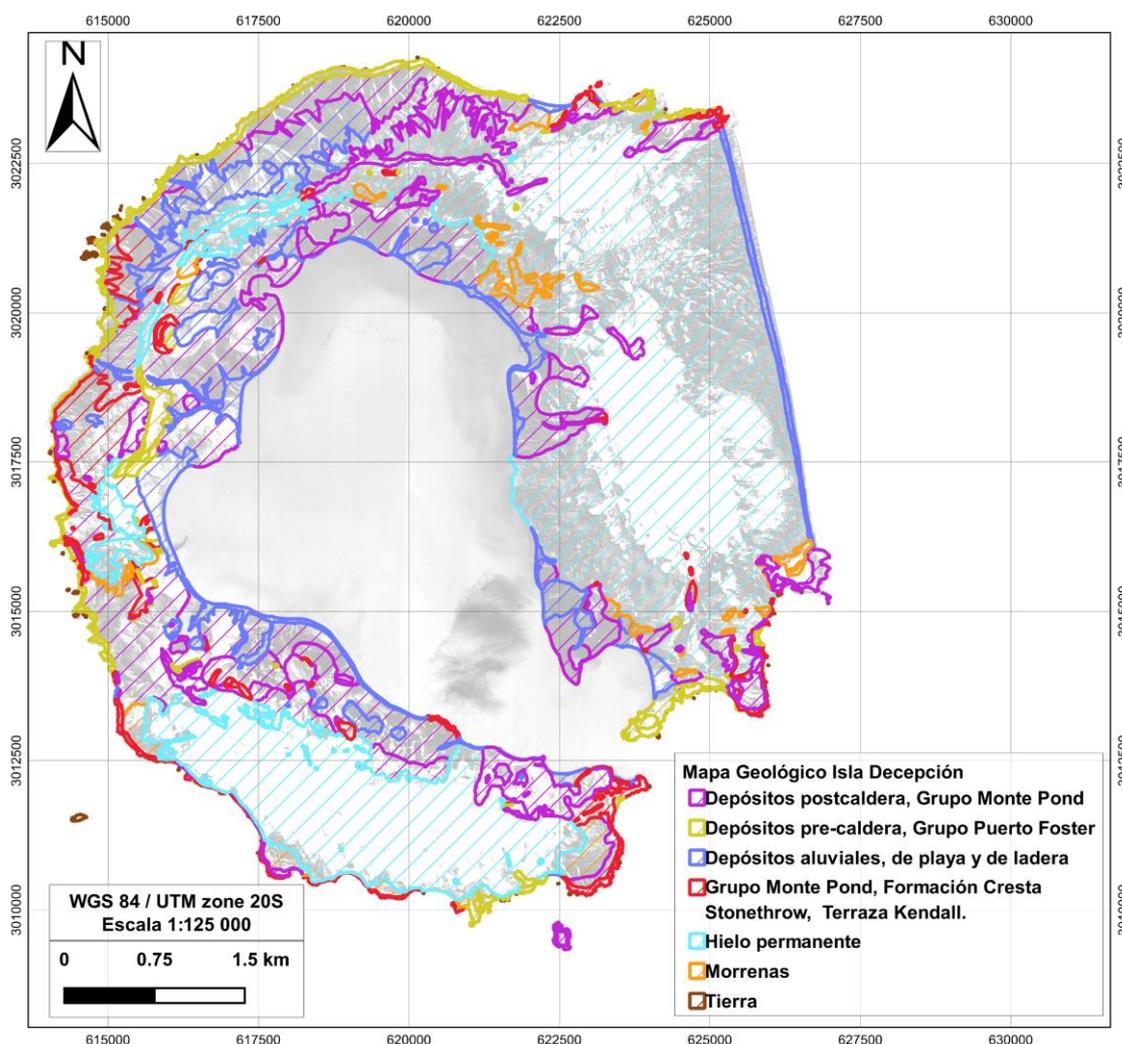
La isla Decepción se encuentra en el Archipiélago de las Shetland del Sur y es parte de la cadena montañosa volcánica que atraviesa esta región. Se considera un volcán estratovolcánico, lo que significa que está compuesto por capas alternadas de lava y material piroclástico acumulados a lo largo de erupciones volcánicas pasadas.

La isla muestra una variedad de características geológicas, incluyendo conos volcánicos, cráteres, domos de lava y depósitos piroclásticos. La caldera principal, conocida como Port Foster, se formó durante una erupción masiva y está parcialmente sumergida, creando una bahía en forma de herradura. En el interior de la caldera, se encuentran varios conos volcánicos, como el Monte Pond y el Monte Kirkwood, que son evidencia de la actividad volcánica pasada.

Se considera una caldera volcánica activa, lo que significa que se formó a partir de erupciones volcánicas masivas en el pasado y aún puede experimentar actividad volcánica en la actualidad. Las rocas volcánicas presentes en la Isla Decepción incluyen basaltos, andesitas y dacitas. Estas rocas se formaron a partir de la solidificación de la lava y los fragmentos piroclásticos eyectados durante las erupciones volcánicas. Los basaltos son rocas volcánicas de composición máfica, mientras que las andesitas y dacitas son más félsicas.

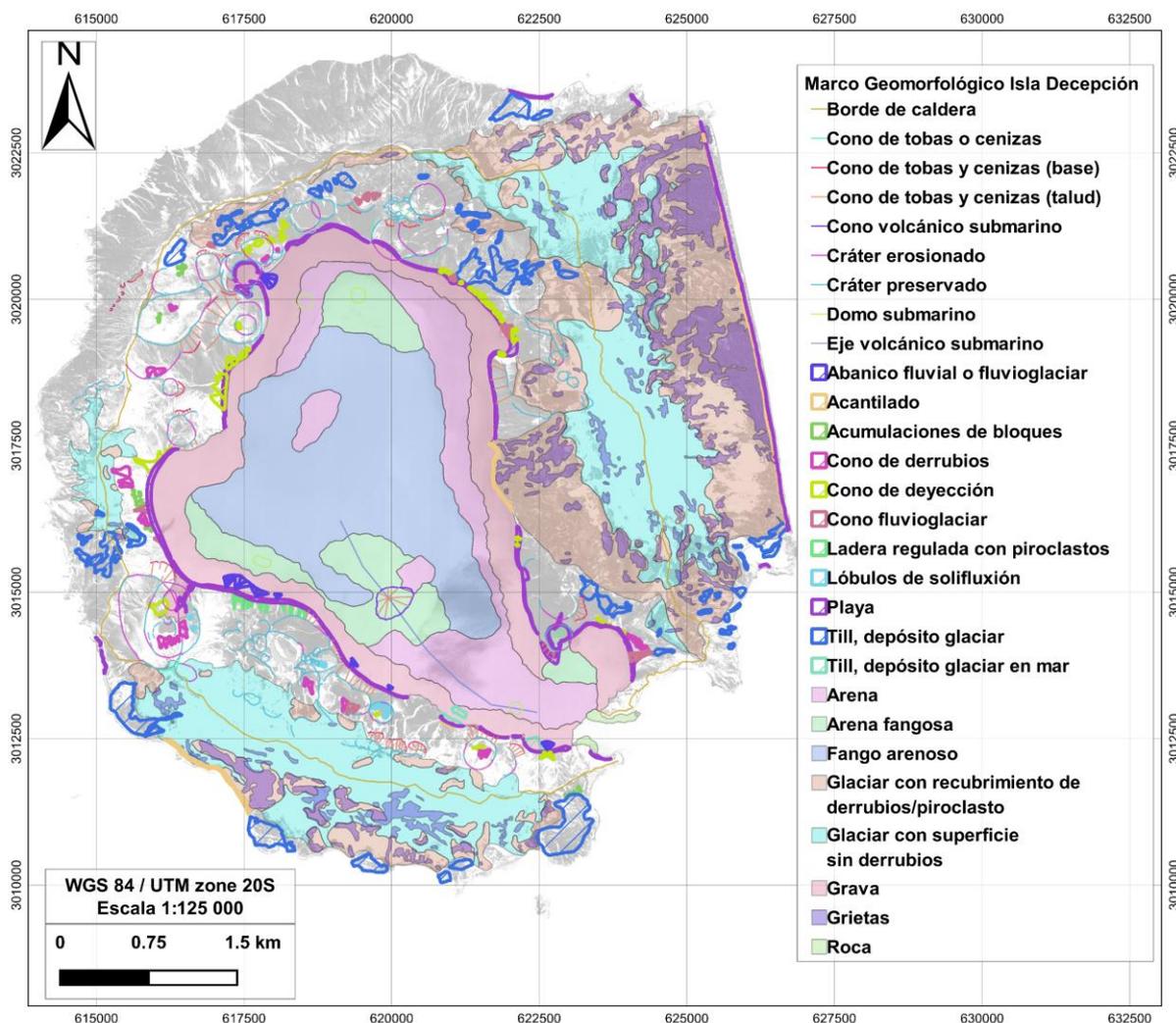
Además de la actividad volcánica, la isla también muestra signos de procesos glaciares. Los glaciares presentes en la isla, como el Glaciar Negro, han dejado su marca en la topografía al tallar valles y depositar sedimentos glaciares. Estos glaciares han experimentado retroceso debido al calentamiento global, lo que ha llevado a cambios en la cobertura de hielo en la isla.

En términos de edad geológica, las rocas más antiguas de la Isla Decepción se remontan a alrededor de 6 millones de años, pero la actividad volcánica más reciente ha ocurrido en tiempos históricos. Las erupciones volcánicas registradas en la isla incluyen eventos en 1967 y 1970, que causaron cambios significativos en la morfología de la isla.



*Ilustración 1-2. Marco geológico de la Isla Decepción. Fuente de los datos: [ [6] [7] ]*

Estas características junto a su ubicación en la Antártida convierten a la Isla Decepción en un lugar fascinante para estudiar los procesos geológicos en un entorno polar extremo, siendo este uno de los principales motivos que llevan a desarrollar el presente Trabajo de Fin de Máster, ya que debido a su carácter volcánico, la fragilidad y la capacidad de erosión de los materiales (entre ellos gran parte son cenizas) que la componen provocan que gran parte de este material sea fácilmente erosionado y transportado únicamente por el proceso de deshielo al que se ve sometida cada año la Isla Decepción. En la Ilustración 1-2 se ha representado el marco geológico que compone la Isla Decepción, mientras que en la Ilustración 1-3 se presenta el marco geomorfológico de esta isla.



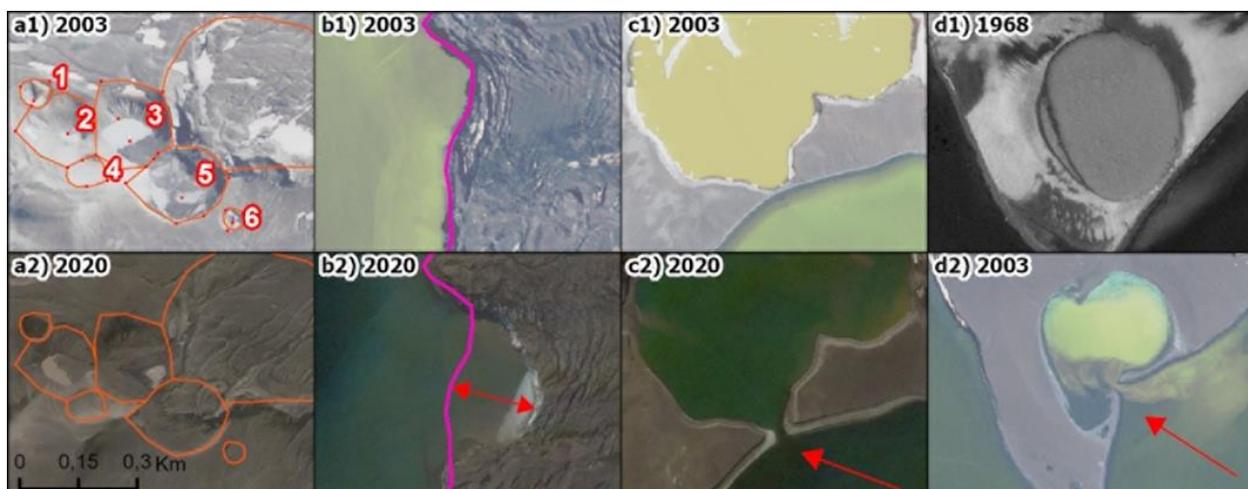
**Ilustración 1-3. Marco Geomorfológico de la Isla Decepción. Fuente de los datos: SIMAC [28]]**

Se han producido cambios geomorfológicos notables durante varias erupciones históricas que tuvieron lugar en los años: 1842, 1912, 1917, 1967, 1969 y 1970 [ [8], [9], [10], [11] y [12]]. Durante las últimas erupciones de 1967-1970, el paisaje de la isla ha experimentado cambios en la línea de costa del sector norte y ha dado lugar a nuevas estructuras volcánicas, como conos de escoria (Ilustración 1-4.a1) y conos de mar y toba, principalmente durante erupciones freatomagmáticas [ [8], [10], [13] y [14]].

Esta gran cantidad de material piroclástico no consolidado ha sido desplazado por el deshielo de la nieve y los glaciares a través de arroyos y el transporte hidrodinámico dentro de Port Foster, lo que ha generado modificaciones visibles en la línea de costa anualmente desde entonces [3]. Algunos ejemplos son las aperturas al norte de Port Forster del Lago Kroner (Ilustración 1-4 (d1) e Ilustración 1-4 (d2)) y del Lago Escondido (*Hidden Lake*), este último rompiendo un muro de 2 metros de ancho y 2 metros de altura (Ilustración 1-4.c1 e Ilustración 1-4 (c2)) en 2006, y altas tasas anuales de relleno sedimentario de tierra procedente de la erupción de 1970 (Ilustración 1-4 (a2)). Además, también se identificó un notable retroceso de más de 200 metros del frente

del Glaciar Negro (Ilustración 1-4 (b1) e Ilustración 1-4 (b2)).

Algunos estudios previos han evaluado las tasas promedio de sedimentación en tierra o en el lecho de la bahía. Se calcularon valores de hasta 1 metro por año para la sedimentación y valores de erosión de -0.2 metros por año en cráteres recientes 1-6 (Ilustración 1-4 (a1)) durante los años 1992-2006 [15]. Una nueva imagen satelital (Ilustración 1-4 (a2)) ofrece una vista clara del relleno de algunos de estos cráteres (números 1, 4, 5 y 6).



**Ilustración 1-4.** Algunos cambios geomorfológicos visuales de los años 1968 a 2003 y 2003 a 2020 en la Isla Decepción antes de la última erupción (las letras están relacionadas con los cuadrados rojos en la Ilustración 1-1.b: (a) Relleno de cráteres de la erupción de 1970; (b) Retroceso del glaciar; (c) Apertura del "Lago Escondido" y (d) Apertura del Lago Kroner, en este caso utilizando una nueva ortofoto de 1968.

Asimismo, debido al prolongado interés humano, se han realizado estudios de numerosas encuestas batimétricas de Port Foster, la caldera sumergida de la Isla Decepción. La más antigua data de 1829 y muestra una tasa notablemente constante de elevación promediada durante 160 años según Cooper et al. [4]. En ese estudio, con encuestas realizadas en 1948 y 1993, se evaluó que la bahía tiene tasas de sedimentación de hasta 5 cm por año. Este valor es comparable a las tasas sedimentarias en otros lagos de caldera, como el Lago Crater (Oregón, EE. UU.) [6]. Roobol [16] determinó que la bahía poco profunda fue aún más sedimentada por los desechos laháricos con hasta 4 metros de las morenas del Glaciar Pond durante el último período eruptivo. Además, la dinámica de Port Foster también ha recibido atención [ [17], [18], [19], [20] y [21]] y se ha evaluado la modificación de la línea de costa interna entre 1956 y 1968, con un aumento de 2 km debido a un pequeño islote central y una reducción de 1.4 km principalmente debido a la inclusión de este islote durante la erupción de 1969 [3].

La costa es la ruta más común utilizada por los investigadores para recopilar datos de campo y por los turistas que la visitan. Cada año, las rutas de movilidad desde las dos bases antárticas activas (española y argentina, Ilustración 1-1 (b)) deben adaptarse a las nuevas condiciones de la isla. Esto puede influir en las rutas realizadas a pie, las rutas de evacuación (ver Ilustración 1-1 (b)) o el transporte en barco, por lo que la futura geomorfología costera es importante por razones de seguridad.

## 1.2 Problemática

Actualmente, las rutas empleadas por los investigadores y turistas que buscan visitar la Isla Decepción tienen como principal recorrido la línea de costa de la bahía anterior, cuyas variaciones geomorfológicas han impedido el paso a diversas zonas de la isla o han provocado el tener que recorrer distancias muy superiores para llegar a puntos que previamente no requerían de tanto desplazamiento (como puede ser el caso de apertura de la entrada del Lago Escondido o el Lago Kroner).

Este estudio, en el que se analizan, entre otros aspectos, los distintos patrones de evolución de la costa interior de la Isla Decepción y sus taludes, pretende proporcionar apoyo al diseño de rutas alternativas a las empleadas actualmente por los investigadores y turistas que visitan esta isla cada año, de manera que pueda brindar

información acerca de aquellas zonas que se verán mayormente modificadas a medida que pase el tiempo.

Para hacer frente a esta problemática, se han estudiado los cambios de la geomorfología de la Isla Decepción desde sus últimas erupciones, datadas entre los años 1967-1970. Para realizar el análisis de estas variaciones geomorfológicas, se han realizado distintos estudios de la isla contrastados entre sí para verificar y apoyar los resultados obtenidos. Además, se realiza su comparación con los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico que se ha implementado en el software DELFT 3D para obtener los patrones de erosión/sedimentación de la bahía de Port Foster.

Dentro del presente Trabajo se pueden diferenciar los siguientes estudios:

- Estudio altimétrico de la Isla Decepción, en el que se evalúan las variaciones altimétricas sufridas en la parte emergida de esta isla mediante la comparación de distintos MDE disponibles, una vez que han sido tratados sus datos.
- Estudio batimétrico de la bahía interior de la Isla Decepción (Port Foster), en el que se analizan las variaciones existentes entre las distintas batimetrías que se han tomado durante las últimas expediciones a la isla y algunas previas a la erupción.
- Análisis de la evolución de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción (Port Foster) mediante el análisis visual de las ortofotos disponibles, correspondientes a los años 1968, 2003 y 2020.
- Realización de un modelo hidrodinámico en DELFT 3D de la interacción entre la línea de costa de la bahía interior de la isla (Port Foster), las corrientes internas, el viento, la carrera de mareas y el aporte de caudal y sedimentos por parte de los cauces generados en época de deshielo, con el que se han obtenido los patrones de erosión/acreción de la costa interior de la bahía de Port Foster.

### 1.3 Objetivos

El objetivo global del estudio expuesto en el presente Trabajo de Fin de Máster se centra en la identificación de aquellas áreas de la bahía interior de la Isla Decepción o *Port Foster* en las que se han producido mayores variaciones morfológicas desde que se produjeran las erupciones de los años 1967-1970, así como la realización de un modelo hidrodinámico capaz de reproducir los patrones de erosión/acreción de la línea de costa de su bahía interior, cuyos resultados se contrastan con los demás estudios realizados, para poder brindar información de qué áreas próximas a la costa se encuentran más expuestas a cambios. Esto a su vez supone cumplir las siguientes etapas y objetivos:

- Uso de datos procedentes de satélites, tanto en banda radar, como visible como altímetros. Así como el testeo de la validez de los datos disponibles.
- Recopilación de los distintos MDE de la Isla Decepción desde que se produjeran las erupciones de 1967-1970 para, una vez realizadas las correcciones correspondientes sobre los valores altimétricos y de su georreferenciación, realizar un análisis de las variaciones altimétricas sufridas por la parte emergida de la isla con la comparación de estos MDE.
- Recopilación de las distintas batimetrías realizadas en la bahía interior de la Isla Decepción desde que se produjeran las erupciones de 1967-1970 para, tras realizar una serie de correcciones sobre los valores tomados y sus curvas de nivel, así como de su georreferenciación, realizar un análisis de las variaciones sufridas por la batimetría de la bahía interior de la isla.
- Delineación de las líneas de costa de la bahía interior de la Isla Decepción mediante el análisis visual de las ortofotos disponibles y que proporcionan la visibilidad total de la isla desde las erupciones datadas entre los años 1967-1970, siendo estas las ortofotos correspondientes a los años 1968, 2003 y 2020.
- Cálculo de los cambios existentes entre las distintas líneas de costa que han sido delineadas, mediante el geoprocesamiento de estos elementos. Se representan las zonas que mayor variaciones visuales han sufrido, así como la estimación de los ratios de erosión/acreción en las distintas zonas analizadas a partir de las líneas de costa delineadas.
- Realización de un modelo hidrodinámico en DELFT 3D de la interacción entre la línea de costa de la bahía de Port Foster, las corrientes internas, el viento, la carrera de mareas y el aporte de caudal y

sedimentos por parte de los cauces generados en época de deshielo, con el que se han obtenido los patrones de erosión/acreción de la costa interior de la bahía de Port Foster.

- Compresión de la dinámica de sedimentación del material volcánico en la isla mediante la comparación de los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico con los distintos resultados obtenidos del análisis altimétrico, de batimetría y los cambios visuales para validar el modelo realizado.
- Discusión de los resultados obtenidos con los descritos en otros artículos científicos realizados sobre la Isla Decepción que dispongan características similares.

## 1.4 Estructura del documento

El presente estudio se encuentra dividido en 6 Capítulos, en los cuales se desarrolla desde la motivación del Trabajo llevado a cabo hasta las conclusiones extraídas de él. Se ofrece de forma resumida el contenido de cada uno de los Capítulos para facilitar así la lectura del documento.

En el capítulo primero (1 Introducción) se presenta una breve introducción de la Isla Decepción mediante la exposición de su contexto geográfico y de sus marcos geológico y geomorfológico. Tras realizar esta introducción, se expone la problemática actual de la isla y los estudios desarrollados para brindar información que pueda ayudar a resolverla. Seguidamente se relatan los objetivos del presente Trabajo de Fin de Máster y la estructura de la que se compone este documento.

En el segundo capítulo (2 Datos de Partida) se detallan los datos de partida disponibles con su fuente de procedencia, junto a la definición de aquellos datos auxiliares que han sido generados para complementar a los datos iniciales en la realización de los estudios que componen este Trabajo.

En el tercer capítulo (3 Metodología) incluido en el presente Trabajo de Fin de Máster, comienza con una descripción global de la metodología desarrollada para la obtención de resultados en este trabajo, junto con la descripción de aquellos softwares a los que se ha recurrido para poder cumplir con los objetivos propuestos. Posteriormente, se desarrolla la metodología seguida para la realización de cada uno de los estudios que componen el presente Trabajo de manera individual, detallando en él los procesos realizados sobre los datos iniciales para la obtención de resultados correspondientes a los cambios altimétricos, batimétricos y visuales en la línea de costa. Este capítulo se finaliza con la descripción de la implementación de un hidrodinámico en DELFT 3D que permita obtener los patrones de erosión y sedimentación en Port Foster.

En el cuarto capítulo (4 Resultados), se realiza la exposición de los resultados obtenidos para cada uno de los estudios definidos en el tercer Capítulo tras el procesamiento de todos los datos necesarios, siendo estos resultados correspondientes al estudio altimétrico, batimétrico, de cambios visuales en la zona costera de la bahía interior de la Isla Decepción y los resultados derivados del modelo hidrodinámico realizado en DELFT3D.

Seguidamente, se realiza una discusión sobre los resultados obtenidos en los distintos estudios procesados, centrandó su análisis en la comparación de los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico con los correspondientes a cambios visuales en la costa y al tratamiento de datos derivados de los MDT y MDE disponibles, para poder validar el modelo. Finalmente, se realiza una breve contrastación de los resultados obtenidos con los expuestos en otros estudios científicos relacionados sobre la Isla Decepción.

En el quinto, y último capítulo (5 Conclusiones y Líneas de Estudio Futuras), se ofrecen las conclusiones extraídas de la realización del presente Trabajo de Fin de Máster y se proponen posibles líneas de investigación futura en esta isla, así como algunos aspectos del modelo hidrodinámico que son susceptibles de desarrollo.

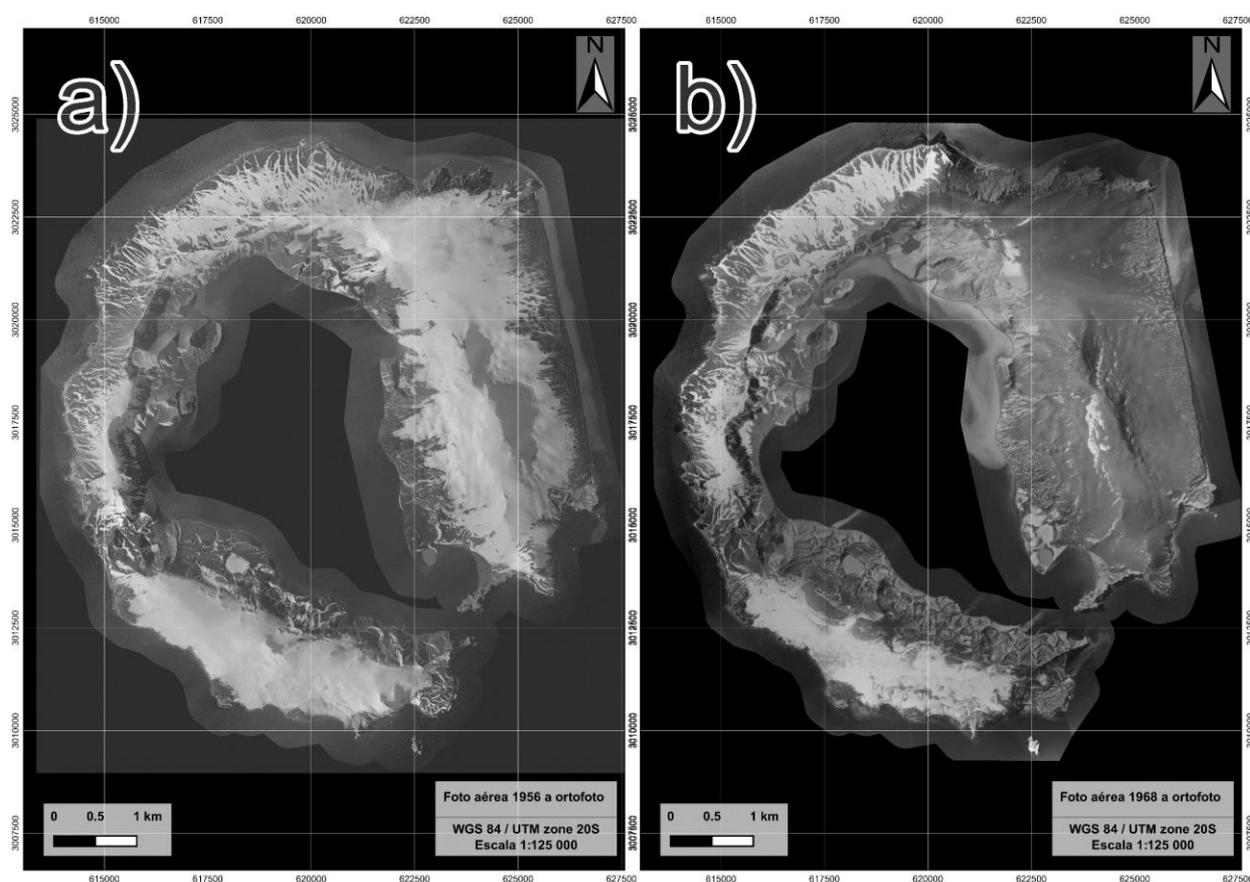
## 2 DATOS DE PARTIDA

Tras la presentación realizada sobre el contenido del Trabajo en el capítulo anterior, se describe la primera parte del mismo en este segundo capítulo. Se describen todos los datos de partida disponibles y analizados para la realización de los distintos estudios que componen este Trabajo de Fin de Máster, así como su lugar de procedencia y los demás datos complementarios que se han generado y se han empleado para la obtención de los resultados.

Este segundo capítulo se divide en cuatro apartados, agrupados según el estudio en el que se vaya a emplear la información expuesta en cada apartado, obviando que gran parte de la información expuesta es empleada en más de un estudio debido a su importancia o su apoyo a la hora de facilitar el tratamiento de los datos (siendo un ejemplo de ello el empleo de las ortofotos). Así pues, este capítulo recoge su información en los siguientes cuatro apartados: Imágenes satélite y otra información geoespacial, Líneas de costa, Modelos digitales de elevación y Modelos digitales batimétricos.

### 2.1 Imágenes satélites y otra información geoespacial

Las fotografías aéreas más antiguas de las que se dispone se corresponden con los años 1957 y 1968, siendo en estos años cuando se realizó un vuelo aéreo. Estas imágenes se han transformado a ortofoto para poder disponer de la información georreferenciada correctamente y, con ello, poder usarlas de base para el análisis de los cambios que se han producido en esta isla, ya que la primera de ellas se corresponde a la situación previa a las erupciones que se produjeron en la Isla Decepción durante la década de los 60 y que tantos cambios morfológicos han generado. En la Ilustración 2-1 se muestran las ortofotos resultantes.



*Ilustración 2-1. (a) Ortofoto resultante del procesamiento realizado sobre la imagen aérea correspondiente al vuelo realizado en el año 1957. (b) Ortofoto resultante del procesamiento realizado sobre la imagen aérea correspondiente al vuelo realizado en el año 1968. Fuente de los datos: [26].*

El Servicio Geográfico del Ejército Español (SGE), ahora Centro Geográfico del Ejército (CGE), elaboró un mapa topográfico de la isla vinculado a un mapa geológico y geomorfológico a la misma escala [7]. Se realizó una versión inicial en el año 1984 a partir de un vuelo del año 1968, que posteriormente se mejoró mediante la realización de trabajos topográficos de campo y de algunas fotografías aéreas fotogramétricas del año 1986 en el año 1994 [22] para, finalmente, realizar una nueva versión actualizada en formato digital en el año 2006, que se basaría en una imagen del satélite Quickbird (QB) y un modelo digital de elevación proveniente de datos previos para llevar a cabo el proceso de ortorrectificación [22].

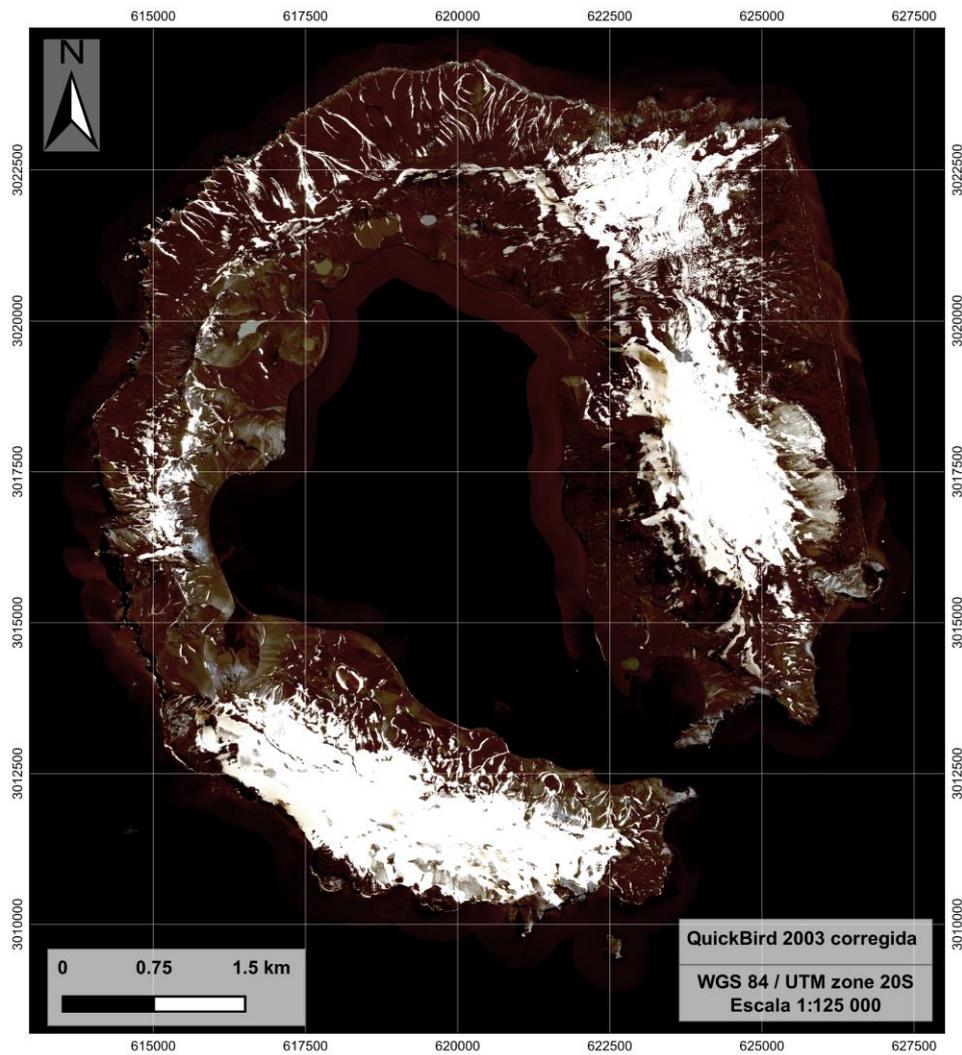
A pesar de ello, en este nuevo mapa se ha detectado y corregido un error en su georreferenciación. La falta de suficientes puntos de control terrestres (*GCPs*) en la costa exterior y en las zonas de gran altitud con las que realizar la georreferenciación, provocaron algunos errores de posicionamiento en la zona de la isla ubicada más al este. Esta discrepancia se ha verificado con al menos 100 puntos de control mediante el empleo de GPS con diferencias subdecimétricas en relación con una red geodésica llamada REGID (Red Geodésica Isla Decepción) [23] [24].

La imagen de QB utilizada en ese momento fue tomada el día 21 de enero de 2003, con una resolución espacial de aproximadamente 0.6 m en pancromático y corregida mediante ortorrectificación empleando un modelo digital de elevación desconocido. Con el nuevo Modelo de Elevación del REMA (Modelo de Elevación de Referencia de la Antártida) [25], se ha realizado una nueva georreferenciación de la imagen de QB del año 2003 usando un modelo digital de elevación de 2x2 m de resolución y 52 puntos de control terrestres (*GCPs*).

La georreferenciación se ha realizado con el software ENVI 5.0, utilizando el Coeficiente Polinómico Racional y siguiendo la metodología aplicada a la imagen del satélite Kompsat-3 (K3), la cual fue adquirida el 9 de febrero de 2020, con una resolución de 0.7 m en pancromático [26]. En la Ilustración 2-2 se expone el resultado de la imagen correspondiente al año 2003 cuya referenciación ha sido corregida. Dada la oscuridad con la que se muestra la imagen original, se han realizado varios cambios en su estructura de visualización (parámetro gamma, contraste, brillo y saturación) que permitan que se pueda ver con mayor nitidez.

Además de esto, se ha analizado una nueva ortofoto correspondiente al año 1968 (que ha sido empleada para la delineación de la línea de costa previa a las erupciones datadas de los años 1967-1970) [26], algunas imágenes parcialmente nubladas del Sentinel 2 (8 del año 2016 y una sin nubes, pero con la isla cubierta de nieve en el año 2022) de la Agencia Espacial Europea (ESA), y algunas imágenes históricas de Google Earth (6 imágenes del año 1985), con las que se han identificado las plumas de sedimentos más importantes de los abanicos aluviales, lo cual ha ayudado a evaluar el flujo hidrológico y conocer con mayor detalle las zonas en las que se acumulan los sedimentos procedentes de los arroyos o ríos generados por el deshielo, así como identificar cuáles de ellos generan, visualmente, una mayor deposición (ver Tabla 1). Las condiciones climáticas del área dificultan la obtención de imágenes sin nubes, por esta razón el repositorio de imágenes no es muy amplio.

La información vectorial utilizada en este Trabajo proviene principalmente de la base de datos SIMAC, pero también de otras fuentes que requieren la digitalización de la información requerida. El enfoque de esta nueva información está centrado en los cambios de la costa interna de la isla (líneas de costa, expuesto en el apartado 2.2), principalmente a partir de las ortofotos de 1968, 1970, 2003 y 2020. Toda la información cartográfica analizada en este estudio se puede consultar en la Tabla 2-1.



*Ilustración 2-2. Ortofoto tomada en el año 2003 correspondiente al QB una vez realizada su nueva georreferenciación y representada con nuevos valores en los parámetros que definen su estructura visual ( $\gamma = 1.94$ ,  $\text{contraste} = 74$ ,  $\text{brillo} = 167$  y  $\text{saturación} = -40$ ). Fuente de la imagen: [25] y edición propia.*

**Tabla 2-1. Información de las imágenes satélite e información cartográfica de partida**

Denominación	Fuente Digital	Descripción	Fecha
Ortofoto 1957	Servicio de Hidrografía Naval Argentino (SHNA)/propio [26]	Ortofoto del vuelo FIDASE	1957
Ortofoto 1968	Servicio de Hidrografía Naval Argentino (SHNA)/propio [26]	Ortofoto del vuelo FIDASE	1968
Nueva QB <sup>1</sup> K3 <sup>1</sup>	SIMAC [25] /propio K3/propio [26]	QuickBird, 0.6 m KOMPSAT-3 <sup>22</sup> , 0.7 m	20-ene-2003 09-feb-2020
Imágenes Sentinel	Sentinel 2, 10m	30-mar-2017, 23-feb-2019, 30-dic-2019, 08-feb-2020, 27-dic-2020, 13-ene-2021, 06-ene-2021, 02-feb-2021, 29-mar-2022 (cubierto de nieve)	
Imágenes Google Earth	Google Earth	Imágenes satélite (otras plataformas)	15-ene-2002, 20-oct-2005 (cubierto de nieve), 29-dic- 2013
Curvas de Nivel	CGE/SIMAC	línea	1970 y 2003
Ríos/arroyos del deshielo	CGE/SIMAC	línea	1970 y 2003
Mapa geomorfológico	SIMAC [28]	Grupo de información	2002

## 2.2 Líneas de costa

Uno de los objetivos principales de la obtención de información cartográfica de la Isla Decepción es la visualización de los cambios que se han producidos en la línea de costa del interior de la bahía de Port Foster desde que se produjeran las erupciones de finales de los años 60. Para poder realizar una evaluación visual de los cambios más destacados en el contorno de esta bahía, se ha realizado la delimitación de su línea de costa en los años de los que se dispone suficiente calidad en las ortofotos como para poder identificar la línea de costa.

Se ha realizado la delimitación de la línea de costa de la bahía de Port Foster en cuatro años diferentes, siendo estas correspondientes a los años 1968, 1970, 2003 y 2020, para las cuales se ha empleado la ortofoto de 1968 del Servicio de Hidrografía Naval Argentino [26], la nueva QuickBird del año 2003 del SIMAC [26] tras las correcciones realizadas sobre esta y la ortofoto K3 del año 2020 [26].

Además, como apoyo a la delimitación de estas líneas de costa se dispuso de la delimitación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondiente al año 2003, delimitada por el CGE, y de la delimitación del tramo de costa ubicado al norte de la isla correspondiente al año 1970, tras las erupciones sufridas por la isla entre los años 1967-1970.

En la Tabla 2-2 se detalla la información de partida y de nueva realización referente a la delimitación de las líneas de costa. Como se expone en esta tabla, los datos disponibles de las líneas de costa correspondientes a los años 1970 y 2003 se han empleado como base para la delimitación de las líneas de costa correspondientes a estos años (1970 y 2003) y para la delimitación de la línea de costa correspondiente a los años 1968 y 2020, las cuales también se han apoyado en las ortofotos disponibles de dichas fechas.

La delimitación de las líneas de costa de los años mencionados se ha realizado con el fin de que se reflejen los cambios acaecidos en el contorno de la bahía de Port Foster, sin ser estrictamente estos los únicamente sufridos

<sup>1</sup> Generación de una nueva Ortofoto verdadera con el REMA. MDT.

<sup>2</sup> Incluye material ©KARI 2020, Distribución (SI Imaging Services, República de Corea), todos los derechos reservados.

por la línea de costa, sino que se ha extendido la delineación a las zonas en las que verdaderamente se producen modificaciones en la morfodinámica de la costa, por lo que en ciertas zonas en las que no se observan cambios destacables en la línea de costa, esta se ha retranqueado hasta su talud previo en el que sí se observa erosión o sedimentación (como es el caso del sur de la isla, en el talud ubicado delante de las bases española y argentina) o mediante la representación del contorno del glaciar negro al este de la bahía interior de la Isla Decepción, en la que se observan ciertas zonas con grandes cambios tras las erupciones de los años 1967-1970. Es por ello, que la información generada no representa fielmente la línea de costa en toda la bahía interior, ya que hay zonas en las que no se encuentra la línea creada sobre esta, pero, aun así, se denominará línea de costa a los contornos interiores de la isla que se han delineado para facilitar su nomenclatura e identificación a lo largo del documento.

*Tabla 2-2. Información sobre las distintas líneas de costa analizadas y delineadas.*

Denominación	Fuente Digital	Descripción	Fecha
Línea de Costa 1968	Propia (ortofoto 1968)	línea	1968
Línea de Costa 1970	SIMAC [35] / Propia (ortofoto 1968)	línea	1970
Línea de Costa 2003	CGE/ SIMAC (QB) /Propia	línea	2003
Línea de Costa 2020	Propia (K3) [26]	línea	2020

Por tanto, a pesar de tener una buena definición de la línea de costa del año 2003, se ha delineado una nueva línea que permita comparar y cuantificar los cambios sufridos en el contorno de la isla con el paso de los años en condiciones similares para todos los años representados, realizando modificaciones en esta en ciertas zonas de la bahía interior.

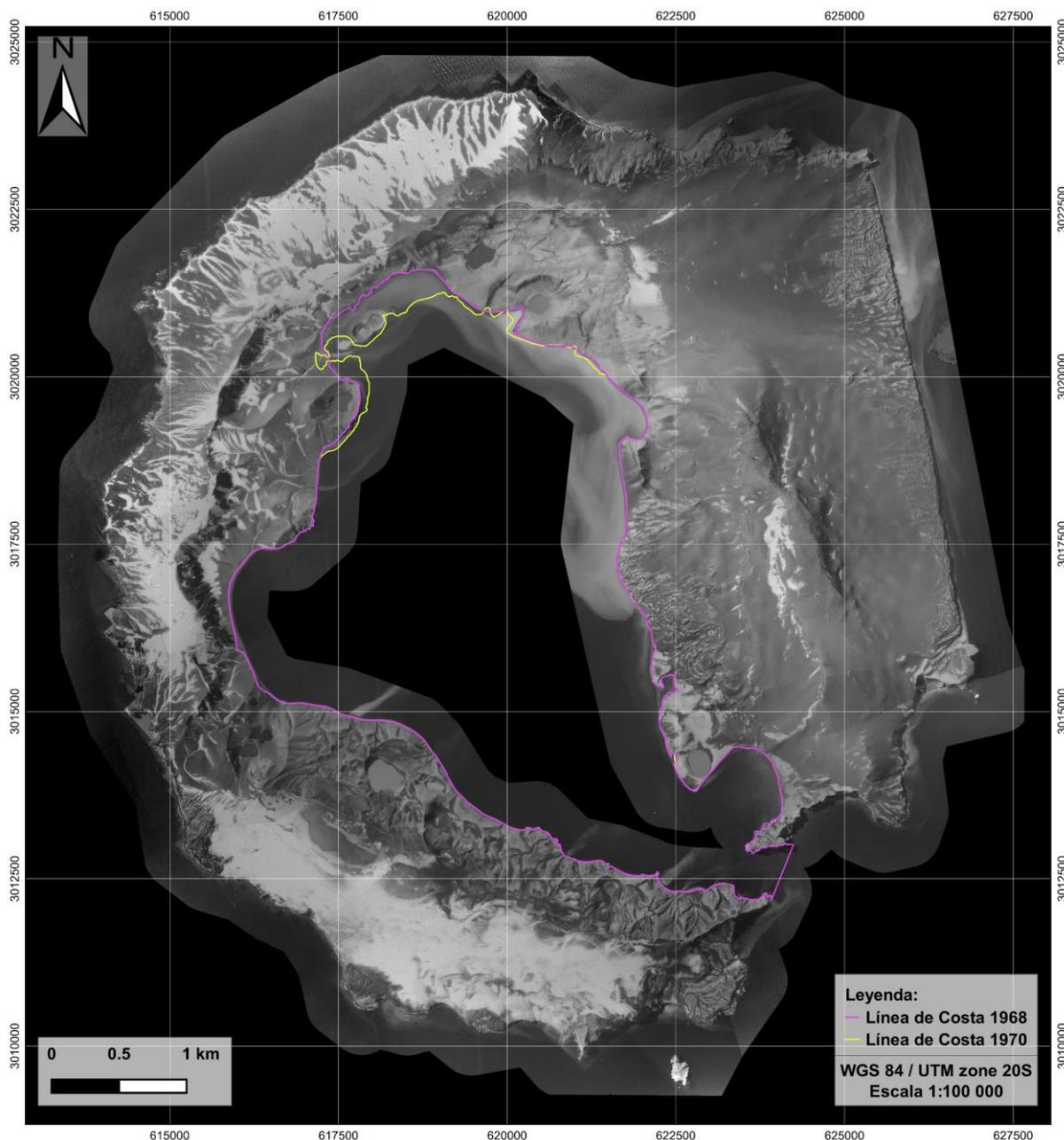
La línea de costa correspondiente al año 1968 se delineado mediante el análisis y observación de la ortofoto del año 1968 tras la modificación de su estructura de visualización para mejorar su nitidez. Esta línea de costa corresponde a la situación de la bahía interior de la isla antes de que se produjesen las erupciones de finales de los años 60.

Dado que se dispone de la delineación del tramo norte de la línea de costa correspondiente al año 1970, se ha realizado su ampliación al resto de Port Foster mediante la unión de esta información, aportada por el SIMAC [35] tras las últimas erupciones registradas en la isla y la línea de costa delineada del año 1968. Se conoce que la mayor interacción del material expulsado en las erupciones con la bahía de la isla se produjo en la zona que el SIMAC delineó, acumulándose una gran cantidad de material en el noroeste de la isla, mientras que las demás zonas de la costa interior de la isla no vieron muy modificada su línea de costa.

Por último, se ha delineado la línea de costa que representa el contorno de Port Foster en el año 2020, siguiendo el mismo criterio que para la delineación de la línea de costa del año 1968, es decir, mediante la observación e interpretación de la ortofoto K3 tomada en febrero del año 2020.

En la Ilustración 2-3 se expone el resultado de la delineación de la línea de costa de Port Foster en el año 1968 sobre la ortofoto correspondiente al año 1968 empleada como base para su definición.

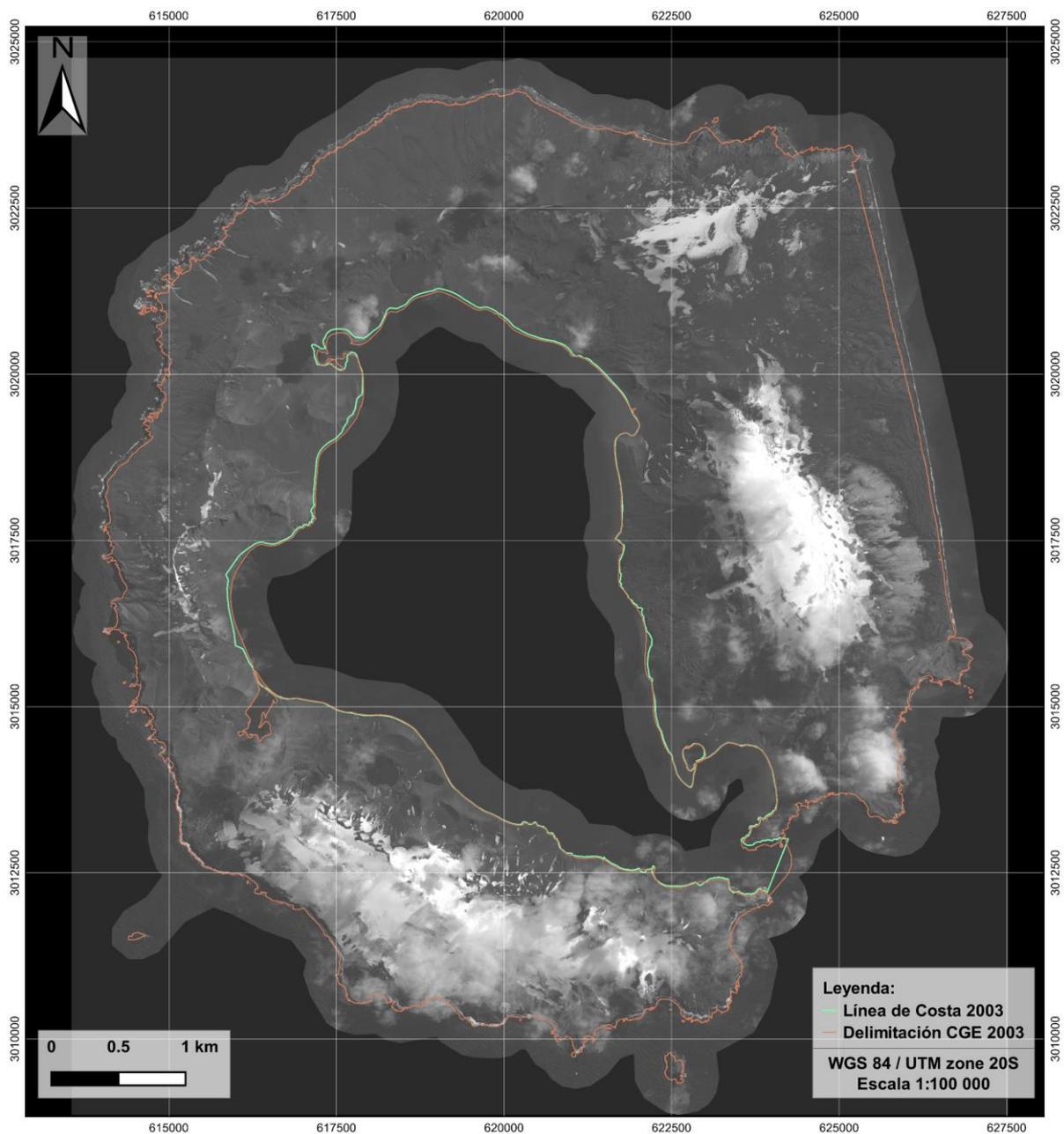
En esta misma ilustración (Ilustración 2-3) se expone el resultado de la delineación de la línea de costa de Port Foster en el año 1970 sobre la ortofoto correspondiente al año 1968 empleada como base para la definición de parte de esta y así se aprecien las modificaciones sufridas en la zona norte de la isla debido a las erupciones de finales de los años 60.



**Ilustración 2-3. Representación de la delineación de las líneas de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondientes a los años 1968 y 1970 sobre la ortofoto del año 1968 proporcionada por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35].**

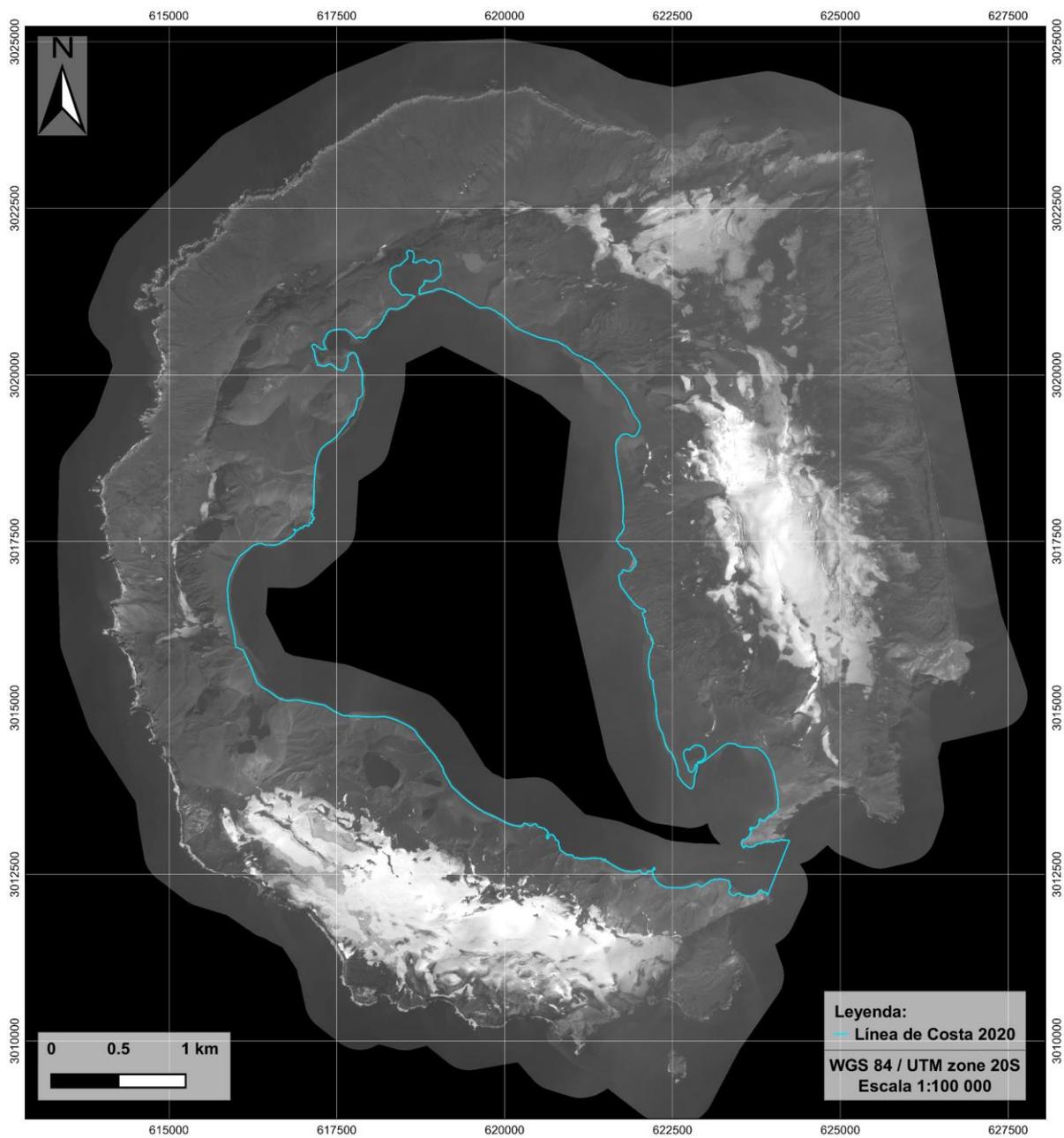
En la Ilustración 2-4 se expone el resultado de la modificación de la delineación de la línea de costa de Port Foster en el año 2003 sobre la ortofoto correspondiente a este mismo año, pero tomada en febrero (a diferencia de la ortofoto mostrada en la Ilustración 2-2), perteneciente a QB.

En esta ilustración (Ilustración 2-4) se incluye la línea de costa delineada por el CGE en el año 2006 correspondiente al año 2003, mostrando así las diferencias incluidas en la delineada propiamente y la mencionada para poder realizar la evaluación de cambios importantes en el contorno interior de la Isla Decepción.



*Ilustración 2-4. Representación de la delineación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondiente al año 2003. Junto a ella se representa la delineación del contorno de la Isla Decepción realizada por el CGE. Ambas se representan sobre la ortofoto QuickBird del año 2003 proporcionada por el Servicio de Hidrografía Naval Argentino ( $\gamma = 2.25$ ,  $\text{contraste} = 9$ ,  $\text{brillo} = 25$  y  $\text{saturación} = -60$ ). Fuente de los datos: Elaboración propia, QB y CGE [25].*

En la Ilustración 2-5 se expone el resultado de la delineación de la línea de costa de Port Foster en el año 2020 sobre la ortofoto correspondiente a este mismo año, perteneciente a K3 y que ha sido empleada como base para su delineación. Los parámetros de la estructura de la imagen, al igual que en las anteriormente mencionadas, se han variado para poder observarla con una mayor nitidez.



**Ilustración 2-5. Representación de la delineación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción correspondiente al año 2020. Se representan sobre la ortofoto K3 del año 2020 ( $\gamma = 2.00$ ,  $\text{contraste} = 17$ ,  $\text{brillo} = 36$  y  $\text{saturación} = 33$ ). Fuente de los datos: Elaboración propia y K3 [26].**

## 2.3 Modelos digitales de elevación

Otra información fundamental para la realización de los estudios llevados a cabo en el presente Trabajo es la disposición de modelos digitales del terreno (MDT) o modelos digitales de elevación (MDE) capaces de representar la morfología de la isla, así como la altura de esta en cada uno de sus puntos.

Con el análisis y la comparación de los distintos modelos digitales de elevación realizados en un mismo emplazamiento en distintas fechas es posible realizar una estimación de que zonas han perdido o ganado altura, o lo que es lo mismo, es posible conocer qué zonas de la Isla Decepción en este caso han sufrido erosión o sedimentación según estos modelos, así como aquellas zonas en las que tiende a acumularse el material o tiende a perderse.

Aunque el SIMAC incluye un Modelo Digital de Elevación obtenido a partir de las curvas de nivel de 50 m de distancia entre sí del mapa de la Dirección de Levantamientos Ultramarinos (DOS) británica del año 1959 [26], obtenido a partir de fotografías aéreas verticales del año 1956, su proyección transformada y la línea de costa presentan importantes diferencias con el MDE correspondiente a la cartografía del CGE de los años 1968-1986.

El estudio realizado por Torrecillas et al. [5] contrasta ambos modelos digitales de elevación sin obtener unas conclusiones claras más allá del área afectada por el último proceso volcánico (erupciones de finales de los años 60). Los nuevos MDE realizados de la Isla Decepción provienen todos de datos satelitales, destacando entre los disponibles el denominado REMA. El REMA se produjo a partir de varios MDE estereoscópicos individuales obtenidos a partir de pares de imágenes satelitales de resolución submétrica adquiridas entre los años 2009 y 2021, registradas ortogonalmente con mediciones de altimetría satelital, cuyas incertidumbres absolutas son submétricas y las incertidumbres relativas son de decímetros.

El modelo del REMA proporciona valores a las áreas acuáticas, como es el caso de Port Foster, y presenta en ella valores alrededor de 20 m, lo que quiere indicar que no se ha aplicado la corrección elipsoidal, por lo que se ha restado un valor promedio de 20 m siguiendo lo indicado en [27].

Todos los datos de entrada de los MDE disponibles y utilizados en este Trabajo de Fin de Máster se pueden consultar en la Tabla 2-3.

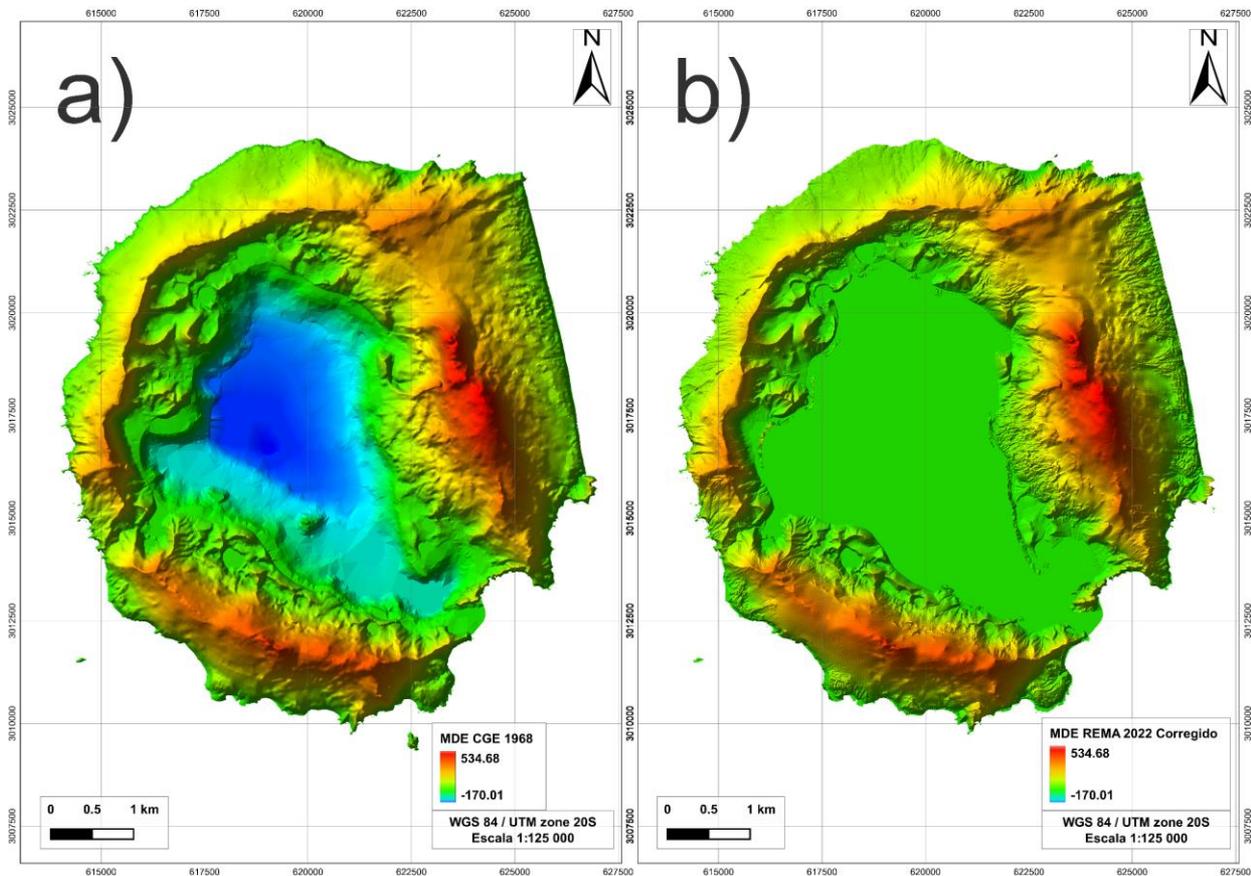
*Tabla 2-3. Información sobre los modelos de elevación del terreno disponibles como datos de partida.*

Denominación	Fuente Digital	Descripción / Resolución	Fecha
DOS DEM	DOS/SIMAC	ESRI Grid/2m	1956
1957 DEM	Propio	Tiff file/2.7m	1957
1968 DEM	Propio	Tiff file/2.7m	1968
CGE DEM	CGE/SIMAC	ESRI Grid/2m	1968 and 1986
REMA	REMA	Two Tiff files (45_04_2_2_2m_v2.0 and 45_05_2_1_2m_v2.0)/ 2m	2009-2011 <sup>3</sup>
REMA2022_20m	REMA/propio	Tiff file/2m	2020

Para la realización del estudio altimétrico en un entorno SIG se ha empleado principalmente el MDE proporcionado por el CGE correspondiente a los años 1968-1986 y el MDE proporcionado por el REMA correspondiente al año 2022, al que se le ha aplicado la mencionada corrección de 20 metros a su altura elipsoidal. En la Ilustración 2-6 se representan dichos MDEs con la misma escala de color para la representación de su altura, de manera que pueda apreciarse la diferencia entre ambos.

<sup>3</sup> Altura Elipsoidal

Además, han sido descargadas 61 escenas procedentes del Sentinel 1 perteneciente a la ESA para procesarlas y obtener nuevos modelos digitales del terreno mediante el empleo de la metodología RADAR.



**Ilustración 2-6. Representación de los modelos digitales de elevación del terreno empleados para el estudio de cambios altimétricos en SIG. (a) MDE proporcionado por el CGE correspondiente al año 1968. (b) MDE proporcionado por el REMA correspondiente al año 2022 tras la corrección de su altura elipsoidal 20 metros. Fuente de los datos: propio, CGE y REMA.**

## 2.4 Modelos digitales batimétricos

Los datos de partida necesarios restantes para poder realizar los estudios descritos en este Trabajo son aquellos correspondientes a la batimetría interior de la Isla Decepción, concretamente los modelos digitales batimétricos que se encuentren disponibles.

La batimetría de la bahía interior es una parte importante de la Isla Decepción, ya que en el interior de esta confluyen variadas formaciones que caracterizan su peculiar geomorfología, destacando en esta la presencia de volcanes sumergidos, como es el caso del volcán Stanley Patch, la presencia del cono volcánico más grande de la isla, ubicado en el sector sur de esta bahía [28] o la estrecha entrada a Port Foster (denominada Neptunes Bellows, y que se encuentra representada en la Ilustración 1-1 (b)). Por este motivo, para la obtención de una batimetría precisa se requieren datos procedentes de un equipo de navegación. Esta bahía se puede considerar como un lago que recepciona una importante cantidad de tefra cada año [29] [7].

La batimetría empleada inicialmente fue elaborada y compilada por algunas instituciones públicas españolas como son el SGE/CGE, el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) y el Instituto Español de Oceanografía (IEO) entre los años 1988 y 1991, con una altura ortométrica calculada a partir de la referencia de un mareógrafo local y un GPS diferencial submétrico [7]. Se generó un archivo ráster interpolado a partir de curvas batimétricas de 10 m, considerando un error de 3 m para el valor de la profundidad “z” (1/3 de la equidistancia) y un error de 5 m para la planimetría. Tras la realización de esta batimetría, se midieron nuevos datos en dos campañas

diferentes realizadas en el año 2012 [20] y en el año 2016, con un error altimétrico de 0.5 m para la profundidad y de 5 m para la planimetría según la información contenida en los metadatos de la información disponible.

A través del sistema de datos de ciencias geológicas marinas (MGDS, por sus siglas en inglés), se descargaron siete subconjuntos con la descripción “Profundidad marina (sin corrección, velocidad del sonido calculada de 1500 m/s) en metros”. Estos subconjuntos pertenecen a la expedición Laurence M. Gould (prefijo LMG) realizada entre los años 2000 y 2009, y de los que se han seleccionado los puntos ubicados dentro de Port Foster para, posteriormente, unirlos en un archivo reconocible por un SIG. Estos archivos generados se exponen en la Ilustración 2-7.

Se han identificado y eliminado las mediciones anómalas de la profundidad producidas por falsos retornos, así como, no se ha considerado el itinerario realizado en 2006 alrededor de *Walers Bay* debido a un valor anómalo intermitente en la trayectoria temporal. El conjunto final contiene 17256 puntos (11289 de 20000) y se ha calculado un grid empleando celdas de 50 m de media, siendo esta la misma resolución que se empleó en el estudio de Barclays et al [30], en el que se mezclaron los datos propios del año 2005 con los datos del MGDS en esta zona.

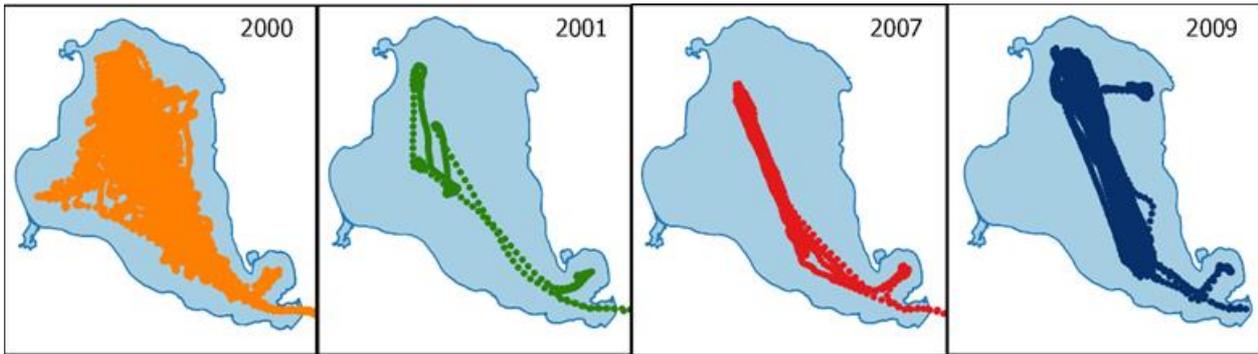
Este grid se asoció al año 2005, como año promedio, y la desviación estándar obtenida es de 1.87 m con  $\sigma = 2.2$  m. Estos valores no han sido corregidos por los efectos de marea, cuya amplitud máxima es de 2.025 m [31] [32], similar a la desviación estándar promedio. Se ha asumido un valor similar de 2 m para las señales externas superpuestas en [30]. En cuanto al error de posicionamiento, se puede considerar una incertidumbre de posicionamiento de 5 m para los datos descritos, ya que es altamente probable que se usase el GPS. Las rutas de navegación a través de los estrechos Neptune Bellows sugieren que este valor es apropiado.

Todos los datos de entrada relacionados con la batimetría utilizados en este estudio se pueden consultar en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4. Información sobre los modelos de elevación batimétrica disponibles como datos de partida.**

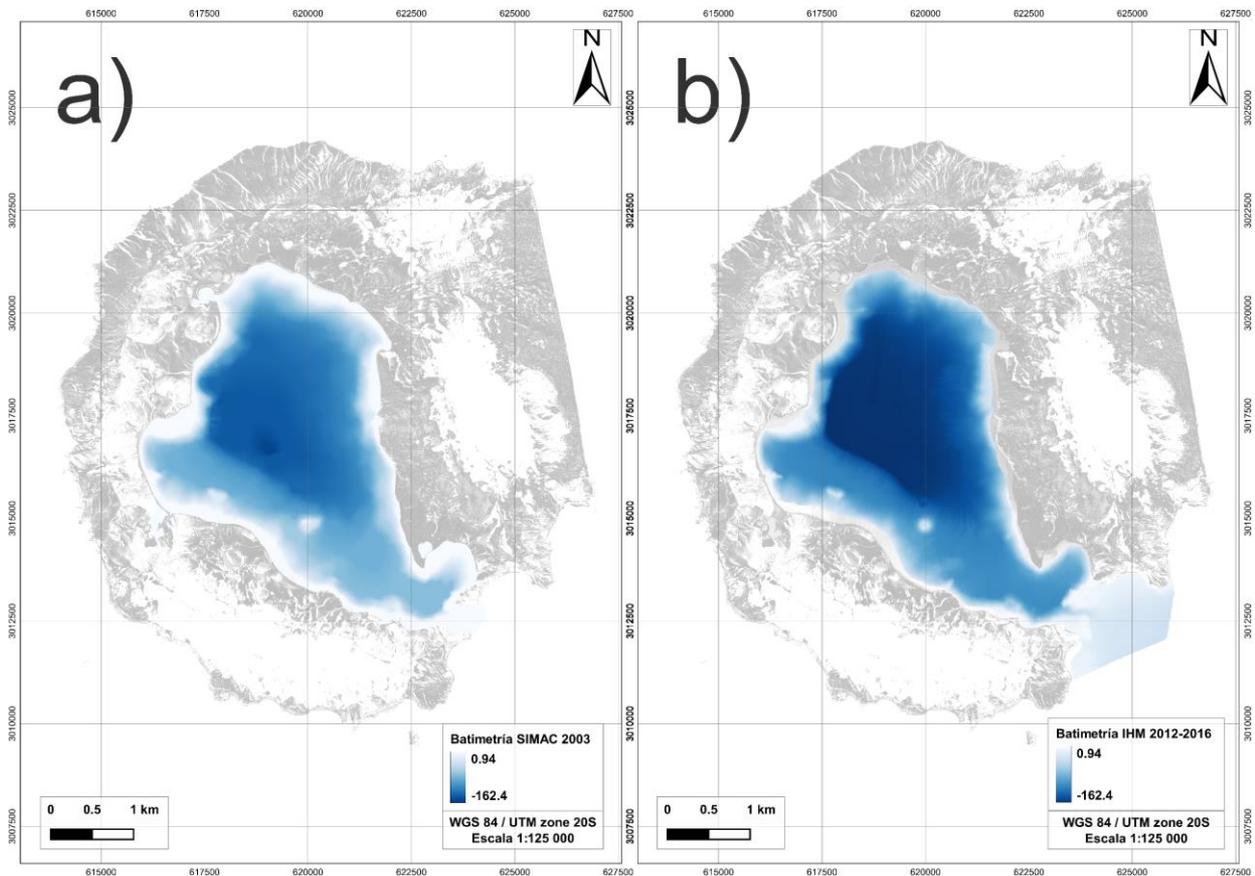
Denominación	Fuente Digital	Descripción	Fecha
Batimetría CGE	Adaptación del CGE/IHM/IEO [7]	Curvas de nivel cada 10 m	1988-91
Batimetría LMG0010	MGDS [33]	10 archivos	2000
Batimetría LMG0102	MGDS [34]	1 archivo	2001
Batimetría LMG0704	MGDS [35]	2 archivos	2007
Batimetría LMG0712	MGDS [36]	1 archivo	2007
Batimetría LMG0903	MGDS [37]	4 archivos s	2009
Batimetría media MGDS	Adaptación del MGDS	Grid Archivo XYZ	2005 <sup>4</sup> 2012 (bahía central) 2016 (algunas zonas de la costa)
Batimetría IHM	IHM [20]		
Batimetría externa de South Shetlands	British Antarctic Survey [38]	Archivo Ascii	1991-2017

<sup>4</sup> Considerado como año promedio.



**Ilustración 2-7.** Datos de la expedición Laurence M. Gould proporcionados por el MGDS. Fuente de los datos: MGDS [33] [34] [35] [36] [37].

Para la realización del estudio batimétrico, se han empleado, entre otros datos, el BEM proporcionado por el SIMAC correspondiente al año 1991 y el BEM proporcionado por el IHM correspondiente a los años 2012-2016. En la Ilustración 2-8 se representan dichos BEMs con la misma escala de color para la representación de su altura, de manera que pueda calificarse la diferencia entre ambos. Se puede apreciar que, en el segundo de ellos, la batimetría se muestra algo más profunda que el primero, asociado a la consideración de la altura elipsoidal en vez de ortométrica, cuya diferencia en sus valores es del orden de 20 metros, y cuya corrección se detallará posteriormente en el siguiente capítulo, en su apartado 3.3.



**Ilustración 2-8.** (a) BEM proporcionado por el SIMAC correspondiente al año 1991 (b) BEM proporcionado por el IHM correspondiente a los años 2012-2016. Fuente de los datos: SIMAC [7] e IHM [20].

## 3 METODOLOGÍA

Una vez que en el capítulo anterior (2 Datos de Partida) se han presentado los datos de partida disponibles y generados que se han empleado para la realización de los distintos estudios, en este tercer capítulo se detalla la metodología que se ha seguido para procesar el tratamiento de los datos disponibles con el objetivo de obtener una serie de resultados significativos y cuantificables de los cambios que se han producido durante los últimos años en la Isla Decepción, así como se expone la metodología seguida para la elaboración de un modelo numérico en el software DELFT 3D con el que modelar el comportamiento aproximado de la costa de la bahía interior de la Isla Decepción referente al transporte de los sedimentos de tefra procedentes del deshielo y su interacción con las corrientes internas de la bahía.

Este tercer capítulo se divide en cinco apartados, siendo el primero de ellos una breve exposición de la metodología general seguida en todo el Trabajo junto a una descripción de los software empleados para poder alcanzar los resultados obtenidos. Los demás apartados que definen este capítulo se centran en detallar la metodología seguida para la obtención de los resultados en el estudio de los modelos digitales de elevación, los modelos digitales batimétricos, la línea de costa y la elaboración de un modelo numérico en DELFT 3D.

### 3.1 Metodología general y software empleado

El primer apartado de este tercer capítulo se destina a describir brevemente la metodología general seguida para realizar el procesamiento de los datos de partida, que han sido descritos en el capítulo anterior, para la obtención de los resultados que se exponen en el cuarto capítulo de este Trabajo, y a la descripción de los softwares empleados para llevar a cabo dichos procesos.

#### 3.1.1 Metodología general

A excepción de la definición de un modelo numérico que sea capaz de representar los patrones de erosión y sedimentación en el contorno de la bahía interior, el resto de estudios realizados siguen unos patrones similares en cuanto a la metodología seguida para el procesamiento de los datos de partida disponibles con el fin de obtener resultados cuantificables que puedan ser posteriormente comparados entre sí y permitan, a su vez, validar los resultados obtenidos en el modelo numérico realizado en el Software DELFT 3D.

Tras el análisis de los datos de partida y realizar las correcciones necesarias sobre estos, como la corrección de su georreferenciación o la corrección de los valores de su altura elipsoidal, junto a la generación de nuevos datos de partida, como es el caso de la delimitación de las líneas de costa de los años 1968, 1970, 2003 y 2020, se han realizado diversos procesos sobre estos que permiten cumplir con cada uno de los objetivos desarrollados en la introducción de este Trabajo de Fin de Máster.

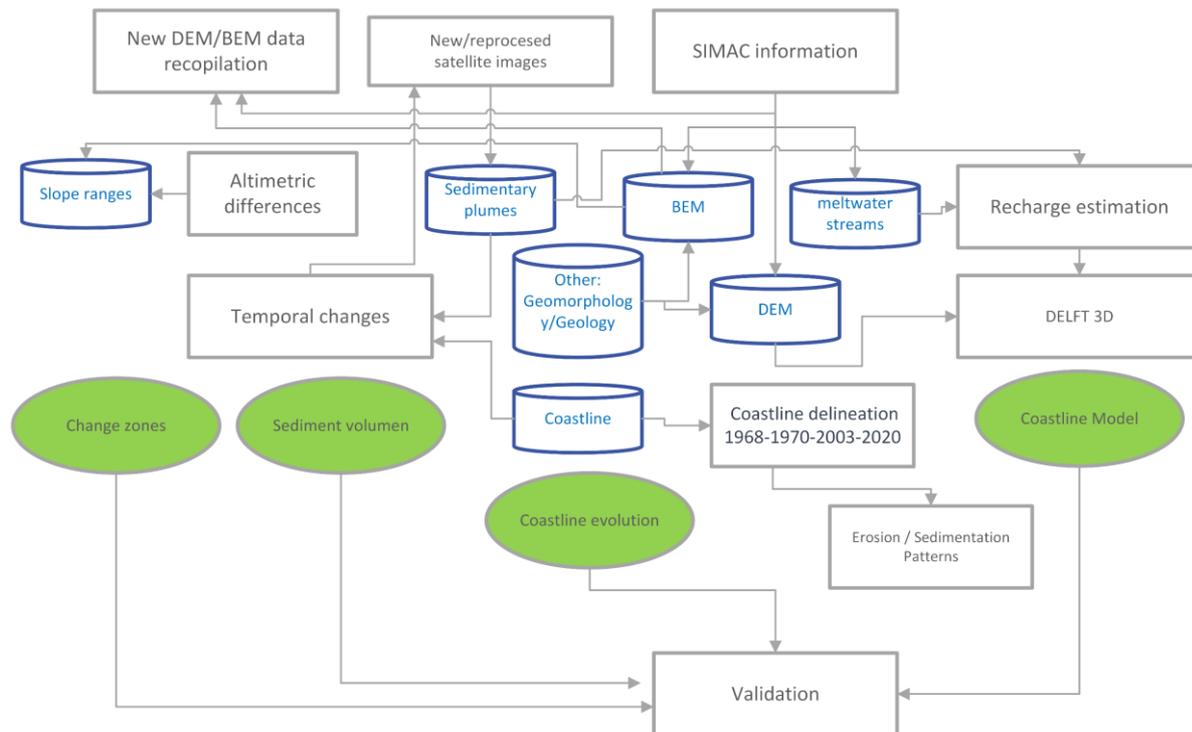
Genéricamente, se han realizado procesos que permitan definir los cambios experimentados por la Isla Decepción desde que se produjeran las erupciones de los años 1967-1970. Para ello, en los estudios correspondientes al análisis de los cambios altimétricos (modelos digitales de elevación), los cambios batimétricos (modelos digitales batimétricos) y de cambios visuales en la línea de costa del interior de la bahía de la Isla Decepción, se han seguido los siguientes pasos:

- Obtención de todos los datos de partida: ortofotos históricas, imágenes satélite, modelos digitales de elevación del terreno, estudios batimétricos e información cartográfica.
- Corrección de datos incorrectos, desestimación de aquellos valores incoherentes y refinamiento de la zona de estudio.
- Transformación de los puntos disponibles (batimetría) y archivos shape tipo línea (líneas de costa) en archivos tipo ráster o polígonos que permitan comparar los distintos archivos disponibles.
- Comparación de los nuevos datos generados para poder obtener las diferencias temporales entre estos, mediante el empleo de herramientas tales como la calculadora ráster, para obtener las diferencias altimétricas entre los modelos de elevación del terreno o diferencias batimétricas entre las distintas batimetrías disponibles, o las herramientas de geoprocésamiento vectorial para definir las áreas de la

costa en las que se han producido cambios sensibles entre las distintas fechas analizadas.

- Validación de los resultados que se han obtenido de los cambios temporales en la Isla entre sí junto con los resultados obtenidos en el modelo numérico realizado en el software DELFT 3D.
- Preparación de la representación gráfica de los resultados obtenidos en cada estudio.

En la Ilustración 3-1 se expone un esquema general de la metodología seguida para la obtención de los resultados y su posterior validación.



*Ilustración 3-1. Esquema de la metodología seguida para la obtención de los resultados.*

### 3.1.2 Software empleado

En el presente subapartado se realiza una breve descripción de las capacidades y del funcionamiento que disponen los softwares que se han empleado para la realización de los estudios que componen este Trabajo de Fin de Máster, así como una breve relación del uso que ha dispuesto cada uno de ellos.

#### 3.1.2.1 Software ArcGIS Pro

ArcGIS Pro es un software de sistema de información geográfica (SIG) desarrollado por Esri. Proporciona una plataforma completa y avanzada para la creación, gestión, análisis y visualización de datos espaciales. Este software permite a sus usuarios:

- Disponer de una interfaz de usuario intuitiva: ArcGIS Pro presenta una interfaz moderna y fácil de usar que permite a los usuarios acceder rápidamente a las diferentes herramientas y funciones. Dispone de una cinta de opciones en la parte superior que proporciona acceso a las diferentes pestañas y herramientas, mientras que su panel de contenido y las vistas en 2D y 3D permiten visualizar y analizar los datos de manera eficiente.
- Permite una fácil organización de proyectos: Con ArcGIS Pro, los usuarios pueden crear y gestionar proyectos geospaciales. Los proyectos permiten organizar de forma lógica los datos, mapas, capas y análisis relacionados. Los usuarios pueden trabajar en varios proyectos simultáneamente y compartirlos fácilmente con otros colaboradores.
- Realizar un análisis espacial avanzado: ArcGIS Pro ofrece una amplia gama de herramientas de análisis

espacial que permiten realizar operaciones como superposición de capas, consultas espaciales, cálculos de rutas óptimas y análisis de patrones. Estas herramientas proporcionan información valiosa para la toma de decisiones y la resolución de problemas relacionados con el entorno geoespacial.

- Editar y gestionar datos: El software permite editar y gestionar datos espaciales de forma eficiente. Los usuarios pueden crear, modificar y eliminar elementos geográficos, así como realizar operaciones avanzadas de edición, como dividir, fusionar y agregar geometrías. Además, ArcGIS Pro ofrece herramientas para la validación y limpieza de datos, asegurando la calidad y consistencia de la información.
- Visualización y representación cartográfica: Con ArcGIS Pro, los usuarios pueden crear mapas atractivos y personalizados. Se pueden aplicar diferentes estilos y simbologías a las capas, así como utilizar herramientas de etiquetado y diseño de mapas para crear representaciones visuales claras y efectivas. Además, se pueden crear vistas en 3D para una visualización tridimensional de los datos.
- Integración de datos y análisis en tiempo real: ArcGIS Pro permite la integración de datos en tiempo real a través de la conexión con fuentes de datos en continuo, como sensores y dispositivos GPS. Esto permite realizar análisis y visualizaciones en tiempo real, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones como seguimiento de flotas, monitoreo ambiental y gestión de emergencias.

En resumen, el software ArcGIS Pro es una potente herramienta de SIG que proporciona capacidades avanzadas para la creación, gestión, análisis y visualización de datos espaciales. Su interfaz intuitiva, amplia gama de herramientas de análisis y capacidades de integración en tiempo real han permitido desarrollar gran parte de los procesos descritos a lo largo de este capítulo, especialmente en los correspondientes al procesamiento de los datos disponibles de Modelos Digitales de Elevación y los Modelos Digitales Batimétricos, permitiendo transformar las nubes de puntos disponibles de las batimetrías en archivos ráster que representen sus valores de una forma más manejable, así como representar las rutas que se siguieron para su toma de datos.



*Ilustración 3-2. A la izquierda se muestra el logotipo oficial del Software ArcGIS Pro, creado por la empresa ESRI. A la derecha se muestra el logotipo oficial de ESRI España. Fuente: ESRI, 2023.*

### 3.1.2.2 Software QGIS

QGIS es un software de sistema de información geográfica (SIG) de código abierto y gratuito que proporciona una amplia gama de herramientas para el análisis, visualización y gestión de datos espaciales. Este software permite a sus usuarios:

- Interfaz de usuario intuitiva y personalizable: QGIS presenta una interfaz de usuario diseñada pensando en la facilidad de uso y la accesibilidad. Su diseño intuitivo permite a los usuarios acceder rápidamente a las herramientas y funciones necesarias para su trabajo. Además, QGIS ofrece la capacidad de personalizar la interfaz, permitiendo a los usuarios organizar las barras de herramientas, los paneles y las ventanas de acuerdo a sus preferencias y flujos de trabajo individuales. Esto brinda una experiencia de usuario más eficiente y cómoda, adaptada a las necesidades específicas de cada usuario.
- Potentes herramientas de análisis espacial: QGIS ofrece un conjunto completo de herramientas de análisis espacial que permiten a los usuarios realizar una amplia gama de tareas analíticas. Estas herramientas incluyen consultas espaciales, superposición de capas, análisis de proximidad, cálculo de rutas y mucho más. Con estas herramientas, los usuarios pueden explorar y comprender mejor los datos geoespaciales, descubrir patrones y relaciones, y obtener información significativa para la toma de decisiones informadas. La flexibilidad y funcionalidad de las herramientas de análisis de QGIS hacen que sea una herramienta poderosa para investigadores, profesionales y entusiastas del análisis espacial.

- Amplia gama de formatos de datos compatibles: QGIS es compatible con una amplia variedad de formatos de datos geoespaciales, lo que brinda a los usuarios la flexibilidad de trabajar con diferentes tipos de información geográfica. Puede leer y escribir datos en formatos como shapefile, GeoTIFF, GeoPackage, CSV y muchos otros. Además, QGIS admite la conexión a bases de datos espaciales, lo que permite acceder y gestionar datos almacenados en sistemas como PostgreSQL, MySQL y SQLite. Esta capacidad de trabajar con múltiples formatos de datos facilita la integración de diferentes fuentes de información y mejora la interoperabilidad entre distintas aplicaciones y plataformas.
- Representación cartográfica: QGIS ofrece herramientas para la creación y diseño de mapas personalizados. Los usuarios pueden aplicar diferentes estilos, simbologías y etiquetas a las capas, así como ajustar la escala y la apariencia de los elementos cartográficos. QGIS también permite la creación de mapas en 3D para una visualización más inmersiva de los datos.
- Integración de datos y complementos: QGIS permite la integración de datos de diversas fuentes, incluyendo servicios web, bases de datos espaciales y servicios de mapas en línea. Además, cuenta con una amplia variedad de complementos desarrollados por la comunidad, que brindan funcionalidades adicionales y permiten ampliar las capacidades del software según las necesidades específicas del usuario.
- Compatibilidad multiplataforma: QGIS es un software multiplataforma que está disponible para Windows, macOS, Linux y otras plataformas. Esto permite a los usuarios acceder a QGIS desde diferentes sistemas operativos y trabajar de manera colaborativa en proyectos geoespaciales.

En resumen, QGIS es un software de SIG de código abierto que ofrece una amplia gama de herramientas para el análisis, visualización y gestión de datos espaciales. Su interfaz intuitiva, capacidad de análisis espacial, flexibilidad en la gestión de datos y capacidad de personalización hacen de QGIS una opción popular para profesionales y entusiastas del SIG que buscan una alternativa gratuita y de calidad para sus necesidades geoespaciales. Estas características hacen de QGIS el software adecuado para la delimitación de las líneas de costa en los distintos años que se han estudiado, así como para la cuantificación de los cambios que han sufrido estas con el paso del tiempo, permitiendo definir aquellas zonas en las que se ha producido erosión y sedimentación.



*Ilustración 3-3. Logotipo oficial del software QGIS. Fuente: Asociación de QGIS España.*

### 3.1.2.3 DELFT3D

DELFT3D es un software de modelado hidrodinámico y morfodinámico desarrollado por WL | Delft Hydraulics. Proporciona una plataforma completa y flexible para simular y analizar procesos hidráulicos y morfológicos en sistemas costeros, estuarios, ríos y lagos. Las principales características y funcionalidades del software DELFT3D son:

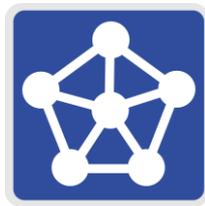
- Modelado hidrodinámico: DELFT3D permite simular el comportamiento de las corrientes de agua y los niveles de agua en diferentes cuerpos de agua. Utiliza las ecuaciones de aguas poco profundas con aproximaciones boussinesq y hidrostáticas para calcular los flujos y las variaciones en el nivel del agua. El modelo tiene en cuenta la influencia de factores como la gravedad, la presión y la fricción para determinar el movimiento y la distribución del agua.
- Modelado morfodinámico: DELFT3D también incorpora la simulación de procesos morfológicos, como la erosión, sedimentación y transporte de sedimentos. Puede predecir los cambios en la forma y elevación del lecho del agua debido a la interacción entre el agua y los sedimentos. Esto es especialmente útil para estudiar la evolución de las playas, los deltas y otros sistemas costeros.
- Flexibilidad en la configuración del modelo: DELFT3D ofrece una amplia gama de opciones de configuración para adaptarse a diferentes escenarios y objetivos de modelado. Los usuarios pueden

definir la geometría del dominio, las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales y los parámetros de simulación según sea necesario. Esto permite realizar análisis detallados y personalizados para abordar diferentes problemas hidrodinámicos y morfodinámicos.

- Acoplamiento de procesos: DELFT3D permite el acoplamiento de diferentes procesos hidrodinámicos y morfodinámicos, lo que permite la simulación de sistemas complejos y la interacción entre diferentes componentes. Por ejemplo, se pueden acoplar los modelos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos para estudiar el transporte y la deposición de sedimentos en respuesta a las corrientes de agua.
- Visualización y análisis de resultados: DELFT3D proporciona herramientas avanzadas de visualización y análisis para interpretar los resultados de la simulación. Los usuarios pueden generar mapas, gráficos y animaciones para representar los flujos de agua, los niveles de agua, los cambios en el lecho del agua y otros resultados relevantes. Esto facilita la comprensión de los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos y la comunicación de los hallazgos a los interesados.

En resumen, DELFT3D es un software de modelado hidrodinámico y morfodinámico que ofrece una amplia gama de herramientas y funcionalidades para el análisis de procesos hidrológicos y morfológicos en diferentes cuerpos de agua. Su flexibilidad, capacidad de acoplamiento de procesos y capacidades de visualización lo convierten en una herramienta poderosa para estudiar y comprender los sistemas acuáticos y costeros. Con DELFT3D, los usuarios pueden realizar análisis detallados y precisos para abordar una amplia variedad de problemas relacionados con el agua y el sedimento.

Por estas razones, este software se ha considerado como el más adecuado para la realización de un modelo numérico hidrodinámico que permita representar los patrones de sedimentación y erosión presentes en la línea de costa interior de la Isla Decepción, ya que en esta se produce la interacción entre las corrientes internas de la propia bahía, las mareas, el viento y la aportación de sedimentos de tefra en el caudal aportado por los cauces generados por el deshielo entre otros factores.



**Deltares**

*Ilustración 3-4. A la izquierda se muestra el logotipo oficial del Software DELFT3D, creado por la empresa Deltares. A la derecha se muestra el logotipo oficial de la empresa Deltares. Fuente: Deltares, 2023.*

#### **3.1.2.4 SAR, Metodología DINSAR y software SNAP ESA.**

El SAR, por sus siglas en inglés Synthetic Aperture Radar, es un sistema de radar de apertura sintética que utiliza ondas electromagnéticas para obtener imágenes de la superficie terrestre. A diferencia de las imágenes ópticas, el SAR es capaz de capturar datos incluso en condiciones climáticas adversas o durante la noche, ya que no depende de la luz solar.

El SAR emite pulsos de microondas hacia la superficie terrestre y registra la señal reflejada. La antena del radar recibe las ondas reflejadas y las registra en forma de datos. Estos datos se procesan para generar imágenes SAR, que son representaciones en escala de grises o de color de la superficie terrestre.

El DINSAR, o Diferencial de Interferometría SAR, es una técnica basada en la interferometría SAR que permite medir cambios en la superficie terrestre con una alta precisión y detección de deformaciones milimétricas. A diferencia del INSAR convencional, que utiliza pares de imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos, el DINSAR se basa en la utilización de series temporales de imágenes SAR.

El proceso de DINSAR comienza adquiriendo múltiples imágenes SAR de la misma área de estudio a lo largo de un período de tiempo. Estas imágenes se procesan y se corrigen de forma similar al INSAR convencional, eliminando el ruido y corrigiendo las distorsiones atmosféricas.

Luego, se realiza la interferometría entre las diferentes combinaciones de imágenes SAR en la serie temporal.

Esto implica comparar las fases de las ondas electromagnéticas reflejadas en cada par de imágenes y calcular la diferencia de fase correspondiente.

La diferencia de fase obtenida en cada par de imágenes se utiliza para generar interferogramas diferenciales. Estos interferogramas muestran los cambios en la distancia entre la antena del radar y la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Al combinar y analizar estos interferogramas, se pueden detectar y medir deformaciones en la superficie terrestre, como desplazamientos, subsidencias o levantamientos.

Para obtener un MDT a partir de los datos DINSAR, se aplica un proceso de desempaqueado de fases y filtrado para obtener una representación más precisa de la topografía y minimizar los errores sistemáticos.

El resultado final es un MDT que muestra la elevación y los cambios topográficos de la superficie terrestre con una alta precisión espacial y temporal. Estos MDT generados mediante DINSAR se utilizan en diversas aplicaciones, como el monitoreo de movimientos del suelo, la evaluación de riesgos geológicos, el estudio de deformaciones en estructuras, entre otros.

En resumen, el DINSAR es una técnica avanzada de interferometría SAR que permite medir cambios y deformaciones en la superficie terrestre utilizando series temporales de imágenes SAR. Al procesar y analizar estos datos, es posible generar Modelos Digitales del Terreno (MDT) precisos que proporcionan información valiosa para el estudio y monitoreo de procesos geológicos y geodinámicos.



*Ilustración 3-5. Logotipo oficial de la Agencia Espacial Europea. Fuente: ESA, 2023.*

Para realizar el procesamiento de las imágenes descargadas de la ESA Sentinel 1 se ha empleado el software SNAP ESA, que permite aplicar el procesamiento DINSAR a sus imágenes para obtener un modelo digital del terreno de ellas. El software SNAP ESA (Sentinel Application Platform) es una herramienta de procesamiento de datos de observación de la Tierra desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA). Está diseñado específicamente para trabajar con datos de las misiones satelitales Sentinel, aunque también es compatible con otros datos SAR y ópticos.

SNAP ESA proporciona una amplia gama de herramientas y algoritmos para el procesamiento, análisis y visualización de datos de teledetección. Está orientado tanto a usuarios principiantes como a profesionales avanzados en el campo de la teledetección y las ciencias de la Tierra. Algunas de las características clave del software SNAP ESA incluyen:

- Importación y visualización de datos: SNAP ESA permite importar datos de varias fuentes, incluyendo imágenes satelitales SAR y ópticas. Proporciona una interfaz gráfica intuitiva para la visualización y exploración de los datos, lo que facilita su comprensión y análisis.
- Preprocesamiento de datos: El software ofrece una amplia gama de herramientas para realizar operaciones de preprocesamiento en los datos de teledetección. Esto incluye correcciones radiométricas, correcciones geométricas, correcciones atmosféricas y calibración de imágenes.
- Análisis y procesamiento de datos: SNAP ESA ofrece una variedad de algoritmos y técnicas de procesamiento para analizar los datos de teledetección. Esto incluye el procesamiento de imágenes SAR, generación de mosaicos, clasificación de imágenes, análisis de series temporales y técnicas avanzadas como el Interferometría SAR (INSAR) y el Interferograma Diferencial SAR (DINSAR).
- Generación de productos y resultados: El software permite generar una amplia gama de productos y resultados a partir de los datos procesados. Esto incluye mapas de clasificación, mapas de cambios, mapas de desplazamiento, productos de elevación y muchos otros.
- Integración con otras herramientas y sistemas: SNAP ESA está diseñado para ser interoperable con

otras herramientas y sistemas de teledetección. Puede interactuar con software externo, como sistemas de información geográfica (SIG) y software de análisis estadístico, lo que facilita el flujo de trabajo y la integración de datos.

Como conclusión, el software SNAP ESA es una potente herramienta para el procesamiento y análisis de datos de teledetección. Proporciona una amplia gama de funcionalidades para el procesamiento de imágenes, análisis espacial y generación de productos, lo que lo convierte en una herramienta versátil y útil para diversas aplicaciones en el campo de las ciencias de la Tierra y la teledetección. Por estas razones, se ha acudido a esta metodología y este software para complementar el estudio altimétrico realizado en el presente Trabajo de Fin de Máster, aunque, tal y como se detalla posteriormente, no ha sido posible conseguir resultados coherentes que permitan obtener conclusiones concisas entre los MDT generados a partir de las escenas que han sido procesadas procedentes de la ESA Sentinel 1

## 3.2 Estudio Altimétrico

El segundo apartado de este capítulo se centra en la exposición de la metodología seguida para la obtención de los resultados derivados de la realización del estudio altimétrico de la Isla Decepción a partir de los datos disponibles de los modelos digitales de elevación del terreno.

Se divide a su vez en dos subapartados, el primero de ellos denominado “Estudio altimétrico en SIG”, que se centra en detallar la metodología seguida para el procesamiento de los datos y la obtención de resultados mediante la aplicación de softwares SIG, y un segundo subapartado denominado “Estudio DINSAR” en el que se expone la metodología para obtener los MDE a partir de imágenes RADAR.

### 3.2.1 Estudio altimétrico en SIG

El estudio altimétrico, tal y como se ha introducido en el apartado anterior, se desarrolló en un entorno de SIG (Sistema de Información Geográfica). Dentro de este entorno, para la obtención de resultados derivados de los modelos digitales de elevación del terreno, se ha seguido una metodología basada principalmente en la comparación de archivos ráster con la misma resolución espacial y sistema de referencia, así como estudios espacio-temporales basados en el formato NetCDF, del que se han podido obtener tendencias con significancia estadística. Además, se ha llevado a cabo el análisis de pendientes de rango, la delimitación de cuencas internas y la digitalización de las plumas sedimentarias.

Se han calculado las diferencias entre los últimos MDE (con una resolución espacial de 2 metros) posteriores al último evento volcánico junto a un análisis espacio-temporal desde el año 1956 en intervalos de un año.

Para la obtención de las diferencias entre estos modelos digitales de elevaciones, en primer lugar, se han tratado los valores del MDE proporcionado por el REMA para obtener valores coherentes en estas diferencias, ya que este MDE no tenía aplicada su corrección por altura elipsoidal, rebajando sus valores 20 metros.

Posteriormente, se ha empleado la herramienta “Calculadora ráster” que dispone el software ARCGIS Pro para la obtención de las diferencias entre los modelos digitales de elevación del terreno, siendo este el software empleado para la realización de aquellos los procesos relacionados con el estudio altimétrico en el entorno SIG. Las diferencias temporales desde el último evento eruptivo registrado se muestran en el apartado 4.1.1, y abarcan más de 20 años.

Se ha encontrado el inconveniente de que, tal y como se comenta en el mapa del CGE [29], el área nevada es complicada de posicionar altiméricamente en el proceso fotogramétrico, ya que debido a que la isla se encuentra congelada completamente durante 9 meses al año, y al sufrir deshielo hay ciertas zonas condicionadas a este proceso para mostrar su altura real. Esto genera ciertas discrepancias con otros modelos. Para evaluar las diferencias, estas se han clasificado utilizando rangos de pendientes adecuados para definir las diferentes geomorfologías de la cuenca de Port Foster, incluyéndose la representación de esta clasificación en el apartado 4.1.1.

Tras obtener las diferencias entre los MDE mencionados, se ha llevado a cabo la realización de un análisis temporal de los datos mediante la definición estructuras de datos NetCDF agrupando puntos en celdas espacio-temporales para determinar con significancia estadística la tendencia de cada celda. Para el montaje del cubo espacio temporal y la obtención de su estadística se han empleado las herramientas de geoprocésamiento *Create*

*Space time cube by aggregating points y Visualize space time cube in 3D* del software ARCGIS Pro.

En el análisis espacio-temporal se ha introducido un MDE con una resolución 50x50 metros utilizando una técnica cúbica para disminuir el error planimétrico. El cubo espacio-temporal ha agrupado 71 359 puntos en 46 368 ubicaciones de cuadrícula a intervalos de paso de un año. El período de tiempo completo cubierto por el cubo espacio-temporal es de 65 años. De las 46 368 ubicaciones totales, 17 985 (38.79%) contienen al menos un punto para al menos un intervalo de paso de tiempo. Los resultados derivados de este estudio se exponen, nuevamente, en el apartado 4.1.1.

En el año 2006, se midieron 27 puntos con un GPS diferencial subdecimétrico para definir las características dimensionales de los cráteres de 1970 (se pueden identificar los cráteres en la *Zona a* en la Ilustración 1-1 (b) y en la Ilustración 1-4 (a.1 y a.2)). Estas nuevas mediciones y el mapa proporcionado por el CGE fueron evaluados en [17] y se obtuvieron profundidades medias entre 13 y 38 metros. En dicho artículo, se obtuvieron tasas de relleno de hasta 1.5 metros por año en el fondo de los cráteres.

En el presente Trabajo de Fin de Máster, estas mediciones han sido comparadas con el MDE proporcionado por el REMA tras realizar la corrección por la altura del geoide con el objetivo de confirmar si la tendencia estimada en dicho artículo se ha cumplido y, efectivamente, dichos cráteres han evolucionado conforme a la predicción. Los resultados obtenidos de las diferencias en las alturas elipsoidales de los cráteres se exponen en el capítulo 4, junto al resto de resultados pertenecientes al Estudio altimétrico en entorno SIG.

### 3.2.2 Estudio DINSAR

Tal y como se ha introducido en el apartado 3.1.2.4, se ha aplicado la metodología DINSAR a 61 escenas tomadas por parte del satélite Sentinel 1 perteneciente a la ESA, entre los años 2014 y 2022. Sin embargo, la aplicación de esta metodología no proporcionó resultados exitosos.

Para la obtención de los modelos digitales de elevación del terreno a partir del software SNAP ESA aplicando la metodología DINSAR se ha seguido la siguiente metodología:

- Importación de datos: En primer lugar, se han importado las imágenes del Sentinel-1 al software SNAP ESA.
- Preprocesamiento: En segundo lugar, se ha realizado el preprocesamiento de las imágenes SAR para corregir las posibles imperfecciones o artefactos existentes en las imágenes. Esto incluye la corrección radiométrica, la corrección geométrica y la eliminación de ruido.
- Generación de interferogramas: Posteriormente, se han generado interferogramas a partir de las imágenes SAR mediante la aplicación de la interferometría SAR. Los interferogramas representan las diferencias de fase entre dos imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos en el tiempo.
- Corrección atmosférica: En cuarto lugar, se aplica la corrección atmosférica sobre los interferogramas, eliminando así los efectos atmosféricos presentes en estos. Esto implica que se han corregido las contribuciones de la atmósfera a las diferencias de fase observadas.
- Filtrado: Posteriormente, se ha aplicado un filtrado para eliminar el ruido y las interferencias no deseadas en los interferogramas. Esto ayuda a mejorar la calidad y precisión de los resultados.
- Desplazamiento de fase: Se calculan los desplazamientos de fase a partir de los interferogramas, que están relacionados con los cambios topográficos entre las dos adquisiciones de imágenes. Estos desplazamientos de fase se han utilizado para inferir la elevación del terreno.
- Corrección de errores sistemáticos: Aplicaría correcciones adicionales para eliminar errores sistemáticos, como los errores relacionados con el movimiento del sensor o las variaciones en la órbita del satélite.
- Generación del MDT: Finalmente, se han utilizado los desplazamientos de fase calculados para generar un modelo digital del terreno (MDT) que represente la elevación del terreno en función de la posición geográfica.

De las 61 escenas procesadas, se han dado por buenos 6 modelos digitales del terreno, creados a partir de imágenes tomadas entre enero del año 2017 y marzo del año 2022. A estos modelos digitales del terreno se le ha aplicado nuevamente un procesamiento para poder conocer las diferencias que presentan sus valores entre sí.

Para ello, se unieron las bandas de las 6 capas correctas en una única capa y se han obtenido las estadísticas de estas para comprobar la media, la desviación estándar, la desviación típica y la coherencia entre sus valores. Los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 4, en su apartado 4.1.2 Estudio DINSAR

### 3.3 Estudio batimétrico

El estudio altimétrico, tal y como se ha introducido en el apartado anterior, se desarrolló en un entorno de SIG (Sistema de Información Geográfica). Dentro de este entorno, se ha seguido una metodología basada principalmente en la comparación de las batimetrías disponibles con la misma resolución espacial y sistema de referencia, y la realización de dos estudios espacio-temporales basados en el formato NetCDF, del que se han obtenido tendencias con significancia estadística.

Para el cálculo de las diferencias existentes entre las batimetrías analizadas, se ha empleado de nuevo la herramienta “Calculadora ráster” que dispone el software ARCGIS Pro, siendo este el software empleado para la realización del procesamiento de datos del estudio batimétrico en el entorno SIG.

Dentro de la metodología seguida para el procesamiento de los datos disponibles y alcanzar resultados evaluables, dado que los datos de las batimetrías disponibles se proporcionan como nubes de puntos, el primer proceso realizado es la transformación de dichos puntos que definen las batimetrías a un archivo ráster, que hará más manejables sus datos. El archivo ráster de salida se ha preparado para que disponga un tamaño de celda de 20x20 metros, asignando a los valores próximos no definidos un valor medio para su profundidad. Este proceso se ha aplicado a las batimetrías del IHM y del SIMAC (10x10 m). Además, debe mencionarse que la batimetría del IHM se compone de varias expediciones, siendo su batimetría composición de expediciones datadas en el año 2012 y 2016.

Dado que la información proporcionada por el IHM se encuentra en un sistema de referencia distinto, previamente se ha re proyectado al sistema de referencia que se está empleando en este Trabajo, WGS 84 / UTM Zona 20 N.

Tras dichos procesos, se han aplicado otras técnicas de geoprocésamiento de ráster para poder evaluar ambas batimetrías. La batimetría del IHM ha necesitado de un ajuste altimétrico, ya que se supone que posiblemente se haya tomado la altura elipsoidal en vez de la altura ortométrica, ya que se han observado diferencias del orden de 29 metros con sus curvas de nivel, siendo 20 metros el valor de la ondulación en la zona de estudio, y con el que aparentemente cuadran las curvas de nivel.

Ambas batimetrías no estaban corregidas por altura de marea, por lo que se ha procedido a dejar un rango de límite de error en función de dicha máxima-mínima carrera de mareas, que es de aproximadamente 2 metros en el caso de la máxima y de 0.80 metros en el caso de la mínima.

Tras ello, se ha procedido a realizar la comparativa batimétrica entre las batimetrías correspondientes al año 1991 y 2012-2016 respectivamente, así como la batimetría obtenida del valor promedio de los datos medidos por el MDGS entre los años 2000 y 2009.

Para la obtención de las diferencias entre los batimetrías se han tomado celdas de 20 metros de tamaño para eliminar así el error posicional y de altura, que es de 5 metros y 0.5 metros más un 1% en profundidad para el caso del IHM, y del 5 metros y 3-4 metros respectivamente para la batimetría del CGE.

Las diferencias estadísticas se han calculado utilizando la misma resolución espacial de 50 m en las tres batimetrías internas, siendo estas las denominadas Batimetría CGE (1991), Batimetría media MGDS (2000-2009) y Batimetría IHM (2012-2016) en la Tabla 2-4.

El resultado obtenido de las diferencias entre las batimetrías se expone en el capítulo 4, en su apartado 4.2, y abarcan más de 20 años. Estas diferencias se clasificaron utilizando rangos de pendiente adecuados para definir la diferente geomorfología de la bahía.

En cuanto al análisis espacio-temporal realizado, se han definido dos estructuras de datos NetCDF agrupando puntos en celdas espacio-temporales para determinar con significancia estadística la tendencia de cada celda. Los dos grupos de datos fueron:

- Únicamente datos procedentes del MGDS (19-11-2000 al 29-03-2009), en un estudio de 1 mes y una resolución espacial de 200 m.

- Todos los datos batimétricos (01-01-1990 al 01-01-2012) en un estudio de 3 meses para agrupar los datos del verano austral.

Se han tratado cruceros entre el año 2000 y 2009, limpiando sus datos anómalos y creando un cubo temporal con más de 17 000 puntos, definiendo un valor medio como el año 2005.

Para realizar este procesamiento, se ha realizado primeramente la unión de las capas para, posteriormente realizar la limpieza de los valores anómalos con el uso de herramientas de geoprocésamiento, siendo: puntos a ráster, con una desviación estándar a celdas de 100 metros, y la creación de un TIN mediante el uso de *Locate Outliner*.

Finalmente, se han creado los dos cubos espacio-temporales a partir de los puntos válidos, primero con los correspondientes únicamente a cruceros del MGDS y, posteriormente, con el agrupamiento de los puntos de las otras dos batimetrías (CGE e IHM) mediante el empleo de la herramienta *Create Space Time Cube By Aggregating Points*.

Los resultados obtenidos de los cubos espacio-temporales se describen y representan en el apartado 4.2 del cuarto capítulo.

### 3.4 Estudio de los cambios visuales en la línea de costa

El cuarto apartado de este tercer capítulo del Trabajo de Fin de Máster se destina a la exposición de la metodología seguida para la obtención de los resultados correspondientes al estudio de cambios visuales de la línea de costa y sus zonas anexas.

Tal y como se ha detallado en el segundo capítulo (2 Datos de Partida) de este Trabajo, la digitalización de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción en diversos años implicó realizar el análisis de las ortofotos disponibles en las cuales se puede apreciar con un grado de detalle correcto, aunque aproximado, el contorno de la línea de costa interior de la Isla Decepción. Estas ortofotos son las correspondientes a los años 1968, 2003 y 2020.

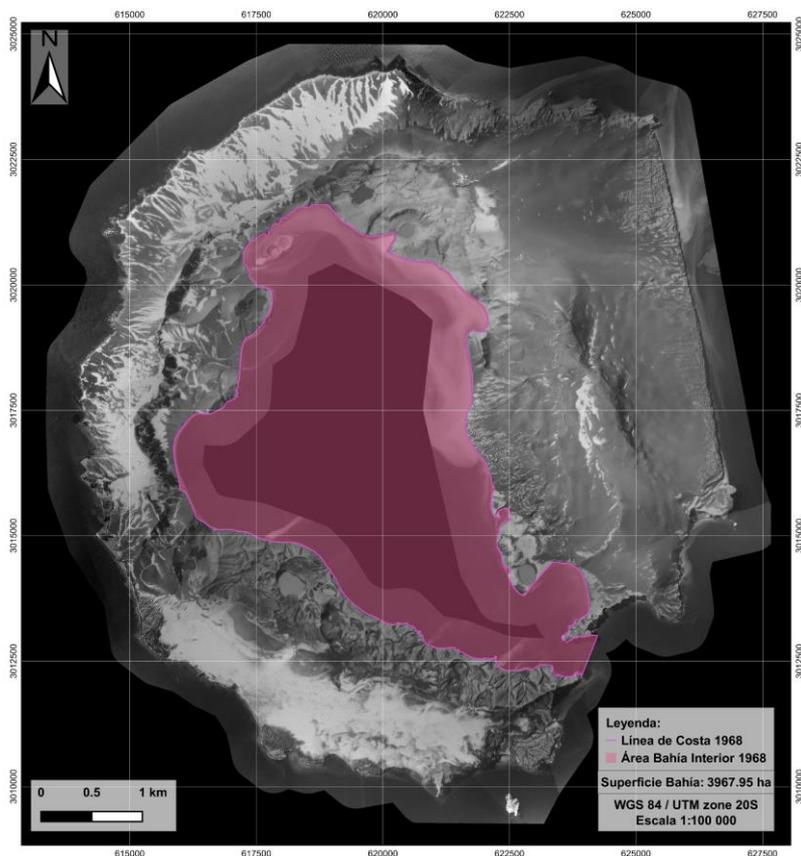
Para su delineación, mediante interpretación visual, se crearon archivos shape lineales que representan la línea de costa en cada uno de los años observados, centrándose principalmente en identificar aquellos cambios en la línea de costa producidos por la erosión o sedimentación desde que se produjeron los últimos fenómenos eruptivos de la isla. Las líneas de costa delineadas, correspondientes a los años 1968, 1970, 2003 y 2020 se representan gráficamente en las ilustraciones Ilustración 2-3, Ilustración 2-4 e Ilustración 2-5.

Además, la identificación de las plumas de sedimentos en las ortofotos facilitaron el poder realizar la delineación de las líneas de costa con una mayor precisión (en la Ilustración 4-3 (d) se representan las plumas de sedimentos). La pluma de sedimentos se refiere a la nube visible de partículas de sedimento suspendidas en el agua que son transportadas por las corrientes y las mareas. Esta pluma de sedimentos puede inducir al error en la delineación de las líneas de costa, ya que, debido a la poca visibilidad disponible en las ortofotos para ciertas zonas de la isla debido a las nubes, pueden generar incertidumbre entre si es parte de la costa o simplemente es la nube de partículas arrastrada por las mareas. Tras diferenciar esta pluma de sedimentos de la línea de costa real en cada año, las líneas de costa que se han digitalizado reflejan con mayor precisión la línea de costa real y los cambios que han ocurrido a lo largo del tiempo, aunque en ciertas zonas de la isla, tal y como se ha mencionado anteriormente, su delineación se centra en la representación de los cambios más significativos o en representar el retroceso de los taludes inmediatamente anteriores a esta línea de costa en ciertas áreas de la isla (por ejemplo, las bases española y argentina en el sur de la isla).

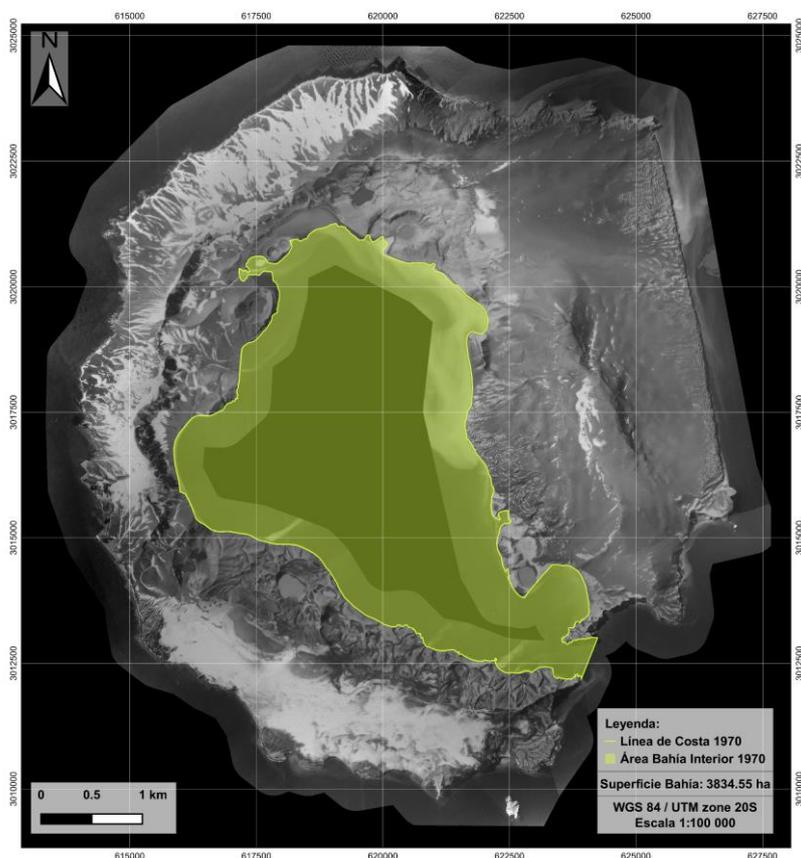
Todo lo mencionado permite asegurar que la comparación visual de los cambios en la línea de costa obtenidos a partir de los shapefiles generados se alinee realmente con los cambios que han ocurrido en la bahía interna de la Isla Decepción.

A partir de estos shapefiles lineales, se han generado shapefiles poligonales que representan la superficie de agua ocupada por la bahía interior en los años correspondientes a cada línea de costa. Esto permite realizar la comparación entre las áreas ocupadas por la bahía interior en los distintos años analizados e intuir cuales procesos dominan la evolución morfodinámica de la bahía interior de la isla.

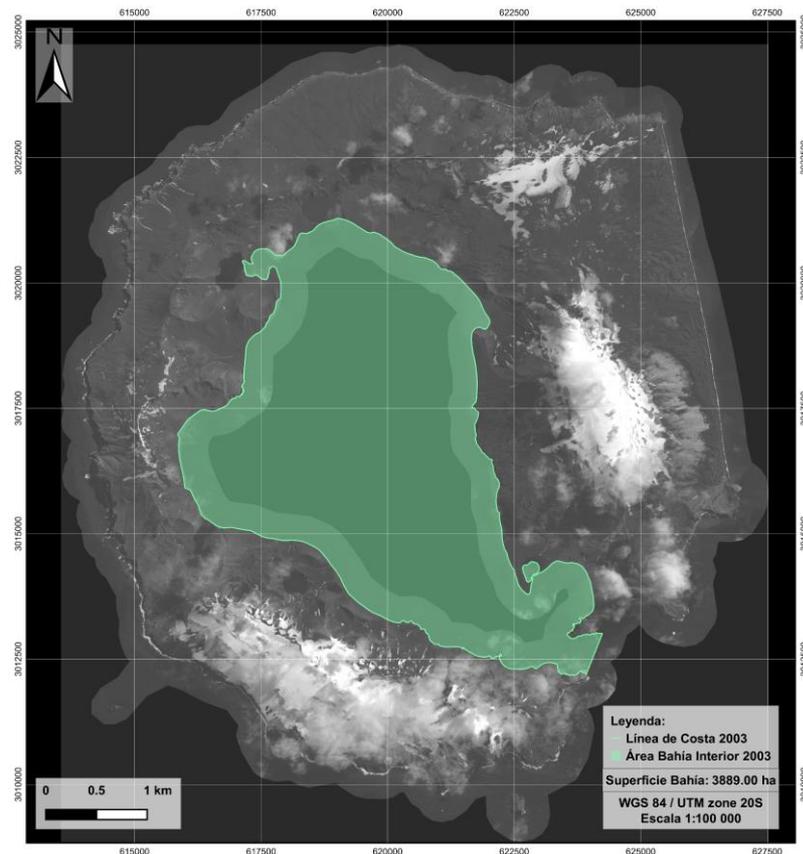
En las siguientes ilustraciones (Ilustración 3-6, Ilustración 3-7, Ilustración 3-8, Ilustración 3-9) se representa la superficie ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción junto a su área en hectáreas en los años expuestos.



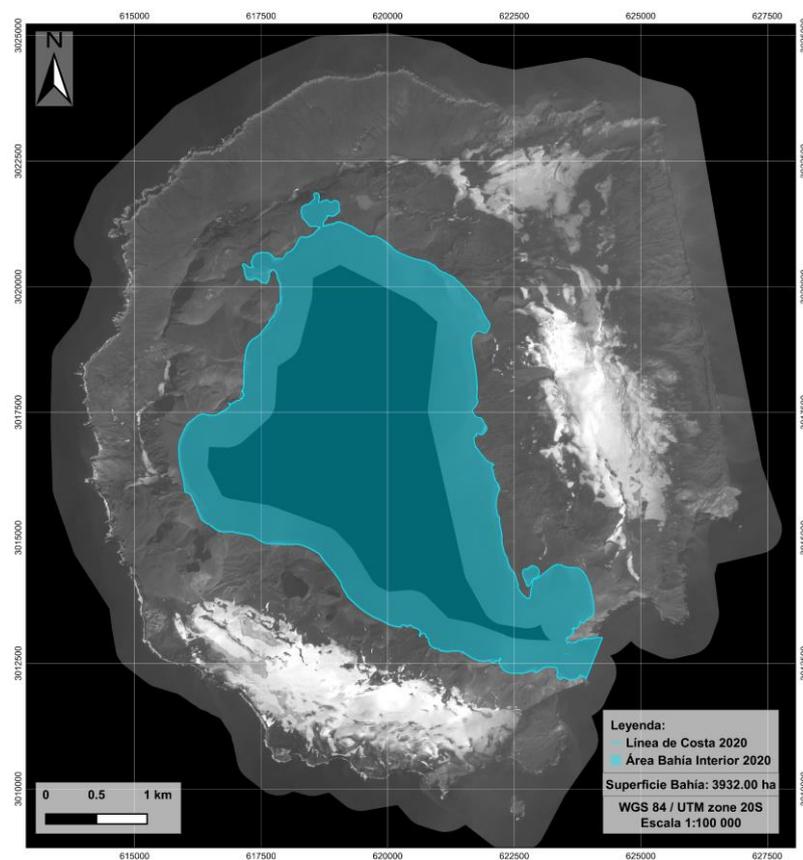
**Ilustración 3-6.** Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 1968 sobre la ortofoto a este mismo año. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35].



**Ilustración 3-7.** Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 1970 sobre la ortofoto del año 1968. Fuente de los datos: Elaboración propia, SHNA [26] y SIMAC [35].



**Ilustración 3-8.** Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 2003 sobre la ortofoto QuickBird de este mismo año. Fuente de los datos: Elaboración propia, QB y CGE [25].



**Ilustración 3-9.** Representación del área ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en el año 2020 sobre la ortofoto K3. Fuente de los datos: Elaboración propia y K3 [26].

La simple observación de las formas generadas y de la superficie ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción en las ilustraciones expuestas permite intuir que se han producido cambios significativos desde que se produjeran los últimos procesos eruptivos en esta isla, así como qué zonas son aquellas que mayor transformación morfológica sufre debido a la interacción del deshielo, transporte de sedimentos y corrientes internas de la bahía.

En el año 1968, año correspondiente a las últimas erupciones registradas, se ha obtenido una superficie ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción de 3 967.95 hectáreas, mientras que para el año 1970 se ha obtenido una superficie de 3 834.55 ha, lo que implica una reducción de la superficie de la bahía interior de 133.4 ha, que es lo mismo que una reducción del 3.36% del área ocupada por la bahía interior, resultado de la sedimentación de gran parte del material aportado por estas erupciones, especialmente en el norte de la isla.

En el año 2003, siendo este el primer año analizado tras la finalización de los procesos eruptivos, se ha obtenido que la superficie ocupada por la bahía interior de la Isla Decepción es de 3889.00 ha, lo que supone un incremento de la superficie ocupada del 1.42% respecto al año 1970. En el año 2020, la superficie obtenida ha sido de 3932.00 ha, correspondiente a un incremento de la superficie ocupada por la bahía interior del 1.10% respecto del año 2003 y del 2.54% respecto del año 1970.

Estos valores muestran una clara tendencia de erosión del contorno interior de la Isla Decepción desde que finalizaran las erupciones de finales de los años 60, en las que, tal y como se ha mencionado al comparar las superficies ocupadas por la bahía interior entre los 1968 y 1970, la bahía sufrió un aumento de su costa gracias a la aportación de estas erupciones, sin haber alcanzado aun el área originalmente ocupada en el primer instante analizado.

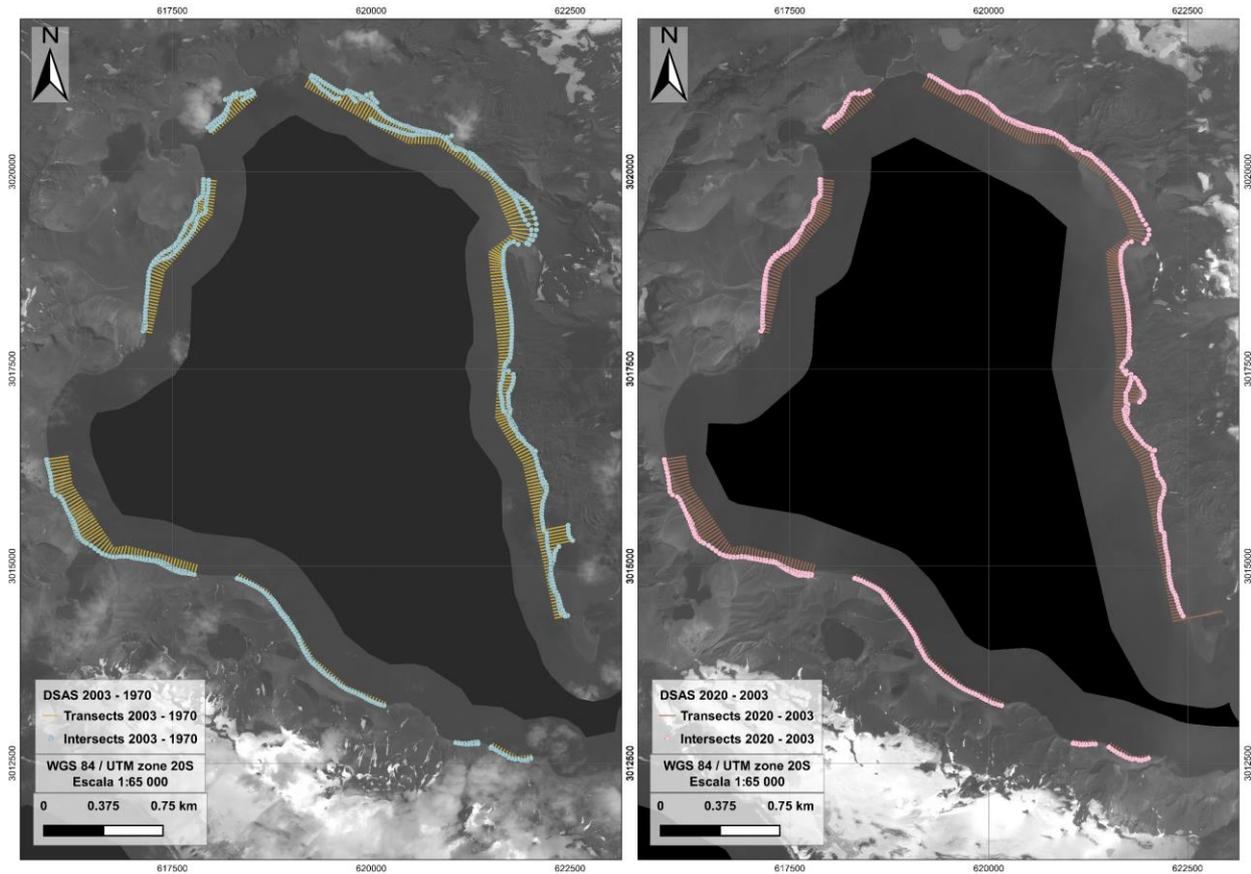
Tras la obtención de los polígonos que representan la superficie ocupada por la bahía interior, se ha realizado la diferencia entre estas superficies mediante el empleo de herramientas de geoprocésamiento disponibles en QGIS, concretamente la herramienta “diferencia simétrica” empleada para archivos vectoriales, y se han obtenido polígonos cuya superficie es la superficie diferencial entre los distintos años observados, permitiendo conocer que áreas de la bahía interior de la Isla Decepción han sufrido erosión o sedimentación entre el año 1968 y el año 2020 (año más reciente estudiado). Los resultados en los que se define el área de la costa de la bahía interior ha sufrido erosión o sedimentación en los distintos años analizados se exponen en el capítulo 4 Resultados.

Para finalizar el estudio correspondiente al análisis visual de los cambios que se han producido en el contorno interior de la Isla Decepción, próximo a la línea de costa, se ha aplicado la extensión DSAS creado por el USGS preparado para emplearlo en el software ARCGIS.

DSAS es una herramienta poderosa diseñada específicamente para el análisis y monitoreo de líneas de costa utilizando datos geoespaciales. Tal y como se ha mencionado, la extensión DSAS se integra con software de SIG, como ArcGIS, para proporcionar una amplia gama de funcionalidades para el análisis de líneas de costa. Concretamente, se ha empleado esta extensión para calcular la variación en la posición de la línea de costa a lo largo del tiempo, junto a la tasa de erosión o sedimentación, y la identificación de áreas vulnerables, ya que DSAS proporciona herramientas para realizar análisis temporales de líneas de costa, lo que permite visualizar y evaluar los cambios a lo largo del tiempo.

De su aplicación, se han obtenido los ratios de retroceso/acreción de la línea de costa en ciertas ubicaciones concretas, descartando así las zonas que han presentado menores variaciones en su posición tras la realización del estudio de cambios visuales anterior. Se han obtenido las tasas de erosión/sedimentación derivados de comparar las líneas de costa del año 1970, 2003 y 2020. Los resultados derivados de esta aplicación se exponen en el capítulo 4, en su apartado 4.3 Cambios en la línea de costa.

En la Ilustración 3-10 se muestran los perfiles y los puntos de intersección implementados en el módulo DSAS para que este realice la evaluación de los cambios sufridos por las líneas de costa delineadas correspondientes a los años 1970-2003 y 2003-2020.



*Ilustración 3-10. Representación de los perfiles y puntos de intersección implementados en el módulo DSAS para el estudio de los cambios visuales de las líneas de costa entre los años 1970-2003 y 2003-2020.*

## 3.5 Modelo DELFT 3D

En el quinto y último apartado de este tercer capítulo, se detalla el proceso de generación del modelo numérico que se ha implementado en el software DELFT3D, cuyo objetivo es representar la erosión/sedimentación de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción tras la simulación de un periodo temporal de un año.

### 3.5.1 Descripción del Modelo

El software utilizado para la realización de este estudio ha sido DELFT3D, desarrollado por WL|Delft Hydraulics, y se implementó en una configuración 2D (promediada en profundidad). Este modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras con aproximaciones de Boussinesq e hidrostáticas [39]. La ecuación de continuidad asume un flujo incompresible y se define como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = Q$$

donde  $u$  y  $v$  son las componentes de las velocidades en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente, y  $Q$  indica el transporte de masa por unidad de área.

Además, las ecuaciones de momento se describen como:

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{1}{\rho_0} P_x + F_x + M_x + fv$$

y

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho_0} P_y + F_y + M_y + fu$$

donde  $t$  es el tiempo,  $\rho_0$  es la densidad de referencia del agua,  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $P_x$  y  $P_y$  representan los gradientes de presión en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente (incluyendo términos barotrópicos y baroclínicos),  $F_x$  y  $F_y$  son el tensor de Reynolds horizontal en ambas direcciones, y finalmente,  $M_x$  y  $M_y$  representan las contribuciones debidas a fuentes externas, como la acción del viento en la superficie libre o la acción de las olas en la columna de agua.

El modelo también incorpora ecuaciones de evolución morfodinámica, que calculan el transporte total como la suma de los transportes de carga de fondo y de carga en suspensión. Estas tasas de transporte se obtienen utilizando la ecuación de advección-difusión integrada en profundidad [40] para diferentes fracciones de sedimento, que pueden ser cohesivas o no cohesivas y se definen en función de sus densidades y tamaños. El cálculo de la tensión de corte en el lecho utiliza el predictor de rugosidad de [41]. El nivel del lecho se actualiza durante cada paso de tiempo del cálculo del flujo, teniendo en cuenta el intercambio con el transporte de sedimento en suspensión y el gradiente de transporte de carga de fondo.

### 3.5.2 Datos del modelo

El dominio del modelo se ha definido como una malla computacional curvilínea, con un total de  $731 \times 731$  celdas y una resolución máxima de  $15 \times 10 \text{ m}^2$  dentro de la Isla Decepción. Es importante el definir la zona de estudio pues el programa necesitará saber los límites en los que simular. Cuanto mayor sea la zona escogida y mayor definición disponga el mallado, mayor será el tiempo de simulación, por lo que es un punto determinante a tener en cuenta.

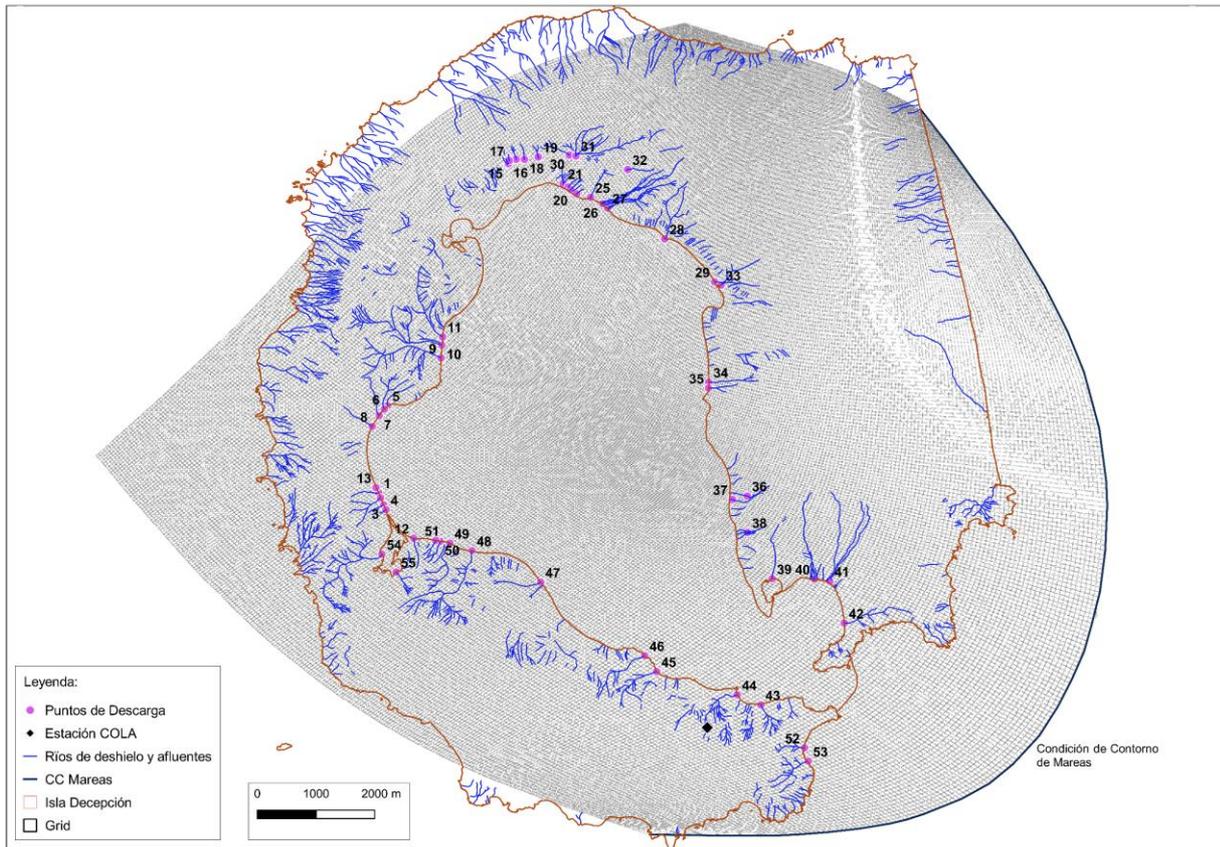
La condición inicial de la simulación fue el valor obtenido mediante mediciones de campo durante las campañas de campo realizadas en 2012 (para más detalles de las campañas de campo, se puede consultar la referencia [21]), que corresponde con un valor de 1.68 metros, evitando un arranque en frío.

La batimetría de la bahía interior utilizada en el modelo fue la correspondiente al CGE (Batimetría CGE en la Tabla 2-4). La incorporación de la batimetría al modelo es fundamental para que cada punto de la malla disponga de una coordenada  $Z$ .

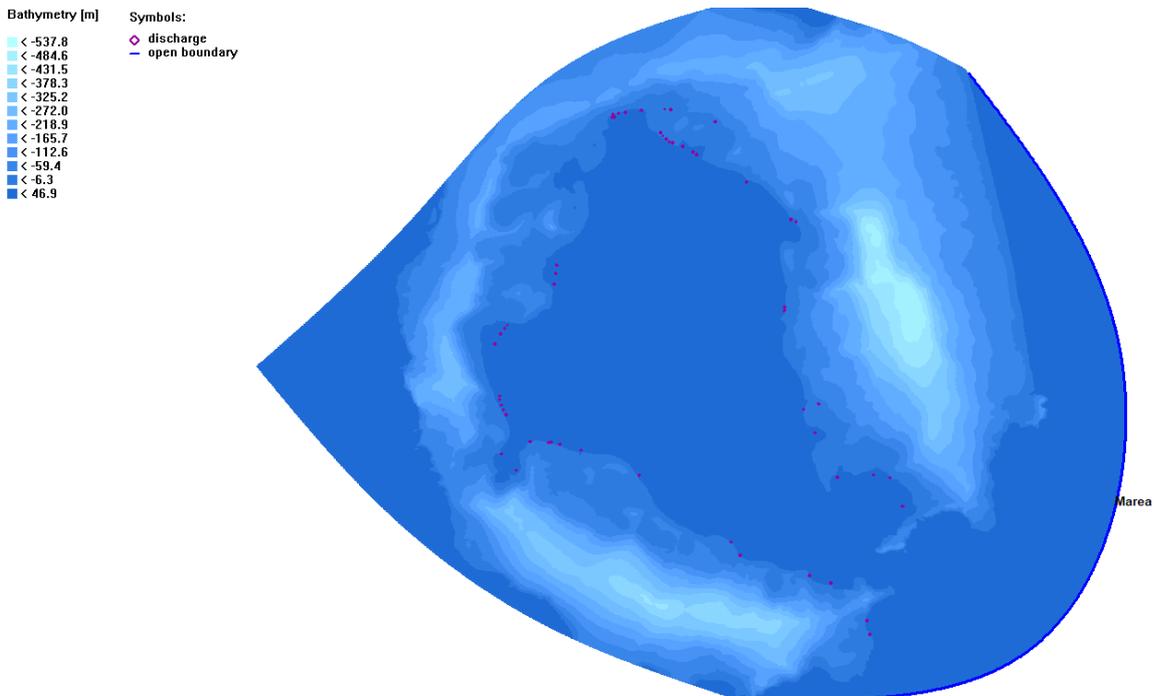
Por otro lado, la batimetría empleada para representar el mar en el exterior de la isla, representando así las áreas más allá de la línea de costa, fue la Batimetría *Externo South Shetlands* (Tabla 2-4). La línea de costa representada en el modelo corresponde a la Línea de Costa del año 2003 (Tabla 2-2). Estos datos de línea de costa se utilizan para representar con precisión la línea de costa en el modelo y garantizar la consistencia con las condiciones observadas en 2003. En la Ilustración 3-12 pueden apreciarse la batimetría general que dispondrá el modelo implementado.

En la Ilustración 3-11 se muestra la malla o *grid* definida en el modelo. Junto a ella, se representan las condiciones de contorno empleadas para las mareas y otros elementos del modelo que posteriormente se detallarán (puntos de descarga, arroyos y estación COLA).

Tras haber definido la zona de estudio y su batimetría, se han definido en el modelo las características de la simulación. Para este modelo se ha empleado el módulo Flow (aguas someras) de este software. Dentro de este módulo se han indicado los parámetros que definen el modelo, como es el tiempo de simulación, el time step o tiempo de paso, los agentes externos que participan en el modelo, las condiciones iniciales, las condiciones de contorno, los parámetros físicos y numéricos y los puntos de descarga.



*Ilustración 3-11. Grid generado para el modelo junto a los puntos de descarga generados, la estación COLA, los cauces generados por el deshielo junto a sus afluentes y la condición de contorno implementada para mareas.*



*Ilustración 3-12. Representación de la batimetría junto a los puntos de descarga introducidos en el modelo implementado dentro del entorno de DELFT3D.*

La condición de contorno de mareas se incorporan en el modelo para simular la influencia de las mareas en los niveles de agua y corrientes dentro del dominio. Estas condiciones de contorno representan la fluctuación de los niveles del mar causada por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol. Al incluir las condiciones de contorno de marea, el modelo puede simular con precisión las variaciones de marea y su impacto en el área de estudio.

Las condiciones de contorno (Condiciones de Contorno de Marea en la Ilustración 3-11) de la superficie libre se rigen por los 9 componentes astronómicos principales [42], que son: M2, K1, O1, S2, P1, Q1, K2, N2 y MF, obtenidos a partir de datos observados durante las encuestas de campo [31] [43] [32]. Las condiciones de viento y presión atmosférica con intervalos de 1 hora se obtuvieron de una estación meteorológica durante la misma encuesta de nivel de marea [31] [32] y se introdujeron con un valor constante para toda la malla.

Al igual que en estudios anteriores [39] [44] [45] [46] [47], se encontró que el módulo morfodinámico es muy sensible al diámetro medio del sedimento. De acuerdo con los datos proporcionados por las encuestas de campo desarrolladas en el área [48], se definió un solo sedimento, con características similares al limo debido a su predominio en el 85% de la isla [49]. De acuerdo con trabajos previos [50], los factores de transporte de sedimento en suspensión y carga de lecho suspendido se definieron como 1 y 0.5, respectivamente. Teniendo en cuenta las limitaciones numéricas del modelo (número de Courant), se definió el paso de tiempo como 0.1 min.

Los arroyos de deshielo se forman a partir del derretimiento de la nieve y los glaciares en la Isla Decepción. Estos arroyos contribuyen al transporte hidrodinámico dentro de Port Foster y desempeñan un papel fundamental en los cambios geomorfológicos de la isla. El material piroclástico no consolidado resultante de las erupciones volcánicas es desplazado por estos arroyos que se conforman, lo que provoca modificaciones apreciables en la línea de costa con una periodicidad anual.

Los arroyos formados por el derretimiento de la nieve y los glaciares transportan sedimentos y material erosionado desde las laderas de la isla hacia el interior de la bahía. A medida que estos arroyos fluyen hacia Port Foster, contribuyen al relleno de la bahía y pueden crear nuevas aberturas o canales. Por ejemplo, la apertura de "Lago Escondido" o del Lago Kroner son resultado de la interacción de los cauces del deshielo junto a las corrientes internas de la propia bahía.

El transporte hidrodinámico dentro de Port Foster, impulsado por los arroyos de deshielo, puede causar sedimentación y erosión en diferentes áreas. El relleno de los cráteres del año 1970 indica la deposición de sedimentos volcánicos transportados por estos arroyos. Además, el retroceso del Glaciar Negro, así como los cambios en la línea de costa, pueden estar influenciados por estos procesos hidrodinámicos impulsados por los arroyos de deshielo.

En general, los arroyos de deshielo en la Isla Decepción contribuyen a los cambios geomorfológicos de las áreas costeras, impactando la línea de costa, los patrones de sedimentación y el paisaje general de la isla. Es por ello, que se considera fundamental incorporar estas aportaciones al modelo hidrodinámico que se realiza en DELFT3D.

Dado que no se dispone de datos de campo sobre los flujos reales de los ríos resultantes del deshielo de la nieve, se estimaron los flujos de los ríos en función de la longitud de los diferentes cursos principales de agua identificados y el número de afluentes de cada uno de estos cursos de agua, desde su nacimiento hasta el punto de descarga indicado. En la Ilustración 3-11 se representa la ubicación de todos los puntos de descarga identificados y que han sido incorporados al modelo.

Dado que no se conoce una fórmula experimental única para estimar el flujo derivado del deshielo de la nieve, se ha desarrollado una fórmula propia cuyo fin es el de clasificar los ríos según una serie de criterios que permitiera estimar su flujo y ubicarlo en el rango de 10 a 100 l/s, que se ha considerado adecuado. La fórmula utilizada para determinar el caudal en los arroyos generados por el deshielo es la siguiente:

$$0.01 \left(\frac{l}{s}\right) * Entidad + \frac{\left(0.01 \left(\frac{l}{s}\right) * n^{\circ} afluentes\right)}{2}$$

En esta fórmula, "Entidad" es un valor entre 1 y 5, que depende de la longitud total de los ríos principales hasta el punto de descarga. El número de afluentes varía en cada río, contabilizando los afluentes con una longitud mínima apreciable y despreciando aquellos que no tengan prácticamente longitud como para realizar una gran

aportación. El flujo mínimo asignado tras aplicar esta fórmula a los ríos evaluados fue de 10 l/s y el máximo de 95 l/s.

Para transformar el flujo resultante a caudal por deshielo de la nieve, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q_{deshielo} \left( \frac{l}{s} \right) = Q_{medido} \left( \frac{l}{s} \right) \cdot 1000 \cdot \text{area cuenca (ha)}$$

Las descargas de los ríos se han incorporado al modelo únicamente durante tres meses al año (enero, febrero y marzo), de manera que se consiga simular la situación más próxima a la real posible del deshielo de la nieve en la Isla Decepción, ya que esta se encuentra congelada durante el resto de meses del año. Esto permite que durante dichos meses se incorpore al modelo la aportación de estos sedimentos ( $4 \text{ kg/m}^3$  constante en los arroyos), y que posteriormente queden en el modelo para que las propias corrientes internas de la isla puedan desplazarlos sin que haya mayor aportación, lo que proporcionará datos de la erosión o sedimentación de la costa interna de la isla.

En la siguiente tabla, Tabla 3-1, se muestran los valores proporcionados a cada uno de los puntos de descargas incluidos al modelo en base a los criterios que se han definido en las fórmulas anteriores, representando cada punto uno de los arroyos principales que se han identificado, y que también pueden verse representados junto a los puntos de descarga en la Ilustración 3-11.

**Tabla 3-1. Características de los arroyos generados por el deshielo y sus puntos de descarga introducidos al modelo hidrodinámico realizado en DELFT3D.**

Id	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Afluentes	Ubicación	Entidad
1	0.02	0	Base Argentina	2
2	0.04	2	Base Argentina	3
3	0.025	1	Base Argentina	2
4	0.01	0	Base Argentina	1
5	0.02	0	Oeste	2
6	0.045	3	Oeste	3
7	0.03	0	Oeste	3
8	0.02	0	Oeste	2
9	0.085	9	Oeste	4
10	0.09	10	Oeste	4
11	0.08	8	Oeste	4
12	0.02	0	Base Argentina	2
13	0.02	0	Oeste	2
14	0.03	2	Lago	2
15	0.01	0	Lago	1
16	0.01	0	Lago	1
17	0.01	0	Lago	1
18	0.02	0	Lago	2
19	0.03	2	Lago	2
20	0.01	0	Lago	1
21	0.035	3	Lago	2
22	0.01	0	Lago	1
23	0.02	0	Lago	2
24	0.01	0	Lago	1
25	0.04	2	Lago	3
26	0.075	5	Norte	5
27	0.075	5	Norte	5
28	0.055	3	Noreste	4

---

29	0.055	5	Noreste	3
30	0.03	2	Crater_70	2
31	0.065	3	Crater_70	5
32	0.01	0	Crater_70	1
33	0.03	2	Noroeste	2
34	0.03	2	Glaciar Negro	2
35	0.025	1	Glaciar Negro	2
36	0.01	0	Oeste	1
37	0.01	0	Oeste	1
38	0.025	3	Suroeste	1
39	0.02	0	Entrada	2
40	0.07	6	Entrada	4
41	0.055	3	Entrada	4
42	0.035	3	Entrada	2
43	0.055	5	Entrada	3
44	0.05	4	Entrada	3
45	0.065	5	Entrada	4
46	0.065	5	Entrada	4
47	0.01	0	Base Española	1
48	0.08	6	Base Argentina	5
49	0.04	2	Base Argentina	3
50	0.015	1	Base Argentina	1
51	0.015	1	Base Argentina	1
52	0.04	2	Entrada	3
53	0.06	4	Entrada	4
54	0.095	9	Base Argentina	5
55	0.05	4	Base Argentina	3

---

### 3.5.3 Calibración del Modelo

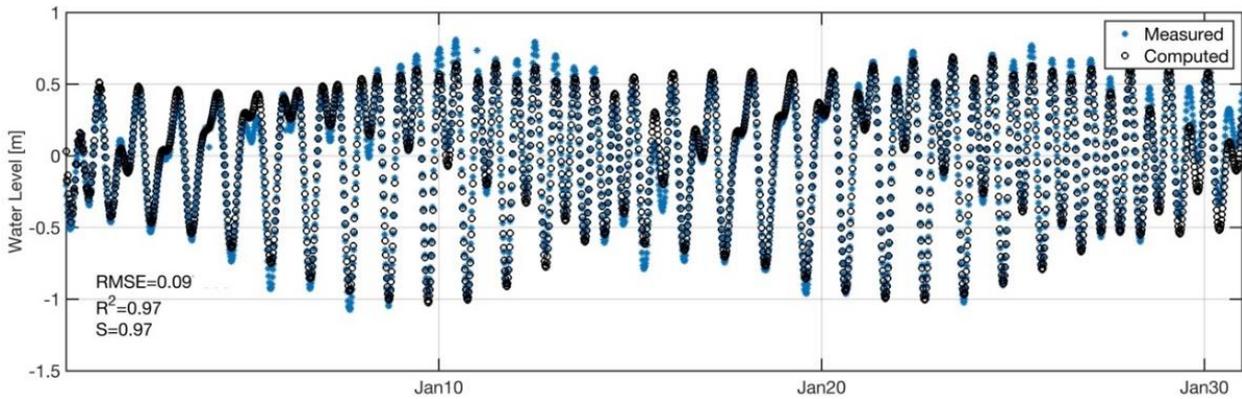
El modelo se calibró para la variable de nivel del agua y para los componentes armónicos de la velocidad (M2 y K1), tanto en amplitud como en fase. Los datos de nivel del agua se obtuvieron de la encuesta de campo realizada en 2012 (Estación COLA en la Ilustración 3-11) y los datos de los componentes armónicos de la velocidad se compararon con los resultados de estudios previos [43] [51]. Se seleccionó todo el mes de enero de 2012 como fecha de calibración porque fue un mes donde no faltaban datos y con condiciones meteorológicas promedio. Los resultados se muestran en la Ilustración 3-13, donde se observa que la concordancia es excelente para el nivel del agua, obteniendo valores de  $R2 \approx 0.98$  y coeficiente de habilidad  $\approx 0.97$ .

En cuanto a las velocidades, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 3-2. Los valores de las fases se representan correctamente con un coeficiente de correlación ( $R2$ ) de 0.9, sin embargo, las amplitudes no se representan correctamente con los obtenidos en estudios previos [43], variando en un orden de magnitud. Por lo tanto, se han probado diferentes valores del coeficiente Chézy (45, 65, 100) para realizar un estudio de sensibilidad. La Ilustración 3-14 muestra cómo al cambiar el coeficiente de Chézy, los valores no varían más del 30% en los picos y en el resto siguen una tendencia con una variación máxima del 3%. Si se calculan los valores de las amplitudes de los componentes M2 y K1, los valores son muy cercanos entre sí, variando un 4%. Por lo tanto, se cree que los resultados obtenidos con el modelo numérico son correctos y, aunque no es posible dar un valor final de la tasa de sedimentación, es posible definir patrones de sedimentación mediante la determinación de las zonas de acreción y erosión.

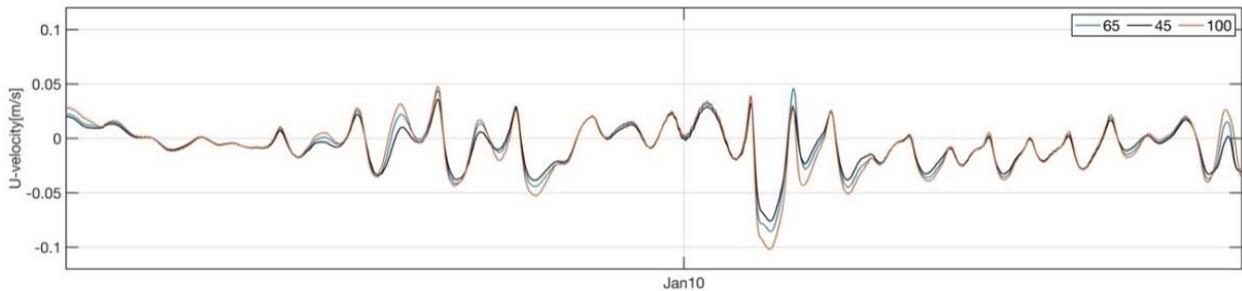
**Tabla 3-2. Resultados de amplitud y fase de los datos de corriente medidos y calculados para los componentes armónicos M2 y K1:**

	u (m/s)		φ [o]	
	Medido	Obtenido	Medido	Obtenido
M2	0.13	0.013	33	34
K1	0.09	0.009	173	180

Estos resultados muestran la comparación entre los valores medidos y los valores calculados para las amplitudes y fases de los componentes armónicos M2 y K1 de las corrientes. La diferencia de amplitud y la diferencia de fase representan las disparidades entre los valores medidos y los valores calculados. Estos resultados proporcionan información sobre la precisión del modelo en la representación de los componentes armónicos de las corrientes.



**Ilustración 3-13. Calibración de la estación COLA. Los círculos azules corresponden a los datos del nivel del agua medido y los círculos blancos con el borde negro a los datos del nivel del agua obtenido.**



**Ilustración 3-14. Resultados del estudio de sensibilidad sobre las corrientes, en el que se varió el coeficiente de Chèzy a 45,60 y 100.**

Una vez calibrado el modelo, se ha simulado un año completo (enero 2012 - enero 2013) con las mismas condiciones y parámetros que se han descrito en el apartado 3.5.2. El objetivo a conseguir con este modelo que se ha implementado es el de definir los patrones de sedimentación y erosión en la línea de costa interior de la Isla Decepción, y que han sido verificados con los resultados obtenidos el resto de estudios expuestos en este capítulo del presente Trabajo de Fin de Máster.

La batimetría y la línea de costa utilizadas al comienzo de la simulación se basan en datos de 2003. Esto significa que, independientemente de la fecha específica elegida para la simulación, las condiciones iniciales de la batimetría y la línea de costa se mantendrán consistentes y reflejarán las características observadas en 2003.

Tal y como se menciona, el objetivo de este modelo es definir los patrones de variación morfodinámica de la línea de costa, ya que los resultados que se muestren en el modelo no reflejarán exactamente la situación real tras transcurrir un año debido a que los valores de los caudales de descarga del deshielo y su aportación de sedimento es simbólica, pudiendo ser menor o mayor en la realidad, por lo que el modelo no podrá dar valores exactos de la variación de la elevación de los puntos de la línea de costa, pero sí los patrones de variación temporal de esta.

El resultado ofrecido por el modelo implementado se expone y describe en el siguiente capítulo del Trabajo de Fin de Máster.



## 4 RESULTADOS

Tras realizar la exposición de los datos de partida disponibles y de la metodología que se ha seguido, tanto para el procesamiento de dichos datos de partida con los que obtener los cambios morfológicos sufridos por la Isla Decepción tanto a nivel altimétrico, batimétrico y en el área definida por su línea de costa interior junto a sus estructuras anexas, en este cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos en cada uno de estos estudios.

De la misma manera, se exponen los resultados ofrecidos por el modelo numérico realizado en el software DELFT3D, en el que se muestran los valores de erosión y sedimentación en la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción tras un año de simulación.

Este cuarto capítulo se divide en cinco apartados. En el primero de ellos se realiza la exposición de los resultados obtenidos en el estudio de cambios altimétricos. El segundo apartado, se centrará en mostrar los resultados correspondientes al estudio de cambios batimétricos, mientras que, el tercer apartado de este capítulo muestra los resultados correspondientes al estudio de cambios visuales en la línea de costa de la bahía interior de la isla. En el penúltimo apartado de este capítulo, se exponen los resultados derivados del modelo numérico que se ha realizado. Por último, se realiza una breve discusión de todos los resultados obtenidos y su validación.

En cada uno de los apartados que componen este capítulo se realiza una breve introducción de la procedencia de dichos resultados, así como una exposición gráfica de sus valores junto a su descripción. En el siguiente capítulo de este Trabajo de Fin de Máster es donde se realiza la conexión entre los distintos estudios mediante la discusión de los resultados y su correspondiente validación.

### 4.1 Cambios altimétricos (MDE)

El primer apartado de este capítulo, tal y como se ha introducido, se centra en la exposición de los resultados derivados de la realización del estudio altimétrico de la Isla Decepción tras la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo anterior sobre los modelos digitales de elevación del terreno.

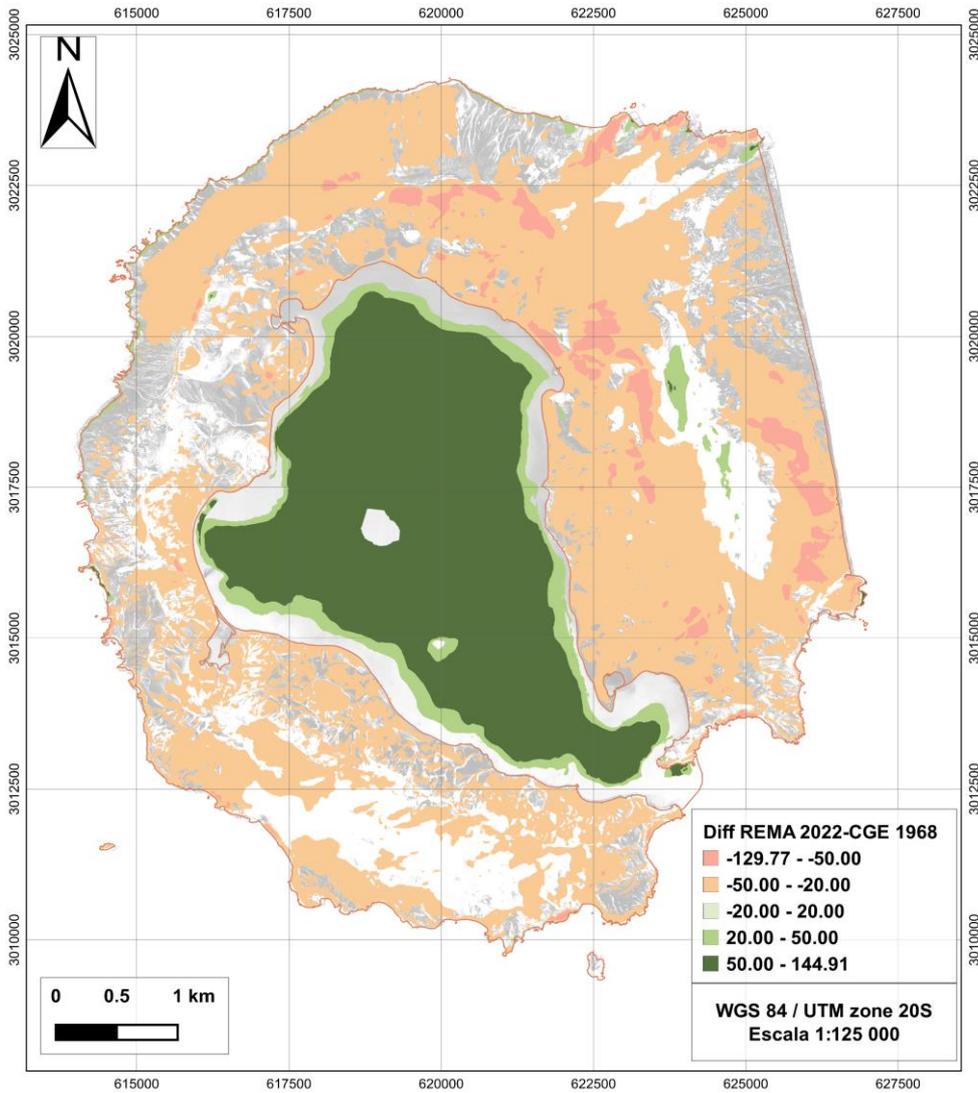
Dado que se han realizado dos estudios independientes sobre la variación altimétrica de la Isla Decepción, se subdividen los resultados en dos subapartados, el primero de ellos denominado “Estudio altimétrico en SIG”, que expone los resultados obtenidos tras el procesamiento de los datos en un entorno SIG, y un segundo subapartado denominado “Estudio DINSAR” en el que se exponen los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología DINSAR sobre imágenes satelitales.

#### 4.1.1 Estudio altimétrico en SIG

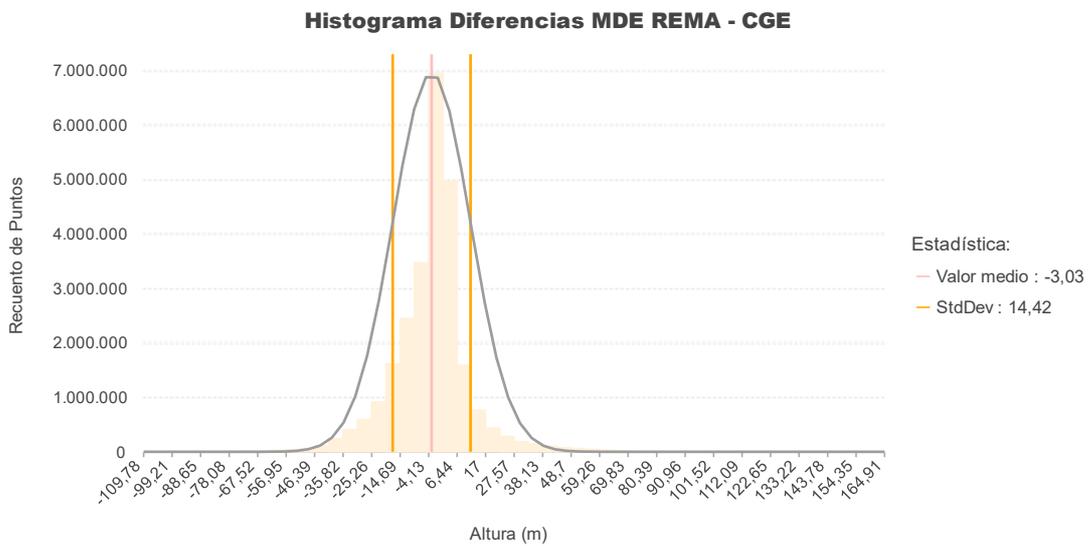
Dentro del entorno SIG, según se expone en el apartado 3.2.1, se han aplicado diversas metodologías para la obtención de resultados a partir de los modelos digitales de elevación del terreno, siendo estos los correspondientes a las diferencias entre los propios MDE, al estudio espacio-temporal basado en el formato NetCDF y del análisis de las pendientes de rango.

Del primero de los análisis realizados, se concluye que la tendencia generalizada en el MDE es de pérdidas y, principalmente, se concentra en las áreas afectadas por la erupción del año 1969 [6]. Estas diferencias representan los cambios en más de 20 años de diferencia. Los resultados obtenidos para las diferencias altimétricas entre los años 1968-2003 y el año 2022 se muestran en la Ilustración 4-1.

En dicha ilustración, se puede apreciar que los mayores cambios positivos se producen en la lámina de agua de la bahía interior de la isla, producto de que el MDE proporcionado por el REMA no dispone de batimetría, así como se muestran grandes cambios altimétricos en la cuenca exterior de la isla. Dado que la verdadero área en estudio de este Trabajo de la Isla Decepción es su cuenca interior, estos resultados se muestran recortados a dicha cuenca en la Ilustración 4-3 (a). En esta ilustración, los demás resultados anexos se muestran también recortados a esta área.



**Ilustración 4-1. Resultados obtenidos de los cambios altimétricos en toda la Isla Decepción de 2003/1968-2022 tras realizar la diferencia entre los MDE.**



**Ilustración 4-2. Histograma del ráster obtenido de la diferencia entre los MDE del CGE (2003-1968) y del REMA (2022).**

Para complementar el resultado obtenido de diferencias entre los MDE, se muestra el histograma de sus valores en el que se observa que la gran mayoría de sus valores se concentran en el rango [-50 – 17] metros, lo que hace indicar que se ha producido una significativa erosión en gran parte de la Isla Decepción desde los últimos fenómenos eruptivos identificados en la isla.

A pesar de ello, el valor medio de los valores obtenidos muestra una altura de -3.03 metros, concentrando más de 7 000 000 de puntos cerca de dicho valor, con una desviación estándar de 14.42 metros, algo más elevada.

Para evaluar las diferencias obtenidas en los resultados, estas se han clasificado utilizando rangos de pendientes adecuados para definir las diferentes geomorfologías de la cuenca de Por Foster. El rango de pendientes escogido se representa en la Ilustración 4-3 (b).

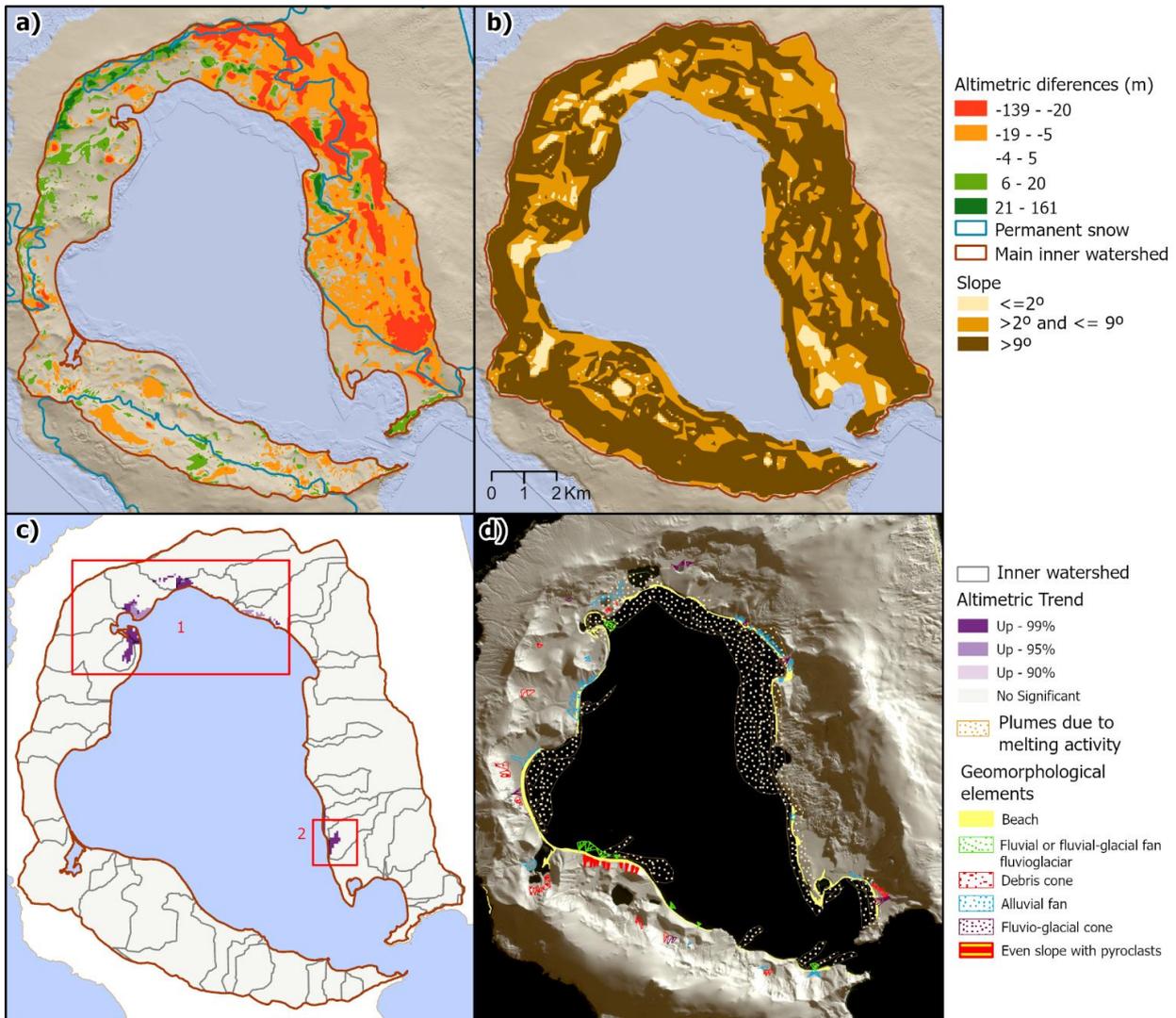
La evaluación estadística de los resultados se presenta en la Tabla 4-1, donde se observan valores negativos en todas las zonas con un valor medio de -2.3 m y una desviación estándar de 8.1 m. En áreas planas, el valor se reduce a -1.2 m y una desviación estándar de 3.7 m. El resto se muestra de acuerdo con el aumento de la pendiente y la variación de altura debido al error posicional.

*Tabla 4-1. Datos estadísticos de las diferencias altimétricas entre de los MDEs.*

Diferencias	Área	Media (m)	Desv Estándar (m)
2020-SIMAC DEM	Total	-2,3	8,1
	Planas ( $\leq 2^\circ$ )	-1.2	3.7
	Pendiente media ( $\leq 9^\circ$ )	-3.4	7.1
	Pendiente elevada ( $> 9^\circ$ )	-6	13.1

Los resultados obtenidos tras la realización del análisis espacio-temporal, muestran únicamente dos zonas con una tendencia al alza, siendo la primera de ellas relacionada con los últimos eventos eruptivos, y la segunda de ellas ubicada en los conos al norte del Lago Kroner, inmediatamente antes del comienzo del Glaciar Negro. Los demás resultados no muestran tendencias de aumento o disminución significativa en su altimetría. Estos resultados están gráficamente representados en la Ilustración 4-3 (c), y pueden reconocerse con el color morado que se muestra en su leyenda.

Como complemento a este estudio, se han identificado y delineado las áreas de plumas de sedimentos observadas en las imágenes satelitales, para así poder valorar si ciertas zonas que pudieran dar significantes cambios altimétricos en áreas próximas a la línea de costa. En la Ilustración 4-3 (d) quedan representadas dichas plumas de sedimentos, junto a otros elementos geomorfológicos de la isla.

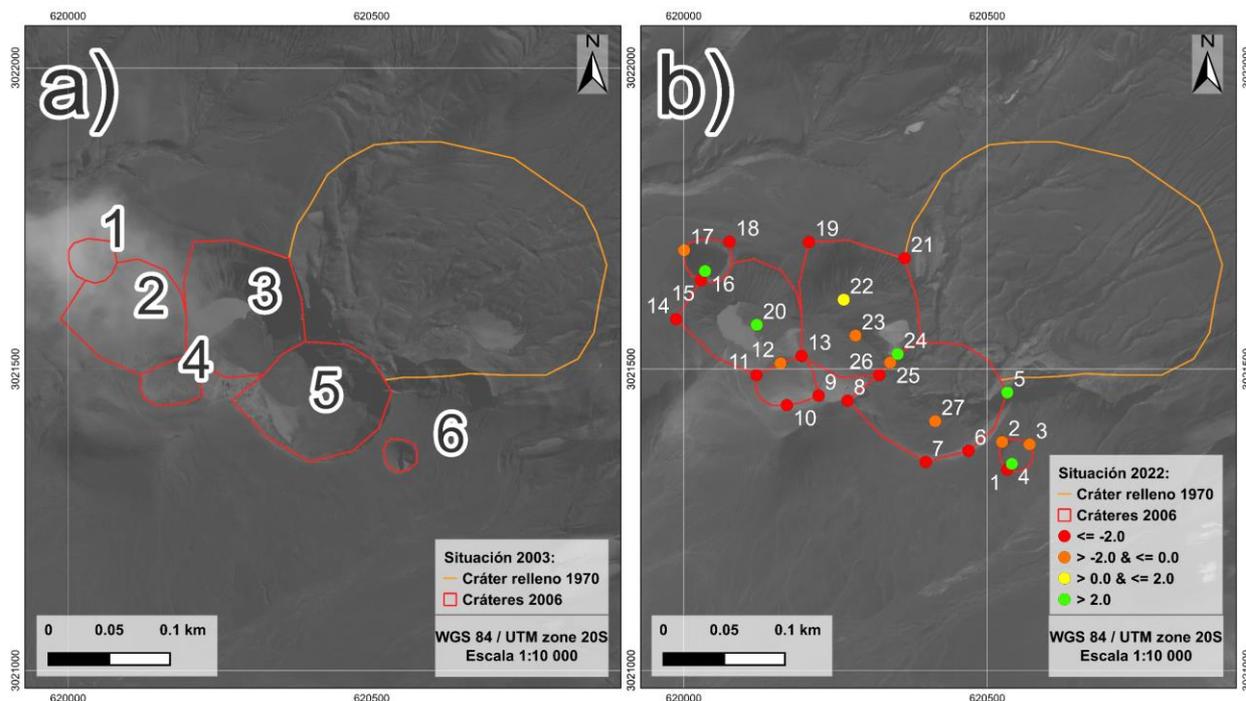


**Ilustración 4-3. (a) Cambios altimétricos de 2003/1968-2022 sobre el sombreado de colinas de REMA y nieve permanente (línea azul). (b) Rangos de pendiente a partir del DEM de CGE. (c) Tendencia altimétrica de 1956 a 2020 (principalmente cuadrado rojo) y cuencas internas. (d) Áreas de plumas satelitales (fuente propia) y algunos elementos geomorfológicos de [7].**

De la comparación realizada de las profundidades medias medidas en los cráteres en el artículo [17] y el MDE del REMA tras corregir su altura geoidal, se han obtenido los resultados mostrados en la Ilustración 4-4, cuyos valores, a su vez, se muestran en la Tabla 4-2.

En la Ilustración 4-4 se muestra a la izquierda, Ilustración 4-4 (a), la identificación de los cráteres realizada en el año 2006 sobre la imagen QuickBird correspondiente al año 2003, para proporcionar una visión aproximada del relleno de los cráteres en el momento de realizar el estudio expuesto en [17]. A la derecha, Ilustración 4-2 (b), se representan las diferencias obtenidas en la altura elipsoidal de los puntos analizados de los cráteres entre el año 2022 (MDE del REMA) y el año 2006 (MDE del CGE).

Todos los fondos de los cráteres presentan alturas aumentadas (colores amarillo y verde) en coherencia con la imagen satelital de 2020. Por otro lado, los bordes inferidos de los cráteres presentan pérdidas probablemente debido a la precisión planimétrica del DEM de REMA, cuyo valor probablemente se encuentra en la pared del cráter. La falta de definición en la fecha del valor del DEM hace imposible determinar una relación precisa, pero se observan aproximadamente 9 metros en el cráter número 6, completamente lleno según la imagen de 2020, 6 metros y 2 metros para los cráteres número 2 y 3 respectivamente, con un aumento visible en el fondo debido al desplazamiento activo de material cuesta arriba desde los abanicos aluviales del Monte Goddard y unos 7 metros en el cráter identificado como número 1.



**Ilustración 4-4. (a) Identificación de los cráteres en el año 2006 sobre la imagen satelital del año 2003. (b) Resultados obtenidos de la evaluación del relleno de los cráteres de 1970 desde el año 2006 hasta el año 2022 sobre la imagen satelital del año 2020. Fuente de los datos: Propio y [17].**

**Tabla 4-2. Diferencias en la altura elipsoidal del interior de los cráteres obtenida entre el MDE del CGE de 2006 y el REMA de 2020. Fuente de los datos: Propio y [17].**

Punto	2006 h(m)	REMA h (m)	Diferencias (m)
1	52,2	50,1	-2,0
2	61,1	59,6	-1,5
3	57,7	56,4	-1,3
4	43,2	52,1	8,9
5	80,1	86,4	6,3
6	62,9	56,1	-6,8
7	59,8	54,4	-5,4
8	90,3	83,8	-6,5
9	98,1	87,9	-10,2
10	94,1	86,7	-7,5
11	69,8	65,7	-4,1
12	50,4	50,1	-0,3
13	65,4	61,1	-4,3
14	77,5	74,9	-2,6
15	64,5	62,5	-2,0
16	57,3	64,4	7,1
17	81,3	79,8	-1,5
18	93,7	90,4	-3,4
19	98,4	95,5	-2,9
20	34,2	40,3	6,1
21	108,9	105,0	-3,9
22	45,1	46,9	1,9

23	45,1	45,0	-0,1
24	48,9	54,0	5,2
25	48,0	47,2	-0,7
26	46,7	44,6	-2,1
27	46,6	46,3	-0,3

#### 4.1.2 Estudio DINSAR

Tras aplicar esta metodología sobre las escenas descargadas de Sentinel 1, se ha obtenido que los MDT del SAR tienen puntos fiables pero sus desviaciones en cota a veces son de más de 50m en tierra, y en costa los DEM dan demasiados cambios y es probable que haya problemas con los 0 (el 0 de referencia empleado para la costa), por lo que finalmente no se han podido obtener resultados coherentes con esta metodología, ya que es posible que haya una pérdida de correlación entre estos.

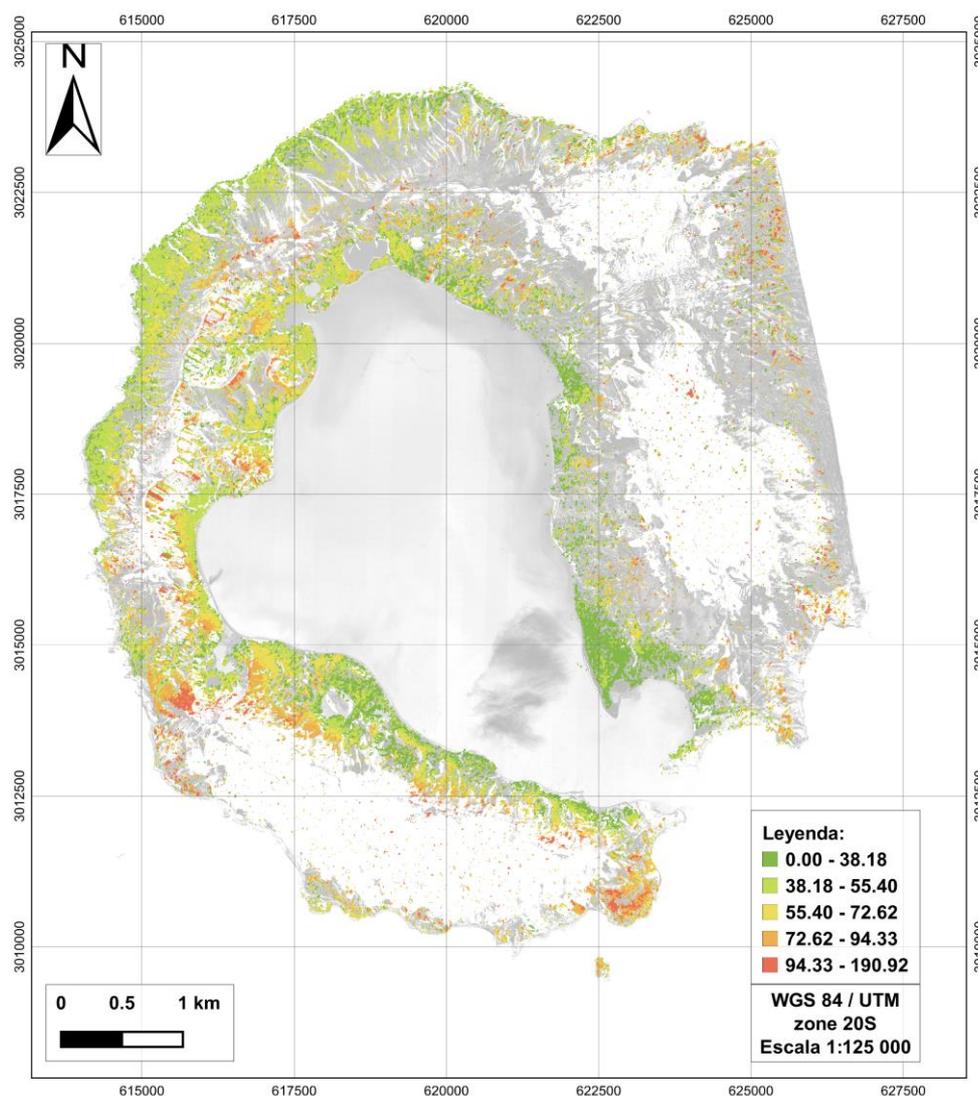
La pérdida de coherencia se deriva de la decorrelación espacial y temporal (Ferretti et al., 1999; Zebker y Villasenor, 1992) y de los efectos atmosféricos (Massonnet y Feigl, 1995; Hanssen y Feijt, 1997; Zebker et al., 1997; Ferretti et al., 2001), siendo la primera causada por cambios en la superficie terrestre, propiedades del suelo y contenido de humedad, vegetación y pendiente de la superficie (Lee y Liu, 2001), y también por cambios en las distancias de referencia (separación temporal/espacial entre las rutas de seguimiento del satélite).

En entornos arenosos, la decorrelación es causada por procesos erosivos o deposicionales, así como por el movimiento de las partículas de arena, los cuales cambian continuamente la distribución de los dispersores de superficie. El efecto de estos cambios es una rápida decorrelación temporal en un tiempo muy corto (Liu et al., 2001), lo que permite mapear la extensión de la perturbación, facilitando así el uso de la coherencia interferométrica en estudios eólicos (Smith, 2002).

Por estos motivos, los resultados obtenidos tras la aplicación de esta metodología no se consideran válidos y adecuados para poder obtener unas conclusiones claras de los cambios morfológicos que está presentando la Isla Decepción desde que se produjeron las últimas erupciones de finales de los años 60.

En la siguiente ilustración (Ilustración 4-5) se representan la media de los valores altimétricos de los 6 MDT considerados buenos tras la aplicación de la metodología DINSAR, cuyas altas diferencias han derivado en la desestimación de los resultados.

Se ha apreciado que gran parte de la isla, y más concretamente, de la zona de mayor interés en el estudio (cuenca interior de la isla) muestran diferencias entre sus valores de más de 40 metros, lo que hace que no puedan tomarse como válidos estos resultados, a pesar de disponer de una gran cantidad de puntos cuya coherencia se ha obtenido considerablemente buena, ya que no se pueden justificar adecuadamente existan tantas diferencias en los mismos puntos tomados en fecha relativamente cercanas.



*Ilustración 4-5. Media de los valores altimétricos de los modelos digitales del terreno resultantes de la aplicación de la metodología DINSAR sobre imágenes satelitales del Sentinel 1 de la ESA.*

## 4.2 Cambios batimétricos

El segundo apartado de este capítulo, tal y como se ha introducido, expone los resultados derivados de la realización del estudio batimétrico de la bahía interior de la Isla Decepción tras la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo anterior sobre los modelos digitales batimétricos.

En este apartado se muestran los resultados correspondientes a la comparación de las batimetrías disponibles con la misma resolución espacial y sistema de referencia, y a la realización de dos estudios espacio-temporales basados en el formato NetCDF, del que se han obtenido tendencias con significancia estadística.

Respecto a los resultados obtenidos tras la obtención de las diferencias batimétricas, los valores obtenidos fruto de la diferencia entre las batimetrías correspondientes al IHM de los años 2012-2016, al CGE del año 1991 y la batimetría promedio obtenida de los cruceros del MGDS (2000-2009, promedio en 2005) se muestran en la Ilustración 4-7, abarcando más de 20 años.

Las primera línea de figuras expuestas en esta ilustración , Ilustración 4-7 (a), Ilustración 4-7 (b) e Ilustración 4-7 (c), muestran las diferencias batimétricas entre las batimetrías de los años 1991 – 2005, 2005 – 2012/2016 y 1991 – 2012/2016, respectivamente.

Siguiendo esta primera línea de imágenes en esta figura, se encuentran diferencias altimétricas sorprendentemente altas, aunque el valor de los cambios no significativos se sitúa alrededor de  $\pm 5$  m. Este valor

se seleccionó para incluir la incertidumbre en relación a la marea (2 m) y la precisión instrumental (2 m). La zona más extensa con aumento de altura (Ilustración 4-7 (c), zona 7) se encuentra alrededor de los 150 m de isóbata (Ilustración 4-7 (b)), donde el lecho marino es casi plano y sin rasgos distintivos por debajo de esta profundidad (Ilustración 4-7 (d)). Esta área fue estudiada por Cooper et al. [3] con tasas de sedimentación de hasta 0,3 m/año desde 1829. Las tasas de sedimentación en la bahía interior de la Isla Decepción concluidas por Cooper et al. [3] se han representado en la Ilustración 4-6 sobre una ortofoto de la isla Decepción

Las diferencias obtenidas se han clasificado utilizando rangos de pendiente adecuados que han permitido definir las diferentes geomorfologías de la bahía interior de la Isla Decepción. Los datos aplicados para la pendiente se representan gráficamente en la Ilustración 4-7 (d) y se muestran en la Tabla 4-3, donde se exponen los resultados obtenidos para los grupos de pendiente escogidos junto a sus valores medios y su desviación estándar.

La referencia altimétrica parece ser mejor en el caso de las batimetrías de MDGS e IHM, con una desviación estándar de 3.4 m y una sedimentación global media de 5.8 metros y máxima de 6.2 metros en las áreas más planas, siendo estos valores representados como ganancia. El estudio global de 1991 a 2012 muestra un error posicional claro que se compensa en los rangos de pendientes mostrados en la Tabla 4-3. De esta manera, la diferencia media en pendientes medias y altas disminuye a medida que aumenta la pendiente, aunque en consecuencia la desviación estándar también aumenta. En este estudio, los valores altos están relacionados con las superficies más inclinadas, representadas con color marrón oscuro en la Ilustración 4-7 (d).

**Tabla 4-3. Datos estadísticos de las diferencias entre los modelos digitales batimétricos.**

Diferencias	Área	Media (m)	Desv Estándar (m)
	Total	<b>-3.4</b>	<b>7.5</b>
SIMAC-MDGS media (1991-2005) BEMs	Plano ( $\leq 2^\circ$ )	-1.5	4.3
	Pendiente media ( $\leq 9^\circ$ )	-7.5	9.9
	Pendiente alta ( $> 9^\circ$ )	-12.5	15.7
	Total	<b>5.8</b>	<b>3.4</b>
MDGS media- IHM (2005-2012) BEMs	Plano ( $\leq 2^\circ$ )	6.2	2.4
	Pendiente media ( $\leq 9^\circ$ )	5.3	3.6
	Pendiente alta ( $> 9^\circ$ )	0.5	10.3
	Total	<b>1.5</b>	<b>10.8</b>
SIMAC- IHM (1991-2012) BEMs	Plano ( $\leq 2^\circ$ )	4.6	4.3
	Pendiente media ( $\leq 9^\circ$ )	-0.5	10.1
	Pendiente alta ( $> 9^\circ$ )	-0.04	17.1

Para la realización del estudio de cubos espacio-temporales, se recuerda que se han definido dos estructuras de datos NetCDF agrupando puntos en celdas espacio-temporales para determinar con significancia estadística la tendencia de cada celda. Los dos grupos de datos analizados fueron:

- Únicamente datos procedentes del MGDS (19-11-2000 al 29-03-2009), en un estudio de 1 mes y una resolución espacial de 200 m.
- Todos los datos batimétricos (01-01-1990 al 01-01-2012) en un estudio de 3 meses para agrupar los datos del verano austral.

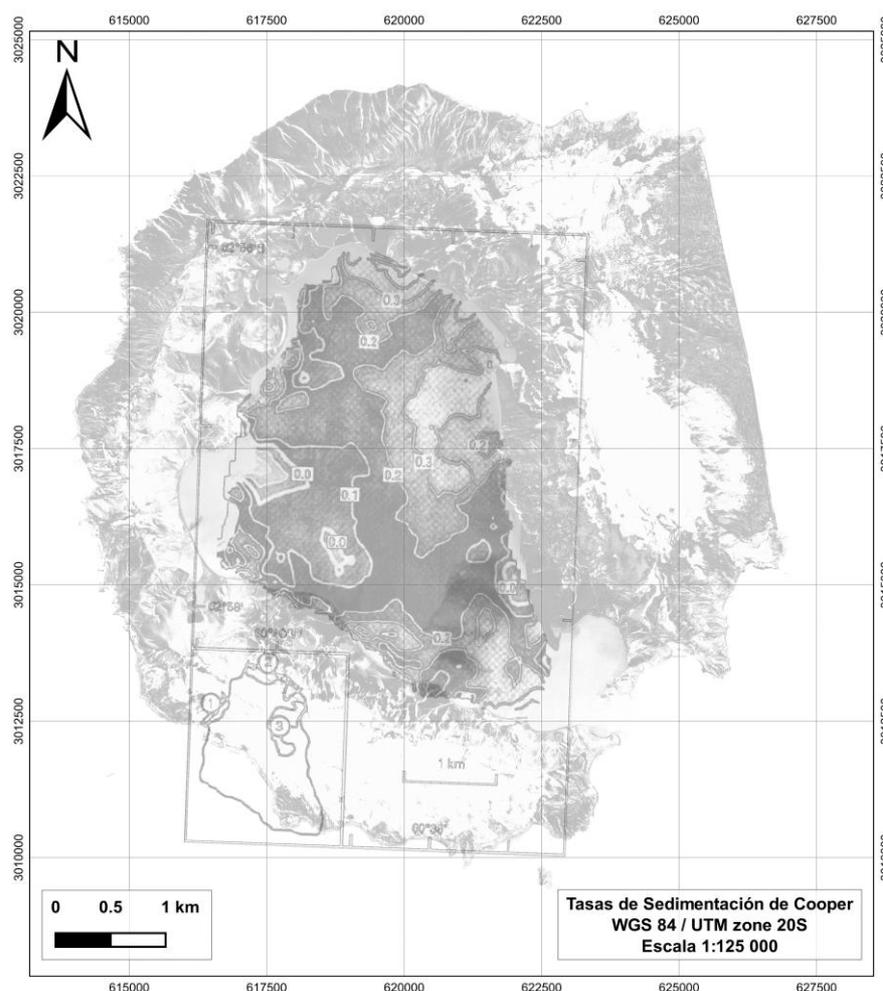
Del primer cubo espacio-temporal se obtiene que el cubo espacio-temporal ha agrupado 17 256 puntos en 24 174 celdas de la malla a lo largo de 3 052 intervalos de tiempo. Cada celda es un cuadrado de 50 x 50 metros. El cubo espacio-temporal abarca un área de 7 650 metros de este a oeste y 7 900 metros de norte a sur. Cada intervalo de tiempo tiene una duración de 1 día, por lo que el período de tiempo completo cubierto por el cubo espacio-temporal es de 3 052 días. De las 24 174 ubicaciones totales, 4 674 (19.33%) contienen al menos un punto para al menos un intervalo de tiempo. Estas 4 674 ubicaciones comprenden 14 265 048 celdas espacio-temporales, de las cuales 9 485 (0.07%) tienen recuentos de puntos mayores que cero. Se encuentra una

disminución estadísticamente significativa en los recuentos de puntos a lo largo del tiempo. En la Ilustración 4-7 (e) se representan los puntos contados dentro de las celdas de 50 metros x 50 metros obtenidos en el primer cubo espacio-temporal.

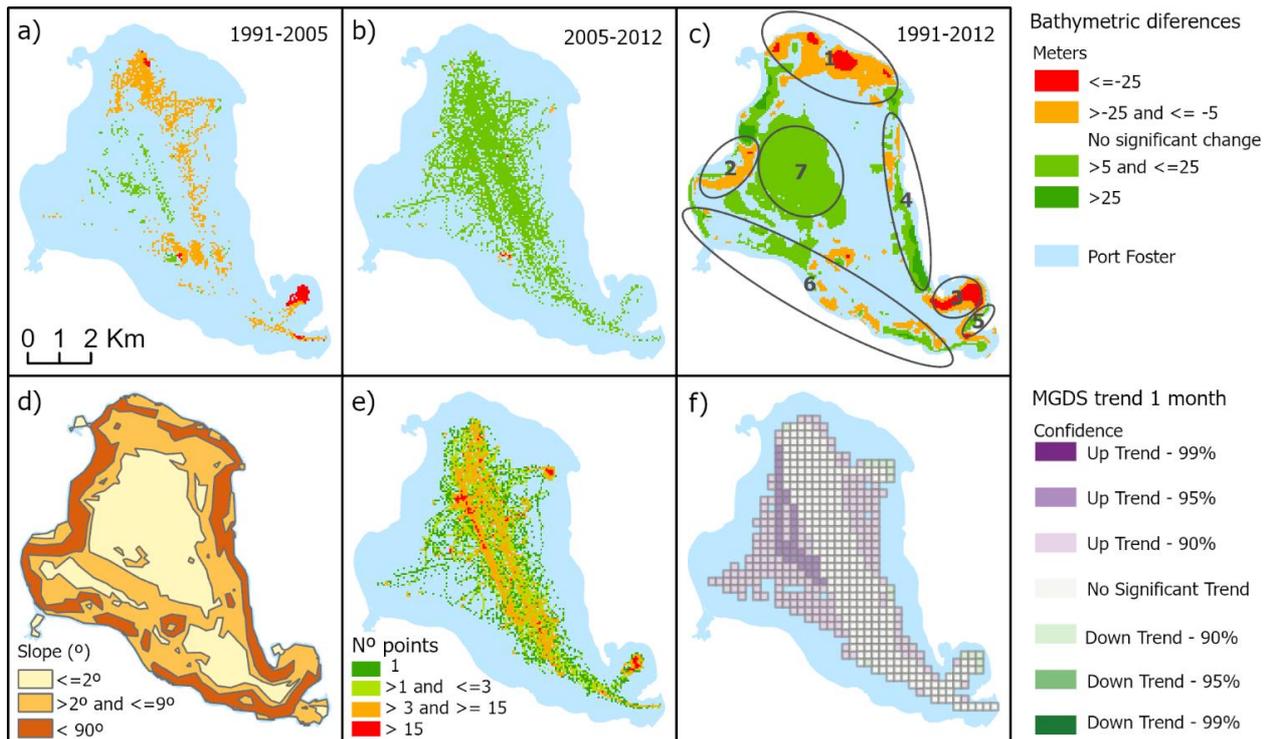
La tendencia es solo estadísticamente significativa en algunas áreas, como se muestra en la Ilustración 4-7 (f). Principalmente se observa un aumento en la batimetría y se encuentra ubicado en el lecho marino plano, en coherencia con áreas sedimentarias mostradas en la Ilustración 4-7 (c).

El segundo cubo espacio-temporal ha agrupado 10 045 599 puntos en 41 208 celdas de la malla a lo largo de 28 intervalos de tiempo. Cada celda es un cuadrado de 50 metros por 50 metros. El cubo espacio-temporal abarca un área de 10 100 metros de este a oeste y 10 200 metros de norte a sur. Cada intervalo de tiempo tiene una duración de 1 año, por lo que el período de tiempo completo cubierto por el cubo espacio-temporal es de 28 años. De las 41 208 ubicaciones totales, 17 448 (42.34%) contienen al menos un punto para al menos un intervalo de tiempo. Estas 17 448 ubicaciones comprenden 488 544 celdas espacio-temporales, de las cuales 38 521 (7.88%) tienen recuentos de puntos mayores que cero. En base a estos resultados, no se observa un aumento o disminución estadísticamente significativo en los recuentos de puntos a lo largo del tiempo.

En base a los resultados obtenido de la realización del segundo cubo espacio temporal, desafortunadamente, la inclusión de todos los puntos batimétricos no mostró zonas con significancia estadística a lo largo del tiempo. Obviamente, la precisión de los datos (superior a 1 m) y algunas incertidumbres de altura han influido en este segundo cubo.



**Ilustración 4-6. Representación de las tasas de sedimentación en la batimetría de la bahía interior concluidos por Cooper en su estudio [3] sobre una ortofoto de la Isla Decepción. Fuente de los datos: [3]**



**Ilustración 4-7. (a) Estudio batimétrico temporal de Port Foster. Arriba, diferencias batimétricas entre 1991-2005. (b) 2005-2012. (c) 1991-2012. (d) Abajo, áreas de pendiente en grados. (e) Número de puntos en celdas de 50m a partir de datos MDGS. (f) Tendencia de estos datos MDGS a lo largo de su periodo.**

### 4.3 Cambios en la línea de costa

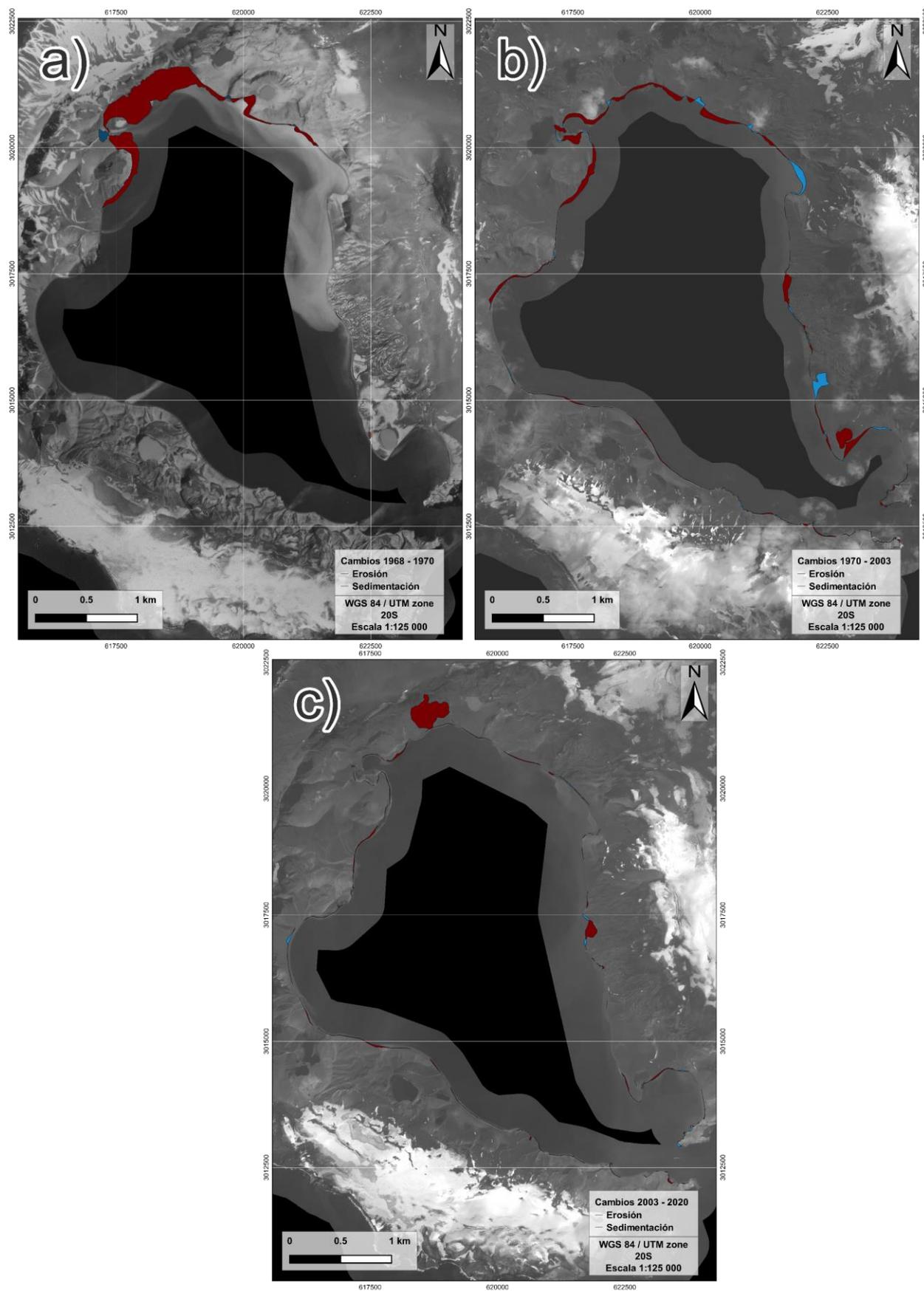
En el tercer apartado de este capítulo se exponen los resultados obtenidos procedentes del estudio de cambios visuales en la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción, en los que se muestran las áreas del contorno interior de la isla en la que se ha producido erosión o sedimentación calculados mediante el empleo de geoprocursos en SIG, junto a los ratios anuales de dichos procesos obtenidos con la herramienta DSAS.

Los polígonos correspondientes a la delineación de las líneas de costa de los años 1968, 1970, 2003 y 2020 se compararon entre sí para estimar las diferencias entre la línea de costa interior de la isla en su estado más reciente (ortofoto del año 2020) y las líneas de costa anteriores delineadas de las situaciones previas (1968, 1970 y 2003).

La diferencia entre los shapefiles de tipo área representados en las ilustraciones Ilustración 3-6, Ilustración 3-7, Ilustración 3-8 e Ilustración 3-9, ha permitido identificar aquellas áreas en las que se ha producido erosión (representada en color rojo) o sedimentación (representada en color azul) en la bahía interna de la isla con el paso de los años.

Estas diferencias se exponen en la Ilustración 4-8, donde se muestran los cambios como serie temporal desde el año 1968 hasta el año 2020 divididos en tres figuras. La primera de ellas, Ilustración 4-8 (a) corresponde con los cambios observados entre los años 1968 y 1970, representando así la transformación geomorfológica de la isla durante las erupciones de finales de los años 60, la Ilustración 4-8 (b) se corresponde con los cambios apreciables entre los años 1970 y 2003, una vez finalizados estos procesos eruptivos, y la Ilustración 4-8 (c) representa los cambios observados en las líneas delineadas correspondientes a los años 2003 y 2020. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se muestra la acreción en color azul y las zonas de pérdidas en color rojo.

En la primera de ellas, se observa claramente como el norte de la bahía interior de la isla es el área que mayor modificación sufrió tras las erupciones existentes, en las que se produjo una gran sedimentación en esta zona generando los conocidos lagos ubicados al noroeste de la isla, como es el caso del Lago Escondido.



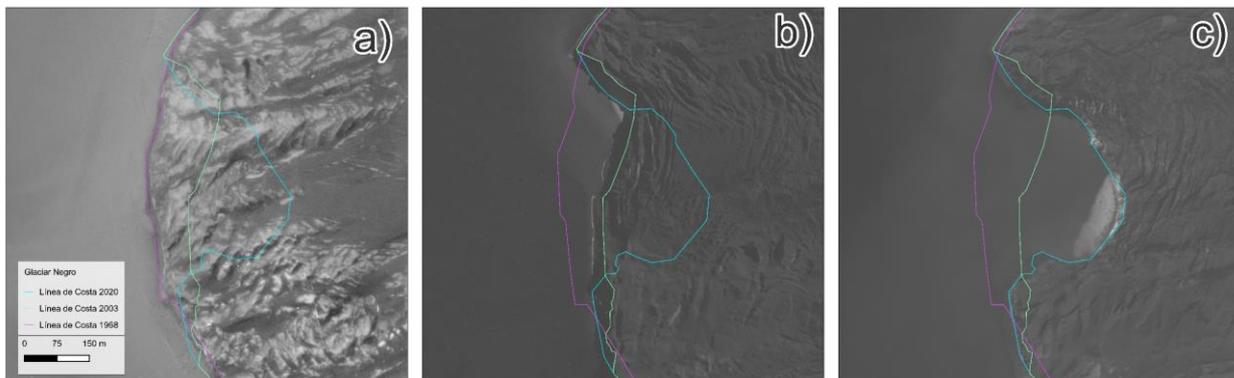
**Ilustración 4-8.** Cambios visuales obtenidos en el análisis de las líneas de costa delineadas. (a) Cambios producidos entre 1968 y 1970. (b) Cambios producidos entre 1970 y 2003. (c) Cambios producidos entre 2003-2020.

Entre los años 1970 y 2003 se ha obtenido una gran interacción en el material de la isla, definiéndose grandes zonas de sedimentación y erosión. La erosión se concentra principalmente en el norte de la isla, mientras que la sedimentación se aprecia principalmente en el este de la isla, al norte y sur del Glaciar Negro.

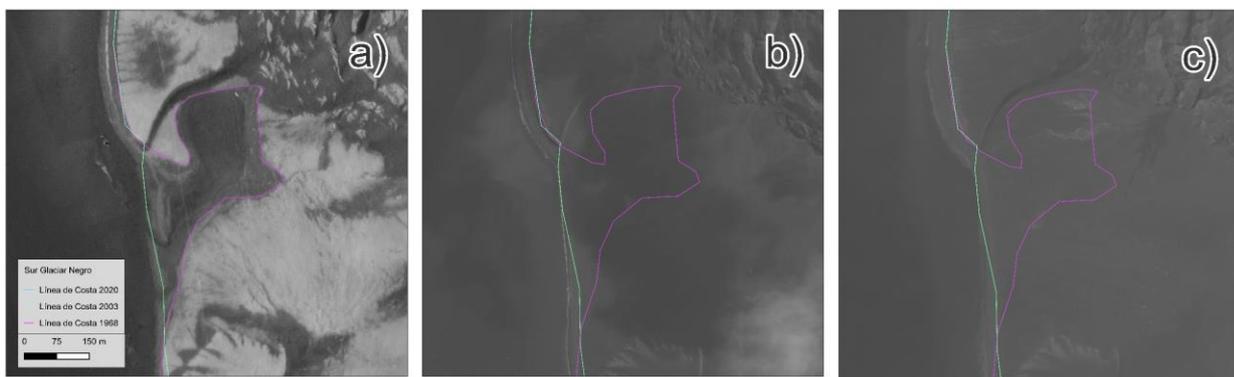
Entre 2003 y 2020 la actividad sedimentaria y erosiva se ha visto reducida en términos generales en la isla. Aun así, se destaca la apertura del Lago Escondido, con la rotura de una banqueta de más de 3 metros de altura para generar su apertura, y un significativo retroceso del Glaciar Negro.

Para poder apreciar con un mayor grado de detalle, se presentan algunas ilustraciones con algunos de los cambios más notables observados tras realizar el análisis de cambios visuales en la línea de costa. Estas ilustraciones recogen la serie temporal seguida 1968-2003-2020 sobre sus respectivas ortofotos, permitiendo observar en mejor detalle la delineación de las líneas en dichas áreas junto a las modificaciones que se han producido en el contorno interior de la isla.

Las dos primeras series de ilustraciones muestran la erosión y sedimentación más significativas que suceden en la parte occidental de la isla, concretamente en el Glaciar Negro, donde se identifica un retroceso de más de 200 metros (Ilustración 4-9) y en la región sur de este glaciar, donde se identifica una zona con gran relleno (Ilustración 4-10).

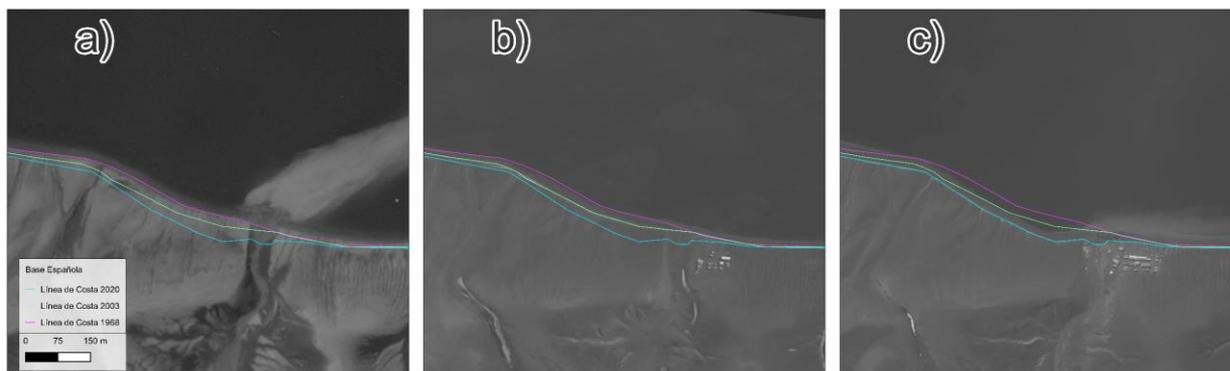


**Ilustración 4-9.** Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Retroceso en el área central del Glaciar Negro.

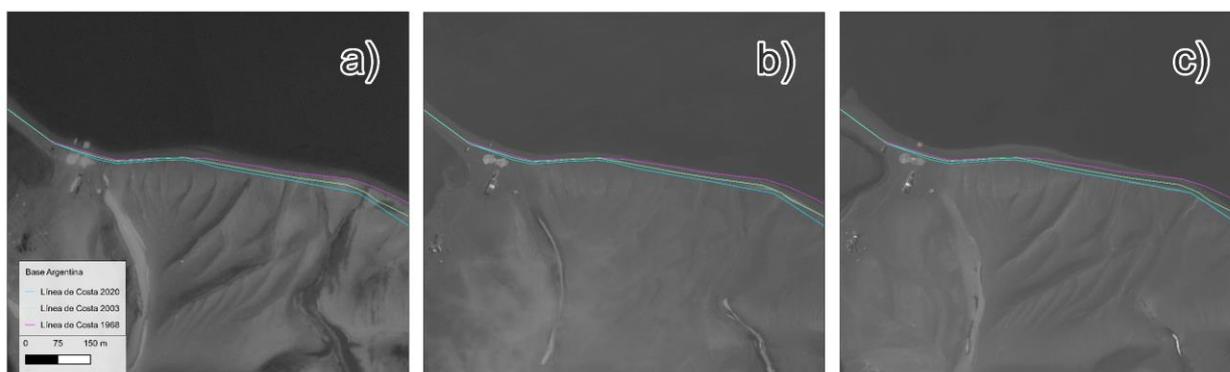


**Ilustración 4-10.** Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Sedimentación al sur del Glaciar Negro.

La segunda serie de ilustraciones representa la erosión del talud ubicado en el borde de la línea de costa del sur de la Isla Decepción, concretamente delante de las bases militares española (Ilustración 4-11) y argentina (Ilustración 4-12). Se conoce que este talud existente sobre la línea de costa desde la base española hasta la base argentina está siendo gravemente afectado por el deshielo y las mareas, pasando a disponer cortados de 3 metros de altura en los que la marea se introduce una distancia del orden de metros, conllevando a una situación de inseguridad en el frente de estas bases, obligado a construir un muro de contención frente a la base española que evite que siga el proceso de erosión por parte del mar en dicha zona y alcance el módulo de vida.

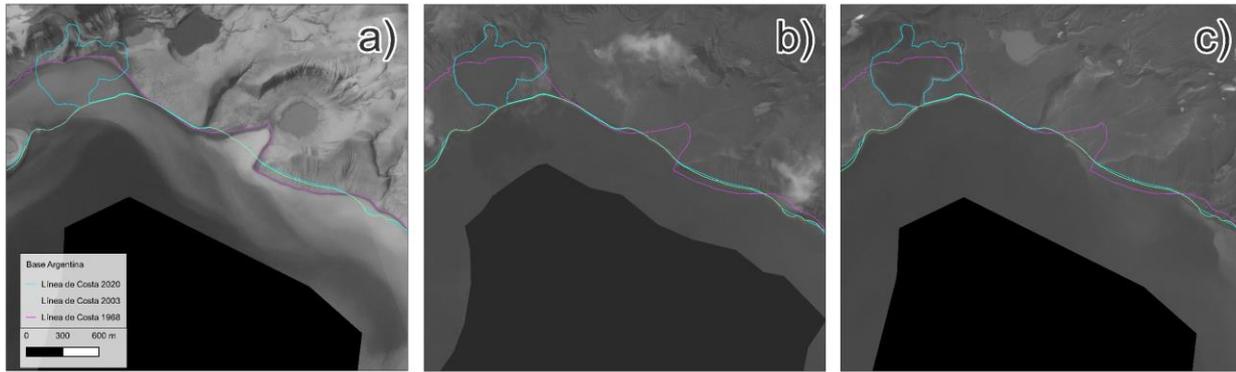


**Ilustración 4-11.** Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Erosión del talud ubicado delante de la base española..



**Ilustración 4-12.** Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Erosión del talud y zona cercana a costa ubicada delante de la base argentina.

Por último, se muestra una última serie temporal de ilustraciones del norte de la isla, siendo esta área la que mayor modificación morfológica ha sufrido tras las erupciones de finales de los años 60. Al realizar la comparación entre su ilustración "a" y las demás ilustraciones de la serie, se aprecia la gran cantidad de material depositado en toda su línea de costa. Además, entre el año 2003 y 2020 se ha producido la apertura del Lago Escondido, incluyendo su superficie ocupada a la bahía de Port Foster.



**Ilustración 4-13.** Algunos cambios visuales en las líneas de costa de la Isla Decepción entre 1968-2003-2020 antes de la última erupción (Las letras en la representación se asocian con los años correspondientes de las ortofotos, donde "a" corresponde al año 1968 (antes de la erupción), "b" representa el año 2003 y "c" representa el año 2020: Cambios sufridos por la zona de costa al norte de Port Foster.

Como conclusión de la exposición de los resultados obtenidos en el estudio de cambios visuales de la línea de costa, se muestran los resultados derivados del empleo del módulo DSAS en el software ARCGIS. Este módulo ha evaluado el retroceso y avance de la línea de costa en las zonas definidas en su aplicación para obtener sus diferencias y con ello proporcionar los ratios anuales de erosión y sedimentación entre los años correspondientes a las líneas de costa comparadas. Se comparan las líneas de costa delineadas en el intervalo de tiempo definido entre el año 1970 y el año 2020 para poder evaluar la tendencia evolutiva de la costa tras las últimas erupciones registradas.

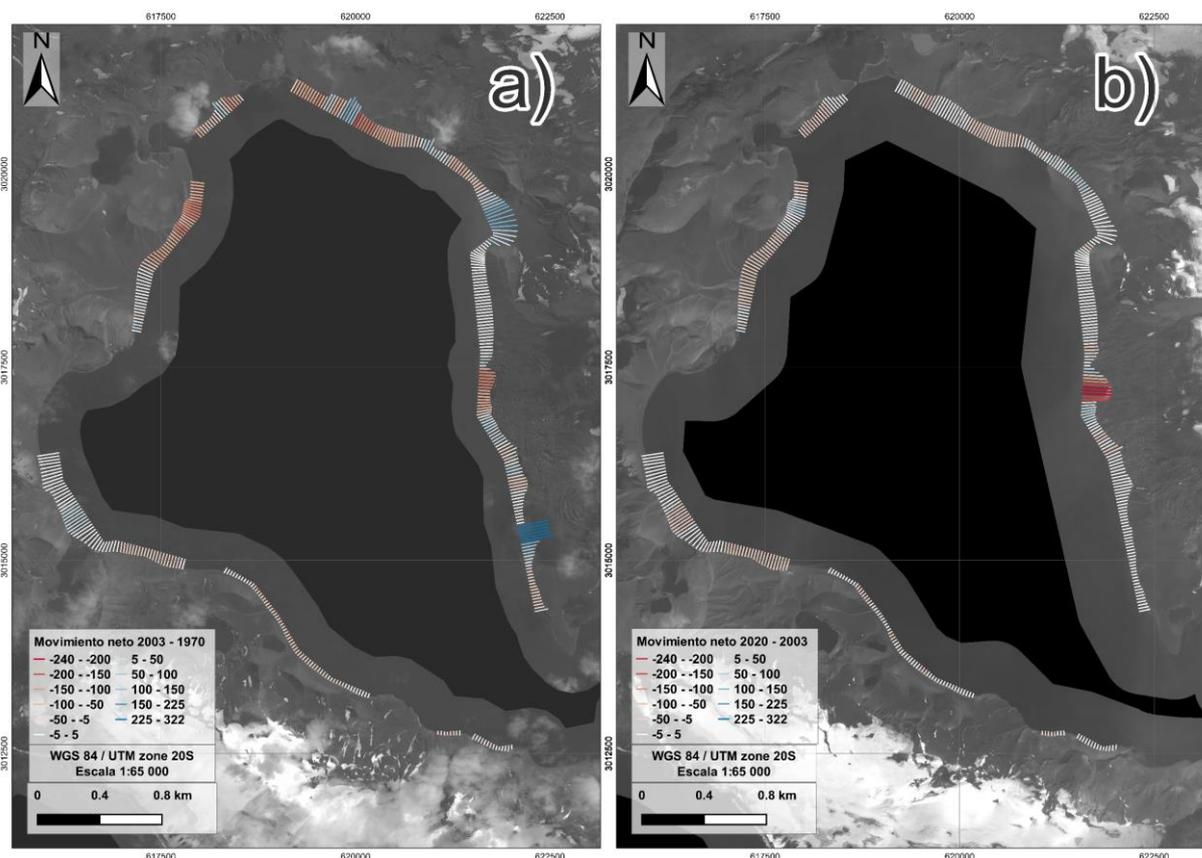
Los resultados expuestos en la Ilustración 4-14 representan el movimiento neto de la línea de costa en los intervalos de tiempo 2003-1970, Ilustración 4-14 (a), y 2020-2003, Ilustración 4-14 (b). Por otra parte, en la Ilustración 4-15 se representan los ratios de erosión y sedimentación anuales obtenidos para los intervalos de tiempo 2003-1970, Ilustración 4-15 (a), y 2020-2003, Ilustración 4-15 (b), disponiendo de base las ortofotos correspondientes a los años 2003 y 2020, respectivamente.

Los ratios anuales de avance o retroceso de la línea de costa corresponden al valor obtenido de dividir el máximo valor medido en cada uno de los perfiles analizados, y que han sido expuestos en la Ilustración 3-10, entre el periodo de tiempo existente entre las líneas de costa evaluadas en años.

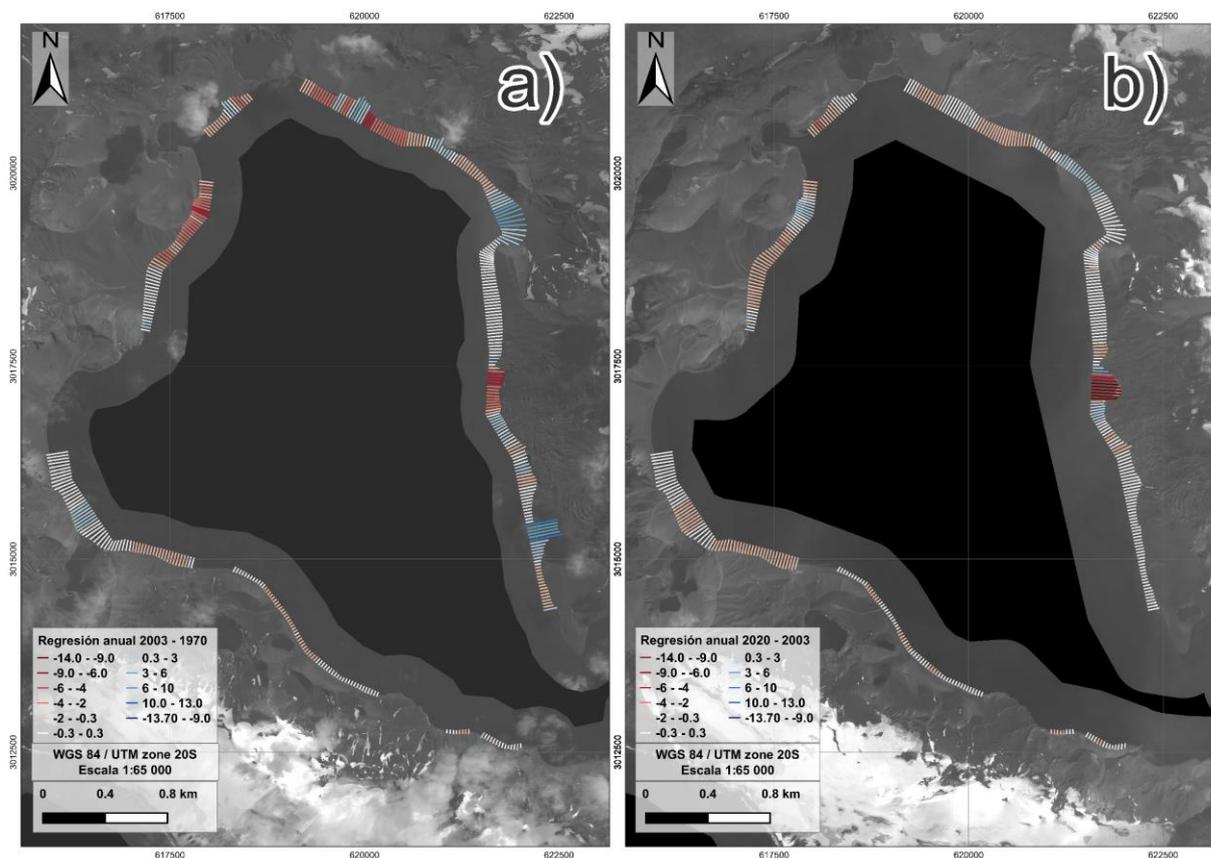
De ambas ilustraciones se extrae que, en términos generales, la dinámica de la línea de costa es menor con el paso de los años, siendo más intensa tras la finalización de las últimas erupciones datadas, en las que el gran aporte de sedimento llegado a la isla sufrió mayores desplazamientos por toda su costa. Por este motivo, en el intervalo de tiempo entre los años 1970 y 2003 se aprecia una mayor interacción en todo el contorno de Port Foster, con una sedimentación y erosión más repartida y equitativa, concentrando generalmente el proceso sedimentario en la zona oriental de la isla y el erosivo en la zona norte y occidental, con un pequeño retroceso del sur de la línea de costa.

En el segundo intervalo analizado, entre los años 2003 y 2020, se aprecia que gran parte de Port Foster ha visto reducida la intensidad a la que se modificaba su costa, aunque se muestra una clara dominancia de la erosión en todo el contorno de su bahía. Especialmente, se destaca la erosión presentada en el norte y noroeste de la isla, así como en el sur, donde se ubican las bases españolas y argentinas. A su vez, debe destacarse el gran retroceso sufrido por el Glaciar Negro, que ha aumentado su retroceso a 14 metros anuales en el intervalo 2020-2003, frente a los 7 metros anuales que disponía en el intervalo 2003-1970, lo que supone un incremento del 100% de su retroceso anual.

Respecto a la sedimentación, se destacan las áreas ubicadas en los extremos del Glaciar Negro sufrieron un avance en su línea de costa del orden de 150-200 metros en el sur y del orden de 50-100 metros al norte en el intervalo de tiempo 1970-2003, la cual se ha visto paralizada en la segunda etapa analizada. Otras zonas menos destacadas en cuanto al valor de su avance de la línea de costa en el primer intervalo analizado han sufrido modificaciones inversas en la segunda etapa, llegando a presentar un retroceso en sus valores.



**Ilustración 4-14.** Movimiento neto de la línea de costa calculado en el módulo DSAS para los intervalos de tiempo analizados: (a) Movimiento neto entre 2003-1970. (b) Movimiento neto entre 2020-1970.

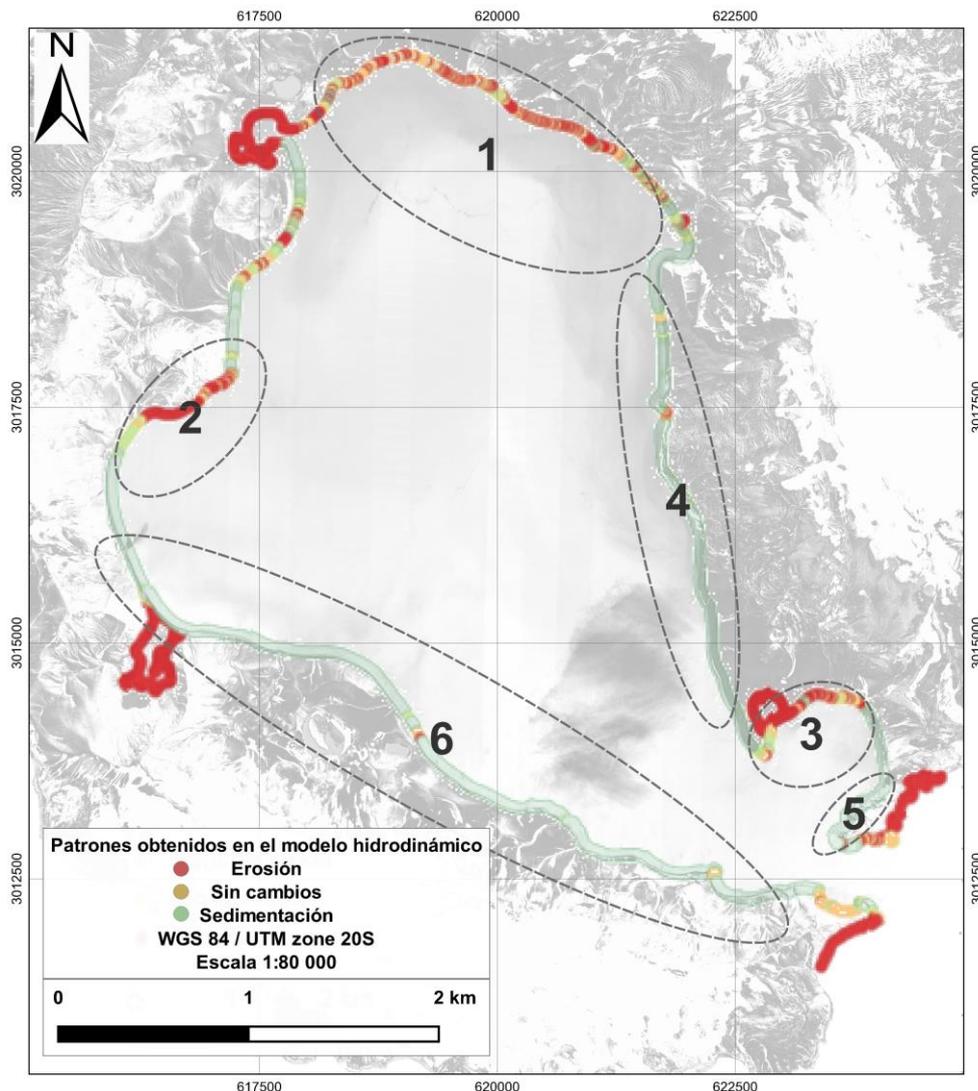


**Ilustración 4-15.** Ratios anuales de avance y retroceso de la línea de costa obtenidos en el módulo DSAS de la diferencia entre las líneas de costa delineadas. (a) Ratios anuales entre 2003-1970. (b) Ratios anuales entre 2020-2003.

#### 4.4 Resultados obtenidos en el modelo numérico realizado en DELFT3D

El cuarto apartado de este capítulo expone los resultados obtenidos tras la implementación en el software de un modelo hidrodinámico en el que se ha simulado la interacción entre el viento y las corrientes internas de la bahía de Port Foster medidas en campañas de campo, su costa y el aporte de sedimentos y caudal por parte de los arroyos generados en el deshielo de la isla durante los meses de enero, febrero y marzo.

El resultado obtenido de este modelo es la variación altimétrica de los puntos que definen su línea de costa, es decir, la erosión o sedimentación del contorno de Port Foster tras la simulación de un periodo de tiempo igual a un año. La línea de costa que representa el modelo, tal y como se mencionó en el apartado 3.5, se corresponde al año 2003, siendo esta la incorporada al modelo junto a la batimetría disponible en su implementación. Los resultados mencionados se muestran, a continuación, en la Ilustración 4-16 junto a la identificación de las principales zonas en estudio.



*Ilustración 4-16. Patrones de sedimentación (verde) y erosión (rojo) después de un año de simulación con el modelo numérico implementado en DELFT3D y la identificación de las zonas de estudio.*

Tal y como se ha mencionado, la Ilustración 4-16 muestra las diferencias costeras entre el inicio y el final de un año de simulación. Debido a que las corrientes no se han calibrado con precisión y las tasas de aportación de sedimentos por los arroyos generados por el deshielo tampoco son precisas, no se han mostrado los valores

obtenidos para la acreción o rebajamiento en cada uno de los puntos resultantes del modelo, ya que no necesariamente representan el valor real de su variación tras un año real. Aun así, sus valores sí que representan las tendencias o patrones de sedimentación y erosión en la línea de costa de Port Foster con el paso del tiempo.

Los patrones obtenidos en este modelo muestran que la erosión se concentra en gran parte de la bahía Port Foster, destacando en el área norte (zona 1 - rojo - Ilustración 4-16), una pequeña área al oeste de la isla (zona 2 - rojo - Ilustración 4-16) y al este de la entrada de Port Foster (zona 3 - rojo - Ilustración 4-16), donde se encuentra el Lago Kroner. Mientras tanto, la sedimentación domina en extensas áreas de la costa ubicada al sur (zona 6 - verde - Ilustración 4-16), en la costa bajo el Glaciar Negro (zona 4 - verde - Ilustración 4-16) y en el área ubicada frente al Lago Kroner (zona 5 - verde - Ilustración 4-16), probablemente siendo este emplazamiento donde se acumule el sedimento erosionado en la denominada “zona 3”.

El modelo muestra que la erosión de esta línea costera es sensible en la frontera con la orientación sur. La erosión representada en el modelo dentro de los diferentes lagos (Lago Escondido y Lago Kroner) y las intrusiones de tierra (noroeste de la zona 6 - Ilustración 4-16) se atribuye a varios factores. Además de la influencia de las mareas y demás parámetros que definen las corrientes simuladas que varían el nivel del mar en el modelo, precisamente estas áreas interiores de los lagos tienen implementados puntos de descarga de los arroyos en el modelo, por lo que se dispone de aportación de flujo y sedimento procedente del deshielo. Este fenómeno crea zonas con una mayor interacción entre la deposición de sedimentos y su recolección por las mareas, que posteriormente serán transportados a otras áreas de la bahía, proporcionando como resultado que parte de los sedimentos tiende a acumularse en las salidas de los lagos, mientras su interior presenta valores de erosión.

## 4.5 Discusión de los resultados

Como conclusión a todos los resultados expuestos procedentes de los distintos estudios realizados, así como del modelo hidrodinámico realizado en DELFT3D, se realiza la contrastación de estos entre sí para llevar a cabo la validación de los resultados del modelo. Para facilitar la comparación de estos resultados y su seguimiento se ha empleado como apoyo la identificación de las zonas de estudio mostradas en la Ilustración 4-16.

El posible material erosionado obtenido en el estudio altimétrico producto de realizar las diferencias entre los modelos de elevación del terreno basados en la pérdida de material en la cuenca interna (color rojo anaranjado en la Ilustración 4-3 (a)) es más importante en la zona este. Las plumas de sedimentación temporal dibujadas en la Ilustración 4-3 (d) en el área recientemente mencionada, muestran una descarga activa continua y alta de tefra.

La evaluación y relleno de la mayoría de los cráteres de la última erupción (Ilustración 4-4) debido al desplazamiento activo de material hacia arriba desde los abanicos aluviales del Monte Goddard, es una muestra de esta actividad y de por qué se dan las altas tasas de sedimentación en este sector de la Isla Decepción.

Al analizar la evolución de la línea de costa a partir de ortofotos, la presencia de sombras puede suponer un desafío, incluso cuando se utilizan imágenes con alto contraste debido al ruido que estas disponen. Las sombras pueden oscurecer y distorsionar la línea de costa, dificultando la definición precisa de sus límites. Es importante tener en cuenta el impacto de estas sombras al interpretar y analizar los cambios en la línea de costa, ya que pueden afectar la precisión de los resultados. Por este motivo, se han empleado técnicas adicionales, como la mejora de la imagen mediante cambios en su estructura gráfica y la realización de una minuciosa interpretación visual, para mitigar los efectos de las sombras y obtener la máxima precisión de la delineación de la línea de costa.

En el análisis visual de los cambios en la línea de costa (Ilustración 4-8), se ha observado una erosión significativa en las áreas emplazadas al norte y noroeste de Port Foster (zona 1- Ilustración 4-8 e Ilustración 4-13) desde la última erupción, especialmente hasta 2003, cuando hubo una erosión significativa debido al transporte de los materiales depositados tras las erupciones de finales de los años 60. Entre 2003 y 2020, se observa un cambio notable, que es la apertura del Lago Escondido. En cambio, en el sur de la isla (zona 6 - Ilustración 4-8) hay una ligera erosión, aunque con una tasa de avance menor en comparación con el norte y que representa la erosión producida en la pendiente frente a las bases argentina y española (Ilustración 4-11 e Ilustración 4-12).

La discrepancia entre la erosión observada visualmente (Ilustración 4-8) y los resultados del modelo numérico (Ilustración 4-16) se puede atribuir a ciertas limitaciones del modelo. Una de estas limitaciones es la incapacidad

del modelo numérico para representar con precisión la erosión causada por el deshielo en los taludes, especialmente cuando la superficie de estos taludes está elevada en relación a la línea de costa. El proceso anual de deshielo puede llevar a la erosión de las pendientes a medida que el agua de deshielo derretida fluye sobre ellas mientras transporta sedimentos, desgastando gradualmente la superficie expuesta, siendo este el posible factor al que se atribuye el retroceso del talud frente a las bases, junto al golpeo de la banquisa en su proceso de deshielo.

Dado que el modelo numérico puede no incorporar representaciones detalladas de los procesos de erosión por deshielo en los taludes, es posible que no represente completamente la erosión observada en el campo. La erosión producida por el deshielo está influenciada por factores como son la pendiente, las características de la superficie y los patrones de deshielo, que son difíciles de simular con precisión en un modelo numérico. Por lo tanto, al comparar los resultados del modelo con la erosión observada visualmente, es importante tener en cuenta las limitaciones del modelo, especialmente en lo que respecta a la representación de los procesos de erosión por deshielo en las pendientes, representando únicamente la línea de costa.

En cuanto a la sedimentación (Ilustración 4-8), la parte oriental de la isla, en particular alrededor del Glaciar Negro, muestra áreas significativas de deposición de sedimentos, especialmente notable hasta 2003. Hay una acumulación sustancial de sedimentos en la parte sureste de la isla, siguiendo la terminación del Glaciar Negro (zona 4 - Ilustración 4-10). Además, se observa una notable característica de erosión en el centro del Glaciar Negro, lo que indica una pérdida sustancial de material en esa área (zona 4 - Ilustración 4-9). Estas observaciones destacan la naturaleza dinámica de la línea de costa y el impacto de diversos factores en los procesos de erosión y sedimentación, ya que el segundo fenómeno detallado que implica el retroceso del Glaciar Negro probablemente sea fruto del deshielo y el aumento de las temperaturas medias globales.

La entrada a la bahía también muestra áreas de sedimentación y erosión. Un cambio notable es la apertura de la entrada al Lago Kroner, que ocurrió entre 1968 y 2003, como se muestra en la Ilustración 1-4. Este cambio sugiere una alteración significativa en la dinámica costera, que condujo a la formación de una abertura donde el lago ahora se conecta con la bahía.

El contraste entre la Ilustración 4-8 y el análisis batimétrico en la Ilustración 4-7 (c) muestra una clara coherencia entre la línea de costa más erosionada y el lecho marino más cercano en las zonas 1, 2 y 3. Además de esto, las áreas de sedimentación también son similares, con un notable relleno ocurrido entre la última erupción (1970) y el año 2003 en la parte sur del Glaciar Negro. Este evento corresponde a la zona 2 indicada en la Ilustración 4-7 (c) y a su vez se ha representado en la Ilustración 4-10. Solo se observa una discrepancia en las acreciones/erosiones obtenidas en la desembocadura de la Isla (Neptune Bellows), que se debe probablemente a la falta de precisión en los datos disponibles de aquella zona o a que las corrientes allí son más fuertes y requieren de una calibración más extensa. Es importante tener en cuenta que el modelo en este estudio no incluye corrientes de oleaje en la desembocadura de la isla. Su omisión se debe a la falta de información disponible y a que el estudio no se centra en el estudio de las corrientes de oleaje. Por lo tanto, el modelo se ha enfocado principalmente en otros factores como son las corrientes de marea y los procesos morfodinámicos.

Para contrastar los resultados obtenidos en el modelo y en los diferentes estudios del presente Trabajo de Fin de Máster, se ha comprobado la concordancia entre estos y los expuestos en otras tesis o artículos científicos. En el estudio realizado por Flexas et al. [20], se concluye que el alto gradiente de temperatura del nivel del mar a través de Neptune's Bellows, causado por el flujo noroeste de la Corriente de Bransfield, deriva en la acumulación de agua hacia el muro noreste de la entrada de Port Foster. Este estudio sugiere que las mareas internas se propagan hacia el oeste en dirección antihoraria, creando áreas de sombra en el lado este de la bahía.

Estos hallazgos son consistentes con los resultados presentados en las figuras anteriores, en particular con los resultados derivados del modelo representados en la Ilustración 4-16. Esta figura ilustra la erosión que ocurre principalmente en la mitad occidental de toda la bahía interior, concentrando su actividad en el norte de la isla y prolongándola hacia el suroeste de la bahía, produciendo la apertura de la entrada al Lago Kroner (zonas 1, 2, 4 y área ubicada al oeste de la zona 6 representadas en Ilustración 4-16). Además, esta figura muestra tasas de sedimentación más bajas en la parte oriental de la bahía interior y en la zona occidental de la entrada a la isla (zona 4 y zona 5 de la Ilustración 4-16), siendo acorde con lo expuesto en [20].

En el estudio realizado por Berrocoso et al [52], se analiza la directa relación entre la evolución y distribución de la temperatura del agua de la bahía de Port Foster y la actividad sísmica y volcánica de la Isla Decepción, concluyendo la posible relación entre la reanudación de la actividad hidrotermal de su volcán con un aumento

de la temperatura del agua de mar. De este estudio se puede extraer su modelo de circulación de agua sobre las mareas, en el que se expone que el agua fría del mar de Bransfield pasa a través de Neptune's Bellows hacia el interior de la bahía, y el agua más cálida ubicada en las proximidades del lecho caliente, fumarolas y manantiales termales del sector norte del interior de la bahía luego circula hacia los fuelles de Neptuno.

Este modelo del ciclo seguido por el agua es acorde a lo obtenido en los resultados del presente Trabajo de Fin de Máster, reflejándose como una erosión predominante en la zona norte de la isla, donde finaliza el recorrido de las aguas frías al mezclarse con las calientes y, en cuyo proceso de cambio de sentido puede ayudar al proceso de erosionado.

Figueiredo realizó un modelo hidrodinámico de Port Foster en su tesis [53] cuyo objetivo final era disponer de un modelo baroclínico tridimensional con el que comprender la hidrodinámica de Port Foster en la dispersión de elementos como el mercurio, teniendo en cuenta el papel de las mareas, batimetría, la estratificación de la columna de agua y el viento. Para ello se simuló el desplazamiento durante un mes de unas partículas de mercurio depositadas en diversos áreas del sur y oeste de la isla, concluyendo que hay un pobre intercambio de partículas entre Port Foster y sus alrededores, dado el bajo desplazamiento de estas.

Estos resultados resultan poco acordes a los obtenidos tras el análisis de cambios en la línea de costa y en el modelo hidrodinámico realizado, en el que sí que se observa un importante desplazamiento de material dentro de la bahía, depositándose en el área este de esta, habiendo registrado grandes acumulaciones de sedimento en esta zona. La discordancia en esta conclusión puede deberse a que en [53] se simula únicamente un mes como periodo de estudio, aunque no se pueden sacar conclusiones significativas de ello.

Si los resultados ofrecidos por este modelo se mantienen a lo largo del tiempo, las rutas de evacuación a lo largo de la costa interior y la accesibilidad a las bases científicas activas no se verán afectadas, debido a que están establecidas en áreas sedimentarias. Sin embargo, el análisis de cambios visuales ha representado la situación contraria, ya que sí que se produce el retroceso del talud frente a las bases, el cual se encuentra fuera del alcance del modelo debido a su altura respecto de la línea de costa.

Finalmente, el retroceso del Glaciar Negro no puede relacionarse con la acción del oleaje, donde este modelo define una zona sedimentaria, por lo que, tal y como se ha detallado en varias ocasiones durante el presente Trabajo de Fin de Máster, probablemente se debe a los cambios de temperatura generalizado mundialmente que está produciendo el cambio climático.

Con estos resultados, se puede concluir que el modelo simula correctamente los cambios en la línea de costa de Port Foster si se atiende a su definición como tal y se tienen en cuenta sus limitaciones, permitiendo ser usado como una herramienta de apoyo futura con la que conocer la tendencia deposicional del área de estudio si se implementan mejoras en la toma de datos que permitan obtener valores más próximos a la realidad anual de la línea de costa de la bahía interior de la Isla Decepción.

Este modelo podría mejorar en cráteres/lagos sumergidos donde solo se obtuvo erosión, y sería necesario incluir cambios en la presión del aire y el viento en más puntos de la isla para introducir variación espacial y temporal, así como un estudio de campo exhaustivo con diferentes ubicaciones de mareas y corrientes para calibrar y validar de manera más precisa el modelo. Además, podría considerarse una mejora del mismo el dotarlo de la capacidad de representación de la banquisa de hielo en la capa más superficial de la bahía en el periodo de tiempo que esta se genera.



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE ESTUDIO FUTURAS

El último capítulo del presente Trabajo de Fin de Máster se reserva para la exposición de las conclusiones obtenidas tras la realización de diversos estudios sobre los cambios observados en la morfología de la Isla Decepción y la definición aquellas áreas de su bahía interior que son más susceptibles de sufrir modificaciones con el paso del tiempo.

### 5.1 Conclusiones

Este Trabajo incluye un modelo numérico hidrodinámico capaz de evaluar las tendencias futuras en la costa interior de la Isla Decepción. Su bahía es la principal área de movilidad de investigadores y turistas para desarrollar sus actividades a pie o en barco. Sus variaciones futuras podrían afectar a las rutas de evacuación debido a peligros volcánicos o deshabilitar ciertas rutas a pie, por lo que es importante modelar y evaluar la evolución temporal de esta, ya sea en tiempos pasados como futuros.

Este área es complicada de estudiar en términos climáticos y de ubicación. El largo período de cobertura de hielo deja solo la temporada de verano como ventana de estudio. Además, la cantidad de días nublados es predominante y limita la recopilación de imágenes satelitales claras. De esta manera, solo se dispone de unas pocas imágenes satelitales históricas y ciertos fotogramas aéreos. Los datos cartográficos también son un problema notable, dadas sus limitaciones. La falta de una actualización continua de datos en esta zona sin gobierno hace necesario combinar diversas fuentes históricas y encontrar metodologías para compararlas adecuadamente con alta precisión. Afortunadamente, en los últimos años, la proyección cartográfica, los sistemas geodésicos y el modelo de alturas geoidales están mejor definidos. Este estudio utiliza datos históricos con incertidumbres principalmente superiores a un metro y algunos datos de campo. Aunque se han aplicado técnicas de remuestreo y se han definido rangos de pendiente, las diferencias altimétricas y batimétricas muestran valores altos y las tendencias espacio-temporales no ofrecen significancia estadística en todos los estudios temporales.

El modelo hidrodinámico se ha implementado en el módulo FLOW incluyendo la ecuación de transporte de sedimentos. El modelo se ha forzado con condiciones de contorno en mareas correspondientes a 10 constituyentes de mareas obtenidas en estudios previos. Además, se ha definido un campo de viento uniforme en el espacio que varía en el tiempo, utilizando datos horarios de AEMET. Se ha obtenido una excelente concordancia para los niveles de marea. En ausencia de datos medidos reales, se ha realizado un estudio de sensibilidad de las corrientes para hacer una estimación. Se ha observado que al variar el coeficiente de Chèzy, el cambio en las corrientes no fue significativo (3%), por lo que las corrientes se consideran válidas. El patrón de transporte de sedimentos en el interior de la bahía solo puede ser inducido por las corrientes y el viento, por lo que estas fuerzas son suficientes para determinar las tendencias de acreción/erosión. Los resultados obtenidos del modelo DELFT3D para los cambios de erosión/sedimentación en la línea de costa durante todo un año siguen la misma tendencia que los obtenidos de los estudios batimétricos realizados durante los años 1991-2012. Por lo tanto, la fiabilidad de los resultados es alta. Los cambios batimétricos en áreas cercanas a la costa y las plumas sedimentarias derivadas de la actividad de fusión son consistentes con el modelo. La erosión de esta línea de costa es significativa en la frontera con la orientación sur y norte, donde el sendero a pie podría verse afectado. Si los resultados ofrecidos por este modelo se mantienen a lo largo del tiempo, las rutas de evacuación a lo largo de la costa interior y la accesibilidad a las bases científicas activas no se verán afectadas, debido a que están establecidas en áreas sedimentarias. Sin embargo, el análisis de cambios visuales ha representado la situación contraria, ya que sí que se produce el retroceso del talud frente a las bases, el cual se encuentra fuera del alcance del modelo debido a su altura respecto de la línea de costa.

Este modelo podría mejorar en cráteres/lagos sumergidos donde solo se obtuvo erosión, y sería necesario incluir cambios en la presión del aire y el viento en más puntos de la isla para introducir variación espacial y temporal,

así como un estudio de campo exhaustivo con diferentes ubicaciones de mareas y corrientes para calibrar y validar de manera más precisa el modelo. Además, podría considerarse una mejora del mismo el dotarlo de la capacidad de representación de la banquisa de hielo en la capa más superficial de la bahía en el periodo de tiempo que esta se genera.

En base a los resultados que se han mostrado en el capítulo 4 Resultados queda patente que se está produciendo erosión a un ritmo mucho más acelerado del que anteriormente disponía la isla, probablemente debido al efecto del cambio climático que implica que se den temperaturas más altas, las cuales provocan que el permafrost que en fechas anteriores mantenía el suelo compacto ante la ausencia de vegetación, ahora se encuentre más profundo, es decir, las capas más someras son movidas con mayor facilidad que en el pasado.

Los cráteres que se generaron en las erupciones del año 70 están prácticamente rellenos completamente de sedimento, dándose este proceso a un ritmo superior incluso al previsto en el artículo [54]. Algunos de los lagos que anteriormente se encontraban aislados (Lago Escondido o Lago Kroner), debido a la fuerte erosión en dichas ubicaciones de la isla se han abierto, convirtiéndose en parte de la bahía interior de la Isla Decepción. Mismamente le ocurre al Glaciar Negro, que está sufriendo en su parte central un importante retroceso debido a la erosión generada en el deshielo.

Finalmente, en menos de 15 años, cuatro cráteres del último evento se llenaron casi por completo con valores de hasta 9 m. Estas diferencias altimétricas, junto con las modificaciones batimétricas encontradas, requieren la adquisición de nuevos DEM precisos, tal vez con vehículos aéreos no tripulados (UAV) en vuelo, una nueva batimetría y mediciones del deshielo de la nieve para mejorar y validar el modelo.

## 5.2 Líneas de estudio futuras

Las líneas de estudio futuras de este Trabajo se encuentran directamente relacionada con la realización de nuevas visitas a la Isla Decepción en las que tomar datos de campo actualizados que permitan continuar con el estudio realizado.

Entre las posibles líneas de estudio futuras, sería posible realizar la propuesta de realización de un nuevo vuelo de la isla con el que realizar modelos de elevación del terreno con mayor precisión que los proporcionados por vía satelital, ya que estos por debajo de 5 metros proporcionan valores con menor exactitud, por lo que podría ser conveniente valorar la realización de un vuelo aéreo o con dron de ala fija con puntos de apoyo en zonas altas que permitiera definir con gran resolución el modelo digital de elevación del terreno de la Isla Decepción.

Esto permitiría evaluar con mayor exactitud los cambios que se han producido en la geomorfología de la isla y delinear correctamente la línea de costa actual de la bahía interior de esta. Sería conveniente realizar esta actividad con cierta periodicidad, que permita mantener un seguimiento adecuado de la evolución de la Isla Decepción.

Así mismo, sería interesante disponer de un mayor número de puntos de referencia dentro de la isla, especialmente en su área noreste, con los que poder realizar una mejor georreferenciación de los datos disponibles y futuribles, lo que reforzaría la comparación de los valores obtenidos en los modelos digitales de elevación del terreno o batimétricos.

Además, la realización de una inspección en campo con la que poder medir los caudales vertidos por los arroyos fruto del deshielo, junto a la toma de datos de la masa de sedimentos transportada por los mismos, permitiría seguir mejorando el modelo en la búsqueda de unos resultados más precisos que permitan ayudar a estimar la evolución de la línea de costa de su bahía, Port Foster.

## REFERENCIAS

- [1] C. Torrecillas., C. Zarzuelo., J. D. I. Fuente., B. Jigena. y G. Prates, «Evaluation and modelling of the coastal geomorphological changes of Deception Island since 1970 eruption and its involvement in research activity,» *Remote sensing*, 2023.
- [2] J. Dibbern, «Fur Seals, Whales and Tourists: A Commercial History of Deception Island, Antarctica.» *Polar Record* , vol. 2, nº 13, pp. 46, 210–221, doi:10.1017/S0032247409008651., 2010.
- [3] A. Cooper, J. Smellie y J. Maylin, «Evidence for Shallowing and Uplift from Bathymetric Records of Deception Island, Antarctica,» *Antarct Sci*, pp. 10, 455–461., 1998.
- [4] C. Torrecillas y M. Berrocoso, «The Multidisciplinary Scientific Information Support System SIMAC ) for Deception Island. Antarctica,» pp. 397–402, doi:10.1007/3-540-32934-X\_50, 2006.
- [5] C. Torrecillas, M. Berrocoso, R. Pérez-López y M. Torrecillas, «Determination of Volumetric Variations and Coastal Changes Due to Historical Volcanic Eruptions Using Historical Maps and Remote-Sensing at Deception Island (West-Antarctica),» *Geomorphology 2012*, pp. 136, 6–14, doi:10.1016/, 17 06 2011.
- [6] P. Baker, M. a. Roobol, S. Davies, I. McReath y M. Harvey, «The Geology of the South Shetland Islands: V. Volcanic Evolution of Deception Island.,» *British Antarctic Survey Scientific Reports* , pp. 78-79, 1975.
- [7] J. Smellie, J. López-Martínez, R. Headland, F. Hernández-Cifuentes, A. Maestro, I. Millar, J. Rey, E. Serrano, L. Somoza y J. T. M. Thomson, «Geology and Geomorphology of Deception Island,» *British Antarctic Survey: Cambridge*, 2002.
- [8] J. Smellie, «Lithostratigraphy and Volcanic Evolution of Deception Island, South Shetland Islands.,» *Antarct Sci* , pp. 13, 188–209, doi:10.1017/S0954102001000281, 2001.
- [9] C. Clapperton, «The Volcanic Eruption At Deception Island, December 1967.,» *British Antarctic Survey Bulletin* , p. 83–90, 1969.
- [10] J. Smellie, «The 1969 Subglacial Eruption on Deception Island (Antarctica): Events and Processes during an Eruption beneath a Thin Glacier and Implications for Volcanic Hazards,» 2002.
- [11] A. Aristarain y R. Delmas, «Ice Record of a Large Eruption of Deception Island Volcano (Antarctica) in the XVIIth Century,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , pp. 80, 17–25, doi:10.1016/S0377-0273(97)00040-1, 1998.
- [12] K. Birkenmajer, «Lichenometric Dating of a Mid-19th Century Lava Eruption on Deception Island (West Antarctica),» *Bulletin - Polish Academy of Sciences: Earth Sciences* , pp. 39, 467–475, 1991.
- [13] V. Jiménez-Morales, J. Almendros y E. Carmona, «Long-Term Evolution of the Seismic Activity Preceding the 2015 Seismic Crisis at Deception Island Volcano, Antarctica (2008-2015),» *Surv Geophys*, pp. 43, 959–994, doi:10.1007/S10712-021-09690-0/FIGURES/14, 2022.

- [14] J. Ibanez, J. Morales, G. Alguacil, J. Almendros, R. Ortiz, E. D. Pezzo, A. Posadas y F. Luzon, «Regional Seismic Activity around Livingston and Deception Islands from 1992 to 1996: Shallow and Intermediate-Depth Earthquakes,» *Boletín - Real Sociedad Española de Historia Natural: Sección Geológica*, pp. 93, 95–103, 1997.
- [15] M. Roobol, «A Model for the Eruptive Mechanism of Deception Island from 1820 to 1970.,» *British Antarctic Survey Bulletin*, pp. 49, 137–156, 1980.
- [16] R. Ortiz, J. Vila, A. Garcia, A. Camacho, J. Diez, A. Aparicio, R. Soto, J. Viramonte, C. Risso, I. Petrinovic y e. al., Geophysical Features of Deception Island. In *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Yo-shida, Japón: Terrapub, 1992.
- [17] M. Berrocoso, C. Torrecillas, B. Jigena y A. Fernández-Ros, «Determination of Geomorphological and Volumetric Variations in the 1970 Land Volcanic Craters Area (Deception Island, Antarctica) from 1968 Using Historical and Current Maps, Remote Sensing and GNSS,» *Antarct Sci*, pp. 24, 367–376, doi:10.1017/S0954102012000193, 2012.
- [18] C. Hans Nelson, C. Bacon, S. Robinson, D. Adam, J. Platt Bradbury, J. Barber, D. Schwartz y G. Vagenas, «The Volcanic, Sedimentologic, and Paleolimnologic History of the Crater Lake Caldera Floor, Oregon: Evidence for Small Caldera Evolution,» *Geol Soc Am Bull*, pp. 106, 684–704, doi:10.1130/0016-7606(1994)106<0684:TVSAPH>2.3.CO;2, 1994.
- [19] M. Roobol, «Historic Volcanic Activity at Deception Island,» *British Antarctic Survey Bulletin*, pp. 23–30, 1973.
- [20] M. Flexas, M. Arias y M. Ojeda, «Hydrography and Dynamics of Port Foster, Deception Island, Antarctica,» *Antarct Sci*, pp. 29, doi:10.1017/S0954102016000444, 2017.
- [21] B. Jigena Antelo, J. Vidal y M. Berrocoso, «Determination of the Tide Constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), Using Annual Time Series,» *Dyna (Medellin)*, pp. 82, 209–218, doi:10.15446/dyna.v82n191.45207, 2015.
- [22] S. G. d. E. U. A. d. Madrid, «Deception Island Map 1:25.000. Spanish Antarctic Cartography. New Topographic Map of Deception Island 1:5000.,» Madrid, 2006.
- [23] B. Rosado, A. Fernández-Ros, M. Berrocoso, G. Prates, J. Gárate, A. deGil y A. Geyer, «Volcano-Tectonic Dynamics of Deception Island (Antarctica): 27 years of GPS Observations (1991–2018),» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 381, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.05.009, 2019.
- [24] M. Berrocoso, A. Fernández-Ros, M. Ramírez, J. Salamanca, C. Torrecillas, A. Pérez-Peña, R. Páez, A. García-García, Y. Jiménez-Teja, F. García-García y e. al., «Geodetic Research on Deception Island and Its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) During Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). In *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica*,» *Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg*, pp. 97–124, 2008.
- [25] I. Howat, C. Porter, B. Smith, M. Noh y P. Morin, «The Reference Elevation Model of Antarctica.,» *Cryosphere*, pp. 13, 665–674, doi:10.5194/TC-13-665-2019, 2019.
- [26] G. Prates, C. Torrecillas, M. Berrocoso, G. Goyanes y G. Vieira, «Deception Island 1967–1970 Volcano Eruptions from Historical Aerial Frames and Satellite Imagery (Antarctic Peninsula),» *Remote Sensing*, pp. Vol. 15, Page 2052 2023, 15, 2052, doi:10.3390/RS15082052, 2023.

- [27] B. Jigena, M. Berrocoso, C. Torrecillas, J. Vidal, I. Barbero y A. Fernandez-Ros, «Determination of an Experimental Geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica,» *Antarct Sci*, pp. 28, 1–16, doi:10.1017/S0954102015000681, 2016.
- [28] J. Hopfenblatt, A. Geyer, M. Aulinas, A. Álvarez-Valero, G. Gisbert, G. Kereszturi, G. Ercilla, M. Gómez-Ballesteros, A. Márquez, D. García-Castellanos y e. al., «Formation of Stanley Patch Volcanic Cone: New Insights into the Evolution of Deception Island Caldera (Antarctica).» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp. 415, 107249, doi:10.1016/J.JVOLGEORES.2021.107249, 2021.
- [29] L. Somoza, J. Martínez-Frías, J. Smellie, J. Rey, A. Maestro, J. Martínez-Frías, J. Smellie, J. Rey, A. Maestro, J. Martínez-Frías y e. al., «Evidence for Hydrothermal Venting and Sediment Volcanism Discharged after Recent Short-Lived Volcanic Eruptions at Deception Island, Bransfield Strait, Antarctica,» *Mar Geol*, pp. 203, 119–140, doi:10.1016/S0025-3227(03)00285-8, 2004.
- [30] A. Barclay, W. Wilcock, J. Ibanez y J. Ibáñez, «Bathymetric Constraints on the Tectonic and Volcanic Evolution of Deception Island Volcano, South Shetland Islands,» *Antarct Sci*, pp. 21, 153–167, doi:10.1017/S0954102008001673, 2009.
- [31] B. Jigena Antelo, J. Vidal y M. Berrocoso, «Determination of the Tide Constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), Using Annual Time Series,» *Dyna (Medellin)*, pp. 82, 209–218, doi:10.15446/dyna.v82n191.45207, 2015.
- [32] B. Jigena, J. Vidal y M. Berrocoso, «Determination of the Mean Sea Level at Deception and Livingston Islands, Antarctica,» *Antarct Sci*, pp. 27, 101–102, doi:10.1017/S0954102014000595, 2014.
- [33] K. Smith, «Underway Hydrographic, Weather and Ship-State Data (JGOFS) from Laurence M. Gould Expedition LMG0010 (2000),» *Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA)*, 2014.
- [34] C. Smith, «Underway Hydrographic, Weather and Ship-State Data (JGOFS) from Laurence M. Gould Expedition LMG0102 (2001),» *Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA)*, 2012.
- [35] R. Blanchette, «Underway Hydrographic, Weather and Ship-State Data (JGOFS) from Laurence M. Gould Expedition LMG0704 (2007),» *Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA)*, 2010.
- [36] D. Leger, «Underway Hydrographic, Weather and Ship-State Data (JGOFS) from Laurence M. Gould Expedition LMG0712 (2007),» *Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA)*, 2009.
- [37] R. Blanchette, «Underway Hydrographic, Weather and Ship-State Data (JGOFS) from Laurence M. Gould Expedition LMG0903 (2009),» *Interdisciplinary Earth Data Alliance (IEDA)*, 2011.
- [38] A. Fremand, «A Bathymetric Compilation of the South Shetland Islands, 1991-2017,» *British Antarctic Survey*, 2019.
- [39] G. Lesser, J. Roelvink, J. van Kester y G. Stelling, «Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model,» *Coastal Engineering*, pp. 51, 883–915, doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.014, 2004.
- [40] L. Van Rijn, «Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas,» 1993.
- [41] L. Van Rijn, «Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport,» *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 133, 649–667, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(649), 2007.

- [42] Y.-D. Lenn, T. Chereskin y R. Glatts, «Seasonal to Tidal Variability in Currents, Stratification and Acoustic Backscatter in an Antarctic Ecosystem at Deception Island.» *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Ocean-ography*, pp. 50, 1665–1683, doi:10.1016/S0967-0645(03)00085-7, 2003.
- [43] J. Vidal, M. Berrocoso y B. Jigena, «Hydrodynamic Modeling of Port Foster, Deception Island (Antarctica). In Nonlinear and Complex Dynamics,» *Springer New York: New York, NY*, p. 193–203, 2011.
- [44] M. Eelkema, Z. Wang y M. Stive, «Impact of Back-Barrier Dams on the Development of the Ebb-Tidal Delta of the Eastern Scheldt,» *J Coast Res*, pp. 285, 1591–1605, doi:10.2112/JCOASTRES-D-11-00003.1, 2012.
- [45] P. Dissanayake y A. Wurpts, «Modelling an Anthropogenic Effect of a Tidal Basin Evolution Applying Tidal and Wave Boundary Forcings: Ley Bay, East Frisian Wadden Sea,» *Coastal Engineering*, pp. 82, 9–24, doi:10.1016/j.coastaleng.2013.08.005, 2013.
- [46] A. Luijendijk, R. Ranasinghe, M. de Schipper, B. Huisman, C. Swinkels, D. Walstra y M. Stive, «The Initial Morphological Response of the Sand Engine: A Process-Based Modelling Study,» *Coastal Engineering*, pp. 119, 1–14, doi:10.1016/j.coastaleng.2016.09.005, 2017.
- [47] C. Zarzuelo, A. López-Ruiz y M. Ortega-Sánchez, «Evaluating the Impact of Dredging Strategies at Tidal In-lets: Performance Assessment,» *Science of The Total Environment*, pp. 658, 1069–1084, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2018.12.227, 2019.
- [48] M. Berrocoso, C. Torrecillas, B. Jigena y A. Fernández-Ros, «Determination of Geomorphological and Volumetric Variations in the 1970 Land Volcanic Craters Area (Deception Island, Antarctica) from 1968 Using Historical and Current Maps,» *Remote Sensing and GNSS. Antarct Sci*, pp. 24, 367–376, doi:10.1017/S0954102012000193, 2012.
- [49] F. Leitão, A. Neto y R. Vieira, «MORPHOLOGICAL AND SEDIMENTARY CHARACTERIZATION THROUGH ANALYSIS OF MULTIBEAM DATA AT DECEPTION ISLAND, ANTARCTIC,» *Revista Brasileira de Geofísica*, pp. 34, doi:10.22564/rbgf.v34i2.792, 2016.
- [50] J. Nienhuis, A. Ashton, W. Nardin, S. Fagherazzi y L. Giosan, «Alongshore Sediment Bypassing as a Control on River Mouth Morphodynamics,» *J Geophys Res Earth Surf*, pp. 121, 664–683, doi:10.1002/2015JF003780, 2016.
- [51] B. Jigena, J. Vidal y M. Berrocoso, «Determination of the Mean Sea Level at Deception and Livingston Islands, Antarctica,» *Antarct Sci*, pp. 27, 101–102, doi:10.1017/S0954102014000595, 2015.
- [52] M. Berrocoso, G. Prates, A. Fernández-Ros, L. Peci, A. de Gil, B. Rosado, R. Páez y B. Jigena, «Caldera Unrest Detected with Seawater Temperature Anomalies at Deception Island, Antarctic Peninsula,» *Bull Volcanol*, pp. 80, doi:10.1007/s00445-018-1216-2, 2018.
- [53] D. M. Figueiredo, «Hydrodynamic Modelling of Port Foster (Deception Island, Antarctica),» 2015.
- [54] M. Berrocoso, C. Torrecillas, B. Jigena y A. Fernández-Ros, «Determination of Geomorphological and Volumetric Variations in the 1970 Land Volcanic Craters Area (Deception Island, Antarctica) from 1968 Using Historical and Current Maps,» *Remote Sensing and GNSS. Antarct Sci*, pp. 24, 367–376, doi:10.1017/S0954102012000193, 2012.
- [55] J. Almendros, E. Carmona, V. Jiménez, A. Díaz-Moreno y F. Lorenzo, «Volcano-Tectonic Activity at

- Deception Island Volcano Following a Seismic Swarm in the Bransfield Rift (2014–2015),» *Geophys Res Lett* , pp. 45, 4788–4798, doi:10.1029/2018GL077490, 2018.
- [56] D. Martins Figueiredo, A. José Pinto dos Santos y M. Duarte Mateus, «Hydrodynamic Modelling of Port Foster (Deception Island, Antarctica) Implementation of a Two-Dimensional Tidal Model and an Approach on the Three-Dimensional Model as Well as Generation of Internal Waves Engenharia Do Ambiente,» 2015.
- [57] M. Berrocoso, A. García-García, J. Martín-Dávila, M. Catalán-Morollón, M. Astiz, M. Ramírez, C. Torrecillas y J. Enríquez de Salamanca, «Geodynamical Studies on Deception Island: DECVOL and GEODEC Projects in Antarctica,» *Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg*, p. 283–287, 2006.
- [58] M. Berrocoso, A. Fernández-Ros, C. Torrecillas, J. Enríquez de Salamanca, M. Ramírez, A. Pérez-Peña, M. González, R. Páez, Y. Jiménez, A. García-García y e. al., «Geodetic Research on Deception Island. In Antarctica,» *Springer-Verlag: Berlin/Heidelberg*, pp. 391-396, 2006.
- [59] H. Brecher, «Photogrammetric Maps of a Volcanic Eruption Area, Deception Island, Antarctica,» *Institute of Polar Studies*, 1975.
- [60] D. o. O. S. (D.O.S.), «Deception Island Map 1:25.000,» 1959.
- [61] F. Casu, A. Manconi, A. Pepe y R. Lanari, «Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 49, 2752–2763, doi:10.1109/TGRS.2010.210432, 2011.
- [62] R. De la Vega-Panizo, A. Garmendia, C. Paredes y M. Roper, «Detección y Análisis de Movimientos Del Terreno Mediante Técnicas D-InSAR En La Isla Decepción (Antártida),» *Universitat Politecnica de Valencia*, 11 Octubre 2021.
- [63] M. Castillo, J. Calvet, F. Pérez y V. Palá, «SAR Interferometry in South Shetland Islands: Numerical Elevation Model of Deception Island.,» 1999.
- [64] A. Braun y L. Veci, «TOPS Interferometry Tutorial,» 2020.