



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Tesis para obtener título de grado en Geofísica

DESARROLLO DE UNA BASE DE DATOS DE ANOMALÍAS
DE GRAVEDAD EN EL MARGEN CONTINENTAL
ARGENTINO

Autor: Marco Antonio Neri Lagoria

Directora: Dra. Ana Carolina Pedraza De Marchi

Co-director: Dr. Andreas Richter

LA PLATA, ARGENTINA

- ABRIL DE 2023 -

Firma del tribunal examinador:

Dra. Ana Carolina Pedraza De Marchi

Dra. Claudia Noemí Tocho

Dr. Ezequiel Darío Antokoletz



Facultad de Ciencias
**Astronómicas
y Geofísicas**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata, por brindarme una educación pública de excelentísima calidad durante tantos años.

A mis directores Ana Carolina Pedraza De Marchi y Andreas Richter, por acompañarme con su confianza y encaminarme pacientemente a lo largo de este extenso trabajo.

A mis jurados Claudia Tocho y Ezequiel Antokoletz, por brindarme sus colaboraciones, correcciones, paciencia, atención y predisposición.

A las agencias BGR y BGI, por realizar las mediciones de gravimetría que posibilitan este trabajo, y a Marta Ghidella, por permitirme el acceso a ellas.

A todos mis compañeros de la facultad, por su amistad y el tiempo compartido a lo largo de estos años, durante los cuales compartimos momentos inolvidables. En particular, a mi amigo Fede, con quien compartí largas tardes de estudio y charla en el glorioso “Bunker”.

A mis amigos del secundario, que me han brindado su amistad durante estos 13 años, en los que siempre conté con su apoyo y compañía.

Al Club Gimnasia y Esgrima La Plata, quien me da fuerzas, esperanzas y alegrías desde el momento en que nací, y por enseñarme que todo es posible con paciencia, respeto, dedicación, trabajo y valores.

A todas las mascotas con las que compartí momentos que alegraron mi vida, gracias a sus almas puras y llenas de amor.

A mis abuelos, tíos y primos, que me llenaron de valores y cariño a lo largo de mi vida. Gracias tanto a quienes están aquí, como a quienes me acompañan desde el cielo.

A Mamá y Papá. A mi hermanita. Todo esto fue posible gracias a ustedes, que me ayudaron a crecer como estudiante, pero, aún más importante, como persona. Los amo.

A mi amada Paula, quien me sostiene día a día brindándome su amor desde hace seis años, recordándome que soy capaz de perseguir y alcanzar todos mis sueños.

“La ciencia es una de las formas más elevadas del quehacer espiritual, pues está ligada a la actividad creadora del intelecto, forma suprema de nuestra condición humana” - Dr. René Favalaro.

Resumen

La zona del Mar Argentino donde se realiza este trabajo es fuente de numerosas aplicaciones de investigación científica donde se destacan la biodiversidad, paleo-oceanografía, potenciales energías renovables (corrientes y mareas) y no renovables (hidrocarburos), recursos naturales y el fortalecimiento de la soberanía. Se cuenta con distribuciones de datos con valores de anomalía de aire libre provenientes de campañas de gravimetría marina con diferentes características. Asimismo, se dispone de una grilla regular de 1' x 1' de arco de anomalías de aire libre deducidas gracias a los productos de la técnica de altimetría satelital, que logran cubrir la totalidad del área en cuestión.

En este trabajo de tesis se plantea como objetivo principal desarrollar un conjunto de métodos y herramientas que permitan el análisis de los registros y la compilación consistente de todos los datos. Para ello, se realiza un procesamiento de los datos, que incluye desde el referenciado, editado y filtrado de los datos, hasta los ajustes tanto dentro de cada campaña como entre todas las campañas de medición de gravimetría marina, logrando así la generación de una base de datos de gravimetría marina pura.

Para la compilación final entre los productos deducidos de gravimetría marina y de altimetría satelital, se propone utilizar el abanico de herramientas del paquete Verde de *Python*. Los resultados obtenidos son validados por otro método que incluye como principal técnica de modelado al módulo *Surface* de GMT. Finalmente, se generaron ejemplos de grillas regulares con diferentes resoluciones y tamaños, que fueron validadas exitosamente mediante análisis estadísticos, diagramas y mapeos residuales, asegurando la consistencia del método desarrollado en este trabajo.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Índice de códigos	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.0.1. Motivación	3
1.0.2. Objetivo	5
1.0.3. Estructura de la tesis	5
2. Técnicas para obtener anomalías de gravedad marina	7
2.1. Altimetría satelital	8
2.2. Gravimetría marina	9
3. Datos utilizados	11
3.1. Datos de altimetría satelital	11
3.2. Datos de gravimetría marina	15
3.2.1. Recopilación G	15
3.2.2. BGR 87, BGR 98 y BGR 04	16
4. Procedimiento para generar la base de datos marinos	21
4.1. Referenciación al GRS80	22

4.2. Editado	23
4.3. Análisis estadístico	28
4.4. Ajuste de cruces por campaña	32
4.4.1. X2SYS_HOME	33
4.4.2. X2SYS_INIT	33
4.4.3. X2SYS_CROSS	34
4.4.4. X2SYS_REPORT	36
4.4.5. X2SYS_LIST	37
4.4.6. X2SYS_SOLVE	37
4.4.7. X2SYS_DATA_LIST	38
4.5. Ajuste por cruces entre campañas	43
5. Compilación	49
5.1. Procedimiento	50
5.1.1. Grillado	50
5.1.2. Validación	53
5.2. Grilla del área total	54
5.2.1. Validación de la grilla del área total	61
5.3. Grilla del área reducida	64
5.3.1. Validación de la grilla del área reducida	68
6. Conclusiones	71

Índice de códigos

4.1. Interpolación.bat.	24
4.2. Proyeccion.bat.	24
4.3. X2SYS_HOME.	33
4.4. x2sys_init.	33
4.5. x2sys_cross.	34
4.6. x2sys_report.	36
4.7. x2sys_list.	37
4.8. x2sys_solve	37
4.9. x2sys_datalist.	38

Índice de figuras

1.1. Espacio marítimo de Argentina.	2
2.1. Geometría de relevamientos de gravedad.	9
3.1. Anomalías de aire libre calculadas gracias a la técnica de altimetría satelital de la serie de datos de Sandwell y Smith (versión V32.1). . .	11
3.2. Determinación de la altura del océano a partir de la determinación de la altura de la nave.	12
3.3. Observaciones de la Recopilación G.	16
3.4. Observaciones de la campaña BGR 87.	17
3.5. Observaciones de la campaña BGR 98.	18
3.6. Observaciones de la campaña BGR 04.	19
4.1. Ejemplos de errores de medición en los distintos perfiles o trazas. . .	25
4.2. Conjuntos de datos de gravimetría marina editadas.	27
4.3. Densidad espectral de potencia estimada para el perfil 5 de la cam- paña BGR 87.	29
4.4. Aplicación del filtro Butterworth.	30
4.5. BGR 87 - Perfil 5 filtrado.	31
4.6. BGR 87 - Perfil 5 filtrado con ampliación.	31
4.7. Mapa de los perfiles de BGR 04-CHEKAN y el valor absoluto de diferencia de anomalía de aire libre en los cruces.	35
4.8. Mapas de diferencias absolutas de anomalías de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste, para los conjuntos BGR 87 y BGR 98.	40

4.9. Mapas de diferencias absolutas de anomalías de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste, para los conjuntos de Recopilación G y BGR 04.	41
4.10. Perfiles de anomalía de aire libre observadas en barco originales, filtradas, corregidas por ajuste e interpoladas con la grilla obtenida con la técnica de altimetría satelital.	42
4.11. Diferencias absolutas de anomalía de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste final entre campañas en GM.	46
4.12. Anomalías de aire libre de GM y residuos de su comparación con interpolados de la grilla de altimetría satelital	47
5.1. Anomalías de aire libre e incertidumbres de A.	52
5.2. Distribución de datos de los conjuntos <i>Train</i> y <i>Test</i>	55
5.3. Modelos de Verde acumulados para la grilla modelo final del área total.	57
5.4. Comparación de anomalías de aire libre de A, GM y grilla resultante del modelo de Verde para la zona del área total.	58
5.5. Residuos de A y GM: valores reales - predichos con el modelo de Verde para el área total.	58
5.6. Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de GM y A con el modelo de Verde para el área total.	59
5.7. Diferencia GM - A, cruces de GM y residuos del modelo final encaadenado de Verde para el área total.	60
5.8. Comparación de anomalías de aire libre de la grilla generada con Verde y su validación con Surface para el área total.	62

5.9. Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de la grilla de Verde con su validación con Surface para el área total.	63
5.10. Comparación de anomalías de aire libre de A, GM y grilla resultante del modelo de Verde para la zona del área reducida.	64
5.11. Modelos de Verde acumulados para la grilla del área reducida.	65
5.12. Residuos de A y GM: valores reales - predichos con el modelo de Verde para el área reducida.	66
5.13. Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de GM y A con el modelo de Verde para el área reducida.	67
5.14. Diferencia GM - A, cruces de GM y residuos del modelo final enca- denado de Verde para la zona del área reducida.	68
5.15. Comparación de anomalías de aire libre de la grilla generada con Verde y su validación con Surface para el área total.	69
5.16. Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de la grilla de Verde con su validación con Surface para el área reducida.	69

Índice de tablas

4.1. Cantidad de observaciones y perfiles por conjunto, antes y después del editado.	26
4.2. Equidistancias promedio y desvíos estándar estimados del ruido. . .	32
4.3. Estadísticas de <i>x2sys_report</i> : número de cruces y valores RMS. . . .	36
4.4. RMS en los cruces, antes y después del ajuste por conjunto.	39
4.5. Promedio \overline{RES} y desvío estándar σ^{RES} de los residuos entre anomalía de aire libre de gravimetría marina ajustadas por conjunto e interpolada de la grilla obtenida con altimetría satelital.	39
4.6. Estadísticas del ajuste final de GM: valores de RMS en los cruces RMS_{cruces} y residuos promedios con altimetría satelital \overline{RES} , <i>pre</i> y <i>post</i> ajuste.	46
5.1. Estadísticas residuales de la grilla de área total de la diferencia valor real-predicho con Verde: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES}	59
5.2. Estadísticas residuales de la grilla del área total generada por Verde con la grilla de validación: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES}	62
5.3. Estadísticas residuales para la grilla de área reducida de la diferencia valor real - predicho con Verde: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES}	66
5.4. Estadísticas residuales para la grilla de área reducida generada por Verde con la grilla de validación: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES}	70

Capítulo 1

Introducción

Una anomalía de gravedad geofísica Δg , tal como se muestra en la ecuación 1.1, es la diferencia entre la gravedad medida g_{obs} en un punto y la teórica γ correspondiente al mejor modelo que represente esa gravedad observada [34].

$$\Delta g = g_{obs} - \gamma \quad (1.1)$$

Los mapas de anomalías gravimétricas se utilizan para determinar las variaciones de masa-densidad que reflejan la geología del subsuelo, permitiendo una variedad de aplicaciones geofísicas, como el estudio de la estructura interna de la Tierra, la búsqueda de recursos naturales y el modelado del geoide.

Este trabajo de tesis se enfoca en la región geográfica del margen continental argentino entre las latitudes 38°S y 50°S, así como entre las longitudes 48°W y 63°W, dentro del área abarcada por el espacio marítimo argentino representado en la figura 1.1.

El régimen de la plataforma continental argentina queda establecido en la Ley N°23.968 [24] de espacios marítimos y en la Parte VI de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR) [7]. Según estas normas, la plataforma continental de un Estado ribereño abarca el lecho y el subsuelo de las áreas submarinas que se extienden más allá de su mar territorial hasta el borde exterior del margen continental. Si la plataforma se extiende a mayor distancia que las 200 millas marinas, el Estado ribereño debe presentar información a la Comisión de Límites de la Plataforma Continental (CLPC), que hará recomendaciones sobre el límite presentado.

Dichas recomendaciones se realizaron tras un arduo trabajo por más de diez años, que llevó a cabo el proyecto COPLA (Comisión Nacional del Límite de la Plataforma Continental Argentina) [7], destacándose la colaboración de la Dra. Marta Ghidella del Instituto Antártico Argentino [25], mediante el cual ha sido posible extender el límite según criterios específicos que definen el límite final obligatorio según recomendaciones definidas en la CONVEMAR, a través de puntos fijos más alejados o puntos fijos a no más de 60 millas marinas del pie del talud continental. Estos puntos no pueden estar a más de 350 millas marinas desde las líneas de base del mar territorial o a más de 100 millas marinas desde la isobata de 2500 m.

Se describen a continuación:

- Motivación del estudio.
- Objetivo del trabajo.
- Estructura de la tesis.

1.0.1. Motivación

El complejo margen continental argentino incluye diversos tipos de márgenes a lo largo de diferentes regiones. Sus rasgos generales son la plataforma, el talud y la inmersión continental. Los sedimentos del fondo oceánico pueden ofrecer las herramientas para lograr reconstrucciones paleo-oceanográficas y con ellas investigar la dinámica oceánica asociada y los procesos paleoclimáticos y paleoambientales que se llevaron a cabo. Además, se conoce que existen grandes cuencas hidrocarbúferas, acumulaciones de áridos y minerales metalíferos. También se destacan los potenciales recursos energéticos alternativos asociados a las características de sus olas, mareas y corrientes marinas [48].

Debido a la influencia de las corrientes marinas, los fuertes vientos y la circulación del agua en la costa, se generan los frentes marinos, constituidos por planos de separación entre masas de agua de distinta salinidad o temperatura. En estos frentes es que se desarrolla la productividad primaria, la cual permite una gran biodiversidad. Las investigaciones científicas son necesarias para asegurar la sustentabilidad de los ecosistemas y poder establecer políticas de uso responsable de los recursos naturales. Se puede destacar aquí la Iniciativa Pampa Azul [31], que busca promover la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación con el fin de preservar y gestionar efectivamente los bienes marinos, contribuyendo así a fortalecer la soberanía nacional sobre el mar.

En regiones marinas, la investigación de anomalías de gravedad tuvo un fuerte auge a partir de los avances tecnológicos que permitieron obtener anomalías desde datos de altimetría satelital. Muchos estudios científicos [39] [40] [2] [3] se han realizado para mejorar la exactitud y resolución de estas anomalías, de las cuales se han desprendido grillas 1' x 1' que cubren la gran mayoría de los océanos del mundo. Las anomalías de gravedad derivadas de múltiples misiones de altimetría satelital tienen una cobertura homogénea y global, aunque su calidad disminuye considerablemente en zonas costeras [15].

Otra forma de obtener anomalías de gravedad en zonas marinas, es a través de mediciones de gravimetría marina, que consisten en observaciones gravimétricas en cruceros. A lo largo de las décadas, se han realizado mediciones gravimétricas a bordo de barcos alrededor del mundo. Debido a errores del instrumental, de navegación y otras fuentes de error, existen diferencias significativas entre las mediciones de gravedad realizadas en diferentes cruceros.

1.0.2. Objetivo

Los perfiles de gravimetría marina ofrecen un potencial de precisión superior a las anomalías de gravedad derivadas de la altimetría satelital, especialmente en zonas costeras e insulares donde pueden producirse diferencias significativas entre ambos métodos [12]. Por este motivo, y dado que se disponen de ambos conjuntos de datos en una región del margen continental argentino, se plantea obtener una grilla de anomalías de gravedad combinada, incluyendo datos de gravedad provenientes de gravimetría marina y aquellos basados en la altimetría satelital, para combinar de manera optimizada la alta resolución espacial de los perfiles gravimétricos con la extensión cuasi-global del producto derivado de la altimetría.

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar métodos y algoritmos computacionales para el análisis y compilación de anomalías de gravedad en la región marina del margen continental argentino. Estas técnicas podrán aplicarse en otras regiones que cuenten con datos de similares características. En esta tesis se realiza el procesamiento sobre esta región de estudio de gran interés científico y relevancia socioeconómica, lo cual garantiza la utilidad y la aplicación futura de los productos generados a modo de ejemplo a lo largo del trabajo.

1.0.3. Estructura de la tesis

El presente trabajo de tesis ha sido estructurado en seis capítulos, cuyos contenidos se describen a continuación:

- El capítulo 1 introduce brevemente al tema de estudio y especifica los objetivos perseguidos. Además, se describen las características principales de la zona de estudio sobre su comportamiento hidrogeológico así como de su importancia social y económica.

- En el capítulo 2 se presentan y desarrollan de manera teórica las técnicas que permiten obtener anomalías de gravedad marina.
- En el capítulo 3 se detallan los datos utilizados para este trabajo de cada una de las técnicas.
- El capítulo 4 contiene la descripción de las sucesivas etapas que se realizaron durante el procesamiento de los datos.
- El capítulo 5 expone las características del proceso de compilación final de los datos, así como el de su correspondiente validación.
- El capítulo 6 dicta el cierre del trabajo con las conclusiones finales.

Capítulo 2

Técnicas para obtener anomalías de gravedad marina

Las condiciones y técnicas a disposición para la determinación de anomalías de gravedad difieren entre el ambiente marino y el continental. En ambos casos se utilizan observaciones gravimétricas *in situ*, pero en el entorno marino han de ser realizadas sobre plataformas (barcos) en continuo movimiento, lo cual afecta a la precisión de las observaciones tanto gravimétricas como auxiliares (posición y altura) [20].

Por otro lado, el ambiente marino logra ofrecer un método alternativo basado en el principio de que, en promedio sobre escalas de tiempo extensas y tras corregir los efectos de procesos hidrodinámicos como las olas, mareas o corrientes oceánicas, la superficie del agua se ajusta a una superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre. Desde hace más de tres décadas la altura elipsoidal del nivel del mar es observable mediante la altimetría satelital con una cobertura cuasi global y una precisión creciente, homogénea y suficiente para deducir anomalías de gravedad. Contar con gravimetría satelital y marina permite la recuperación de la señal gravimétrica tanto en su mediana como en su corta longitud de onda.

La gravimetría satelital ha logrado avances significativos en las misiones más recientes, como GRACE [44] (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), GRACE-FO [22] (*GRACE - Follow On*) y GOCE [10] (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*). Sin embargo, aún no se ha alcanzado la resolución espacial suficiente para resolver muchos problemas geofísicos a escalas locales y

regionales [49].

En este trabajo se utilizarán dos métodos en particular para la determinación de anomalías de gravedad:

- Altimetría satelital
- Gravimetría marina

2.1. Altimetría satelital

Para obtener anomalías de gravedad marinas derivadas de altimetría, diversos autores proponen técnicas como:

- Convertir la altura geoidal marina usando la fórmula inversa de Stokes [2].
- Convertir la deflexión de la vertical a través de la formula inversa de Vening-Meinesz [18].
- Convertir la deflexión de la vertical mediante la integración de la ecuación de Laplace [39].

Para estos cálculos se utiliza la técnica conocida como *remove-compute-restore*, que requiere el empleo de un modelo geopotencial en la conversión basada en transformada rápida de Fourier (FFT) de las alturas geoidales/deflexiones de la vertical en anomalías/perturbaciones de la gravedad.

En el cálculo de FFT, es importante considerar que debido a la ausencia de datos de altimetría en tierra, aparece un efecto de borde. Sin embargo, la principal dificultad radica en la generación de grillas para poder realizar el cómputo. Diversos grupos utilizan algoritmos para el grillado de datos como *Splines* o colocación por mínimos cuadrados, lo que conduce a que grillas de anomalía de gravedad obtenidas de una misma misión satelital presenten diferencias, debido únicamente al método de grillado adoptado [15].

2.2. Gravimetría marina

Se pueden calcular anomalías de gravedad marinas a partir de observaciones de gravedad registradas directamente a bordo de cruceros. Estos relevamientos son fundamentales para lograr diversos objetivos, como obtener un modelado de geoide de alta precisión, conocer la topografía dinámica de la superficie del mar o analizar la estructura de las capas en el interior terrestre, entre otras aplicaciones [8].

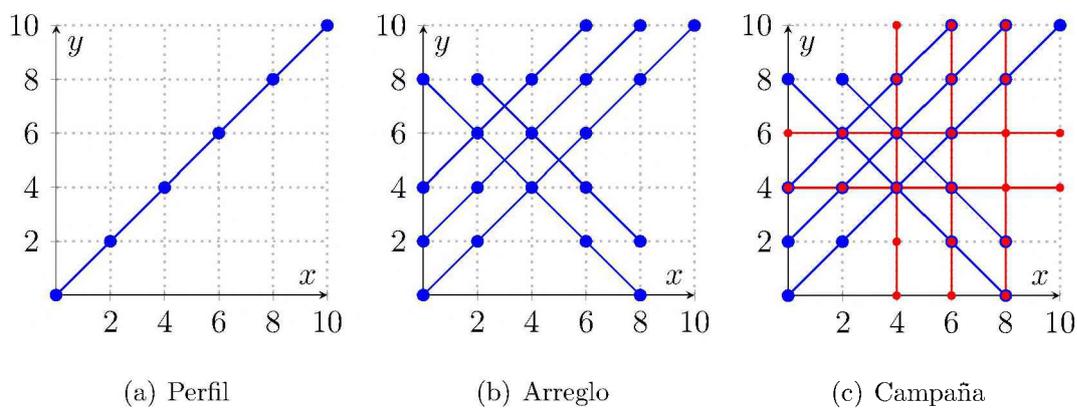


Figura 2.1: Geometría de relevamientos de gravedad.

Las observaciones gravimétrica se realizan en unas coordenadas específicas. Una serie de observaciones en distintas coordenadas, en caso de seguir una trayectoria lineal en el plano con un azimut constante, se denomina perfil. También se suele mantener una distancia aproximadamente equidistante entre las observaciones de cada perfil. A su vez, existen también los arreglos (del inglés *array*), que son configuraciones cuasi-perpendiculares y equidistantes de varios perfiles, que generan cruces entre ellos. Las campañas son viajes continuos de crucero que pueden incluir uno o más arreglos [39], como se muestra en la figura 2.1.

Estos registros, realizados con gravímetros marinos montados en plataformas giro-estabilizadas se han llevado a cabo durante varias décadas en todo el mundo

por diversas instituciones [45], pero las inconsistencias en las mediciones se presentan a menudo, aún dentro de un mismo relevamiento. La calidad de los datos varía en cada crucero y para cada perfil. A lo largo del tiempo, se han utilizado gravímetros con diferentes precisiones, acompañados de errores tanto instrumentales como de navegación, entre otras fuentes, lo que genera inconsistencias significativas [54]. El efecto Eötvös, que limitaba la precisión de los antiguos cruceros, ahora puede calcularse de manera más precisa a las nuevas técnicas de posicionamiento de alta precisión como GPS (*Global Positioning System*), aunque sigue estando presente en muchos datos de gravimetría marina [9].

Algunos de los efectos que contribuyen a la incertidumbre de los datos de gravimetría marina incluyen:

- Ruido observacional: variación cuasi-aleatoria entre puntos de datos cercanos. Es el resultado de todos aquellos procesos que logran influir en el valor observado, pero que no se han controlado ni corregido.
- Efectos sistemáticos por perfil: tomando la escala temporal en horas, se pueden identificar efectos que dependen del azimut del perfil que estén asociados con las direcciones del oleaje o el viento, o bien variaciones meteorológicas que estén ocurriendo en el momento del relevamiento.
- Efectos sistemáticos por campaña: están asociados al gravímetro y barco utilizados para las observaciones, así como a cualquier instrumento auxiliar.

Es necesario analizar los registros de crucero y realizar el procesamiento de los datos, con el objetivo de depurar cualquier *outlier* que pudiera existir, filtrar el ruido presente y realizar un análisis de cruces del conjunto de datos. Dado que los relevamientos suelen presentar errores asociados a efectos sistemáticos, un ajuste por cruces entre los perfiles y otro entre las campañas serán necesarios para poder armar una base de datos consistente.

Capítulo 3

Datos utilizados

3.1. Datos de altimetría satelital

La serie de datos de anomalías de gravedad basados en la altimetría satelital [39] que se utiliza en este trabajo de tesis es la V32.1 [47], última versión del modelo global de gravedad de Sandwell y Smith, publicada en el año 2022. Estos datos se muestran en la figura 3.1.

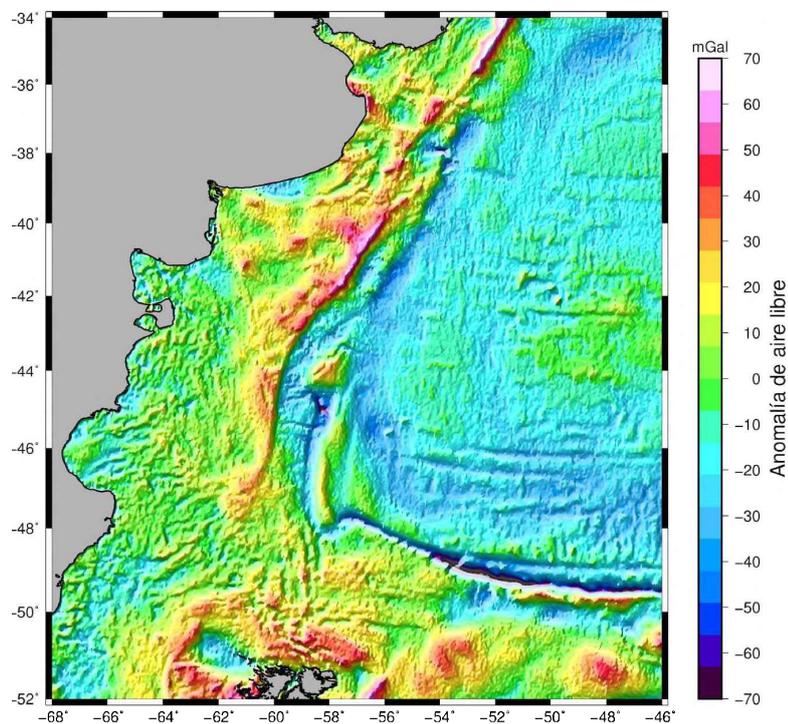


Figura 3.1: Anomalías de aire libre calculadas gracias a la técnica de altimetría satelital de la serie de datos de Sandwell y Smith (versión V32.1).

La versión utilizada en este trabajo es el resultado de una evolución larga y progresiva. Para las primeras versiones de este modelo, denominadas V16 y V18 [40], se utilizaron perfiles de altimetría satelital de las misiones Geosat Geodetic [6] y de ERS-1 [11] (*European Remote Sensing Satellite*), que se convirtieron a grillas de gradiente vertical de gravedad y anomalía de gravedad [38].

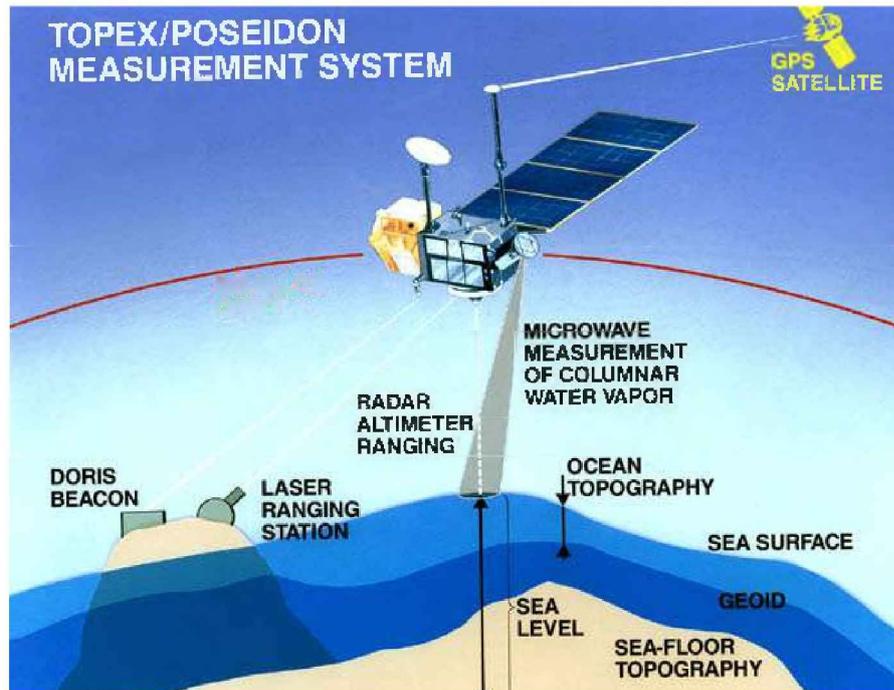


Figura 3.2: Determinación de la altura del océano a partir de la determinación de la altura de la nave.

Los perfiles de ambas misiones satelitales son interpolados y combinados para formar grillas de deflexión de la vertical en este y norte. A partir de estas grillas de deflexión vertical es posible calcular el gradiente vertical de gravedad de manera directa mediante sus derivadas, y las anomalías de gravedad mediante Fourier:

- Se realizan ediciones, correcciones, filtros pasa-bajo y nuevos muestreos en los perfiles altimétricos. También se realizan diferenciaciones para obtener

estimaciones de pendientes.

- Se realiza el apilamiento de los perfiles repetidos en diferentes ciclos de medición del satélite. Luego, se aplican correcciones y filtros para asegurar un mismo ancho de banda en todos los perfiles.
- Se remueve de los perfiles un modelo geopotencial, que será restaurado luego. Este paso se realiza para que la conversión de deflexión de la vertical en anomalía de gravedad pueda ser precisamente realizada con una aproximación de Tierra plana.
- Mediante un proceso iterativo, y utilizando interpolaciones biarmónicas con *splines*, se convierten las grillas orientadas en grillas de deflexión de la vertical Este y Norte.
- La fórmula de Bruns y la ecuación de Laplace permiten vincular el gradiente vertical de gravedad ($\frac{\partial \Delta g}{\partial z}$) con las derivadas de las componentes de la deflexión de la vertical Este (η) y Norte (ξ) y obtenerlo mediante la ecuación:

$$\frac{\partial \Delta g}{\partial z} = -g_0 \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \right), \quad (3.1)$$

donde g_0 es el valor promedio de la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

En el dominio de Fourier, considerando el número de onda $k = (k_x, k_y)$, la expresión resulta en:

$$\frac{\partial \Delta g(\mathbf{k}, z)}{\partial z} = -i2\pi g_0 [k_x \eta(\mathbf{k}) + k_y \xi(\mathbf{k})] \quad (3.2)$$

Utilizando continuación ascendente, derivando y evaluando en $z=0$, se obtiene la ecuación:

$$\Delta g(\mathbf{k}, z) = \frac{ig_0}{\mathbf{k}} [k_x \eta(\mathbf{k}) + k_y \xi(\mathbf{k})] \quad (3.3)$$

- Para calcular la anomalía de gravedad, es necesario utilizar la transformada rápida de Fourier de las grillas de deflexión de la vertical residuales, realizar la combinación en este dominio y luego volver al dominio espacial a través de la transformada inversa de Fourier.

En este punto se puede restaurar el modelo geopotencial para recuperar la información en las componentes de larga longitud de onda.

Se han utilizado los modelos geopotenciales EGM96 [23] y EGM2008 [32] [33] para las versiones V16 y V18 respectivamente, logrando una resolución de 1' de arco en el océano [35]. Posteriormente, se fueron proporcionando diversos cambios y actualizaciones en las versiones siguientes, que se detallan a continuación:

- Se fue mejorando la precisión y densidad de datos, incluyendo hasta la versión V21, la información recolectada por las misiones satelitales del CryoSat-2 [14], Envisat [13] y Jason-1 [55].
- La versión V22 contiene algunos cambios, entre los que se destacan el filtro pasa-bajo aplicado tanto en la gravedad como en las pendientes de los perfiles del altímetro.
- Las versiones V23, V24, V25, V26, V27 y V28 fueron adicionando más meses de información del CryoSat-2 [14].
- Las versiones V27 y V28 incluyen datos del satélite ALtiKa hasta 2019.
- En la version V29, se adicionan dos años de mediciones del satélite Sentinel-3A/B y se rediseñaron los filtros pasa-bajo para que sean más consistentes.
- La versión V30 incluye un año más de datos de ALtiKa, CryoSat y Sentinel-3A/B. Además, se aumentó la longitud de onda del filtro en aguas más someras de 12.13 km a 14.14 km.

- Finalmente, en las versiones V31 y V32 se adicionó más tiempo de medición de las misiones Altika, Cryosat LRM, Cryosat SAR y Sentinel-3A/B.
- En la última versión V32 también se aplicó una máscara de tierra para reducir los efectos de borde tierra-océano.

3.2. Datos de gravimetría marina

Las anomalías gravimétricas obtenidas de observaciones de crucero que se utilizan provienen de diferentes instituciones. Se tuvo acceso mediante gestiones realizadas por Marta Ghidella. A continuación, se describe y mapea cada uno de los conjuntos de datos provistos .

3.2.1. Recopilación G

Es una recolección de datos de gravedad (1941-1988) efectuada por el BGI [4] (*Bureau Gravimetrique International*), el servicio científico del IAG (*International Association of Geodesy*) dedicado a mantener un inventario de datos y asegurar la disponibilidad a largo plazo de las mediciones de gravedad realizadas en la superficie terrestre. Su principal tarea es la recopilación, validación y archivo de todo tipo de mediciones de gravedad, ya sean relativas o absolutas, obtenidas a través de estudios terrestres, marinos o aéreos. Además, se encarga de la difusión de estos datos y de los productos derivados a una amplia variedad de usuarios con fines científicos.

Estos datos fueron obtenidos por NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), LDEO (*Lamont Doherty Geological Observatory*), IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*), PAIGH (*Pan-American Institute of Geography and History*), UBA (Universidad de Buenos Aires), NCG (*Netherlands Geodetic Commission*), UKHO (*United Kingdom Hydrographic Department*)

y SGC (*Soviet Geophysical Committee*). Incluyen número de fuente, latitud, longitud, gravedad observada en μGal , anomalía de aire libre, anomalía de Bouguer, estimación de los errores en las anomalías y un código que representa el instrumento utilizado.

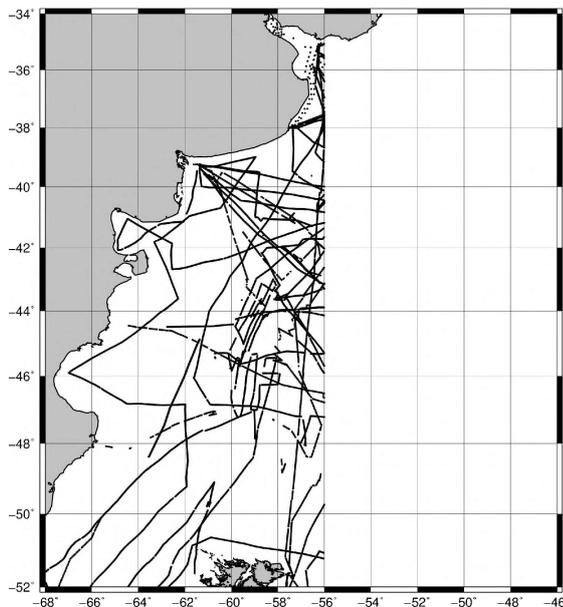


Figura 3.3: Observaciones de la Recopilación G.

Los valores de gravedad están referidos al I.G.N.S 71 [4] (*International Gravity Standardization Net 1971*). Las anomalías de aire libre medidas en estas campañas marinas fueron calculadas con la gravedad teórica γ correspondiente a GRS67 [16] (Sistema de Referencia Geodésico 1967). Se proporcionó un total de 10683 observaciones, presentes en la figura 3.3.

3.2.2. BGR 87, BGR 98 y BGR 04

Los restantes conjuntos de datos son los correspondientes a las campañas marinas llevadas a cabo por el BGR (*Bundenstalt für Geowissenschaften and Rohstoffe*,

Agencia Federal de Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales), de Alemania. Se muestran sus distribuciones en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6.

Los datos gravimétricos registrados en las campañas BGR 87 y BGR 98 están referidos al I.G.N.S 71 . Se les ha aplicado la corrección de Eötvös con los datos de navegación, corrección por drift instrumental y substracción de la gravedad normal GRS67.

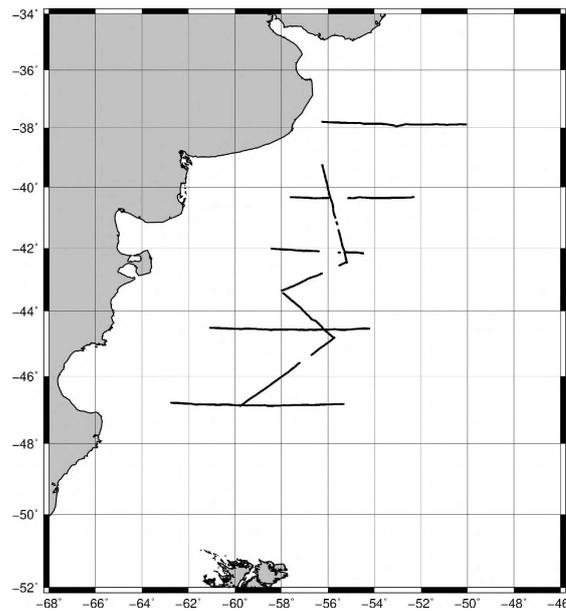


Figura 3.4: Observaciones de la campaña BGR 87.

De los informes de los cruceros se sabe que para la campaña BGR 87, realizada en 1987, se utilizó un gravímetro marino Bodenseewerk modelo KSS número de serie 30. Los datos incluyen valores de longitud, latitud y anomalía de aire libre, entre otros. Se proporcionaron un total de 10465 observaciones.

Por otra parte en la campaña BGR 98 (1998), que tuvo como primera etapa BGR 98-1 (105996 observaciones en diciembre de 1998) y como segunda etapa BGR 98-2 (76086 registros en enero de 1999), se realizaron las mediciones con un gravímetro marino LaCoste & Romberg modelo S, de tipo aire-mar y con número

de serie S-105. En conjunto de datos se proporciona año, mes, día, hora, longitud, latitud, profundidad, anomalía de aire libre en mGal y anomalía magnética en nT, entre otros.

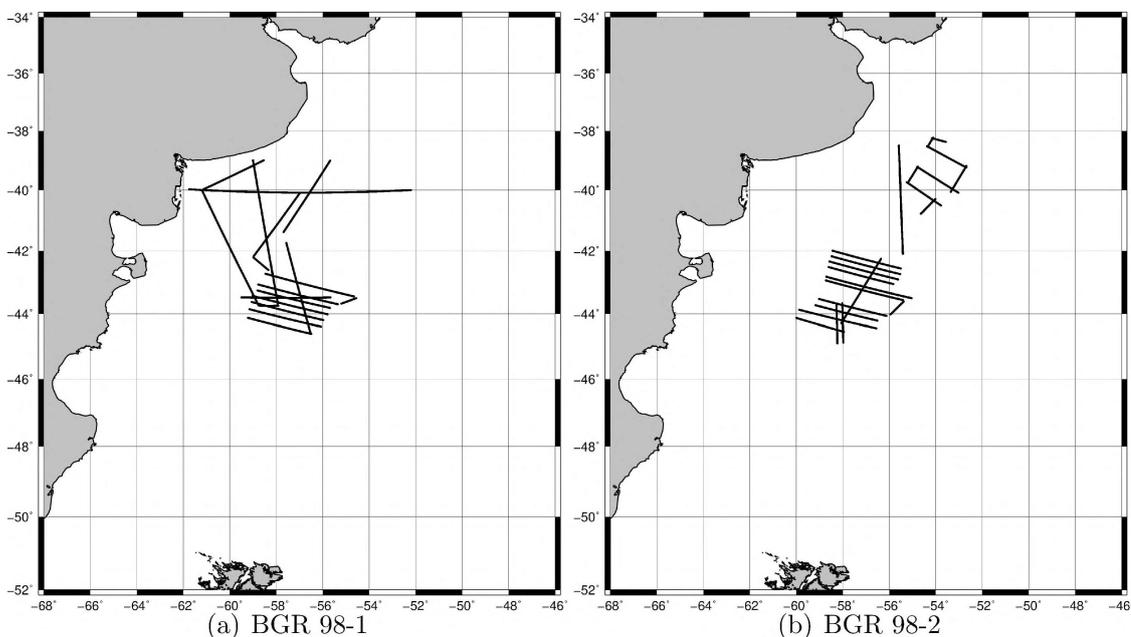


Figura 3.5: Observaciones de la campaña BGR 98.

El último conjunto de datos es el de la campaña BGR 04, la más reciente, ya que fue realizada entre los meses de noviembre y diciembre en 2004. Los valores de gravedad están referidos al al I.G.N.S 71, mientras que las anomalías de gravedad fueron calculadas mediante la sustracción de la gravedad teórica proporcionadas por el GRS80 [28]. Los valores proporcionados fueron de año, mes, día, hora, longitud, latitud, profundidad y anomalías tanto de aire libre en mGal y anomalía de Bouguer en mGal, entre otros.

Los datos de gravedad se registraron utilizando los gravímetros marinos CHE-TA y CHEKAN. Además, para referenciar los datos de gravedad a bordo, se realizaron mediciones con un gravímetro terrestre LaCoste & Romberg al comienzo

y al final del crucero. Los registros con cada gravímetro fueron con intervalos de tiempo distintos, por lo que la cantidad de observaciones totales fue de 18188 para el conjunto de datos CHETA y de 109328 para el conjunto CHEKAN.

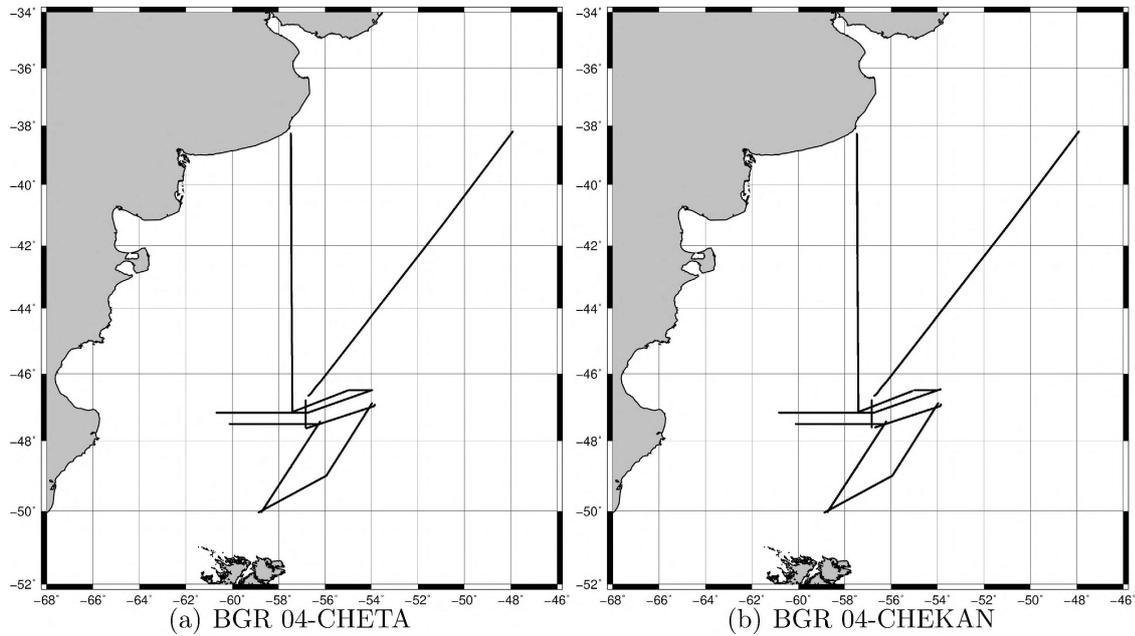


Figura 3.6: Observaciones de la campaña BGR 04.

Capítulo 4

Procedimiento para generar la base de datos marinos

Los datos marinos de anomalías de gravedad de aire libre, provenientes de las diferentes campañas descritas en la sección 3.2, presentan diversas características. Por lo tanto, es necesario realizar un procesamiento adecuado para obtener una base de datos final con la mayor consistencia posible entre todas las observaciones. A continuación, se detallan los pasos a seguir a lo largo de este capítulo:

- Referenciación al GRS80: debido a la heterogeneidad presente en las diferentes campañas de medición, todas las anomalías de gravedad deben referirse al mismo sistema de referencia geodésico (GRS80).
- Editado: identificación y eliminación de observaciones indeseadas en la base de datos, ya sean valores aislados (“*outliers*”) o segmentos de perfiles claramente afectados por errores sistemáticos. Las anomalías de gravedad derivadas de altimetría satelital permiten detectar algunos *outliers* con más facilidad, siempre que no se trate de zonas costeras, donde su precisión decae.
- Análisis estadístico: caracterización cuantitativa del ruido observacional para cada perfil, con el objetivo de reducir su impacto en los datos mediante filtros optimizados [30] [36] [21] [43].
- Ajuste de cruces (*crossovers*, por su denominación en inglés) dentro de las campañas: reducción de efectos sistemáticos presentes en los perfiles para

generar una base de datos consistente internamente en cada campaña [51] [52] [26] [1] [41].

- Ajuste de cruces entre las diferentes campañas: proceso que busca maximizar la consistencia en la base de datos final, formada por los datos de todas las campañas, a través de la reducción de los efectos sistemáticos entre ellas.

Para este capítulo se emplearán las siguientes herramientas principales:

- Python: lenguaje de programación de alto nivel, especialmente utilizando los paquetes *NumPy*, *Matplotlib*, *SciPy*, *Panda* y *Math*. La versión utilizada en este trabajo es la 3.12.4.
- GMT (Generic Mapping Tools): Colección de programas de código abierto, diseñada especialmente para la creación de diagramas y mapas geológicos o geográficos. Se utilizan varios comandos para la generación de mapas, además de *mapproject* para la proyección, *grdtrack* para la interpolación y diversas subrutinas de *x2sys* [51] para el análisis de cruces. La versión utilizada en este trabajo es la 5.4.5.

4.1. Referenciación al GRS80

Para obtener una base de datos consistente, es fundamental llevar todos los datos a un mismo sistema de referencia geodésico. Recordemos que la anomalía de gravedad Δg se define como la diferencia entre la gravedad observada g_{obs} y la de gravedad teórica γ , como se muestra en la ecuación 4.1:

$$\Delta g = g_{obs} - \gamma \quad (4.1)$$

Es necesario transformar tanto las observaciones de la recopilación G del BGI como las de las campañas BGR 87 y BGR 98, del GRS67 al GRS80. Esto se logra

restaurando la gravedad normal del GRS67 (γ_{67}) a la anomalía de gravedad de aire libre referida al GRS67 (Δg_{67}), para luego sustraerle la gravedad normal del GRS80 (γ_{80}), obteniendo así, la anomalía de gravedad de aire libre referida al GRS80 (Δg_{80}).

Para cada dato de anomalía de las campañas señaladas, se debe seguir la metodología señalada en la ecuación 4.2.

$$\Delta g_{80} = \Delta g_{67} + \gamma_{67} - \gamma_{80} \quad (4.2)$$

Los valores de gravedad normal γ se calcularon utilizando las ecuaciones 4.3 y 4.4 [42], con una exactitud de 0.1 mGal:

$$\gamma_{67} = 978031.8 [1 + 0.0053024 \operatorname{sen}^2(\varphi) - 0.0000059 \operatorname{sen}^2(2\varphi)] \quad [mGal] \quad (4.3)$$

$$\gamma_{80} = 978032.7 [1 + 0.0053024 \operatorname{sen}^2(\varphi) - 0.0000058 \operatorname{sen}^2(2\varphi)] \quad [mGal] \quad (4.4)$$

En las expresiones 4.3 y 4.4, φ es la latitud geodésica y 978031.8 es el valor en mGal de gravedad normal en el ecuador para el sistema GRS67, mientras que 978032.7 lo es para el sistema GRS80 [16] [28] [19] [27].

4.2. Editado

Dado que la altimetría satelital permite modelar el campo de gravedad en regiones marinas alejadas a una distancia prudencial de la costa, se utiliza la grilla de anomalías de aire libre de Sandwell & Smith en su versión V32.1 (detallada en el capítulo 3) para obtener un valor interpolado para cada coordenada donde los barcos realizaron mediciones. Esta interpolación se realiza mediante GMT, utilizando la herramienta *grdtrack*, como se detalla en el código 4.1.

Código 4.1 Interpolación.bat.

```
1 grdtrack perfil.txt -G%grilla%.grd > perfil_interpolado.txt
```

Aquí, `perfil.txt` es la tabla con tres columnas correspondientes a longitud, latitud y anomalía de aire libre del perfil de gravimetría marina, `grilla.grd` corresponde a la grilla de anomalías de aire libre deducidas con altimetría satelital y el archivo `perfil_interpolado.txt`, generado a partir del comando *grdtrack*, contiene las columnas del archivo original `perfil.txt` con una columna adicional que indica el valor de anomalía de aire libre interpolada desde la grilla deducida con altimetría satelital en las coordenadas de cada fila.

Los perfiles suelen presentar diversos tipos de errores de medición, tales como: registros sin observación, *outliers* o bien valores con referencia significativamente diferente en comparación con las anomalías derivadas de altimetría satelital.

En esta etapa, para cada perfil, generalmente recto, se proyectan las coordenadas respecto al punto inicial de medición, lo que permite obtener un registro de anomalía de aire libre en función de la distancia acumulativa al primer punto. Esto facilita que se pueda comparar punto a punto con la anomalía de aire libre basada en altimetría satelital. Para ello, se utilizó el comando *mapproject*, de GMT, mediante el código 4.2.

Código 4.2 Proyeccion.bat.

```
1 mapproject perfil_interpolado.txt -R%region% -G+e -J%proyeccion% >
  perfil_proyectado.txt
```

En este comando se introduce `perfil_interpolado.txt` y se definen la región en `-R` donde queremos proyectar, la opción `+e` luego de `-G` para indicar que queremos calcular la distancia acumulada en cada coordenada sobre el trayecto desde el punto inicial y el tipo de proyección seleccionado en `-J`. El archivo de salida `perfil_proyectado.txt` es igual al archivo introducido, pero con una columna adicio-

nal que indica la distancia acumulada de las coordenadas de cada fila respecto al primer punto.

Posteriormente, mediante un código desarrollado en Python, se grafica para los distintos perfiles, la anomalía de aire libre en función de la distancia recorrida, lo que permite identificar con claridad los registros que deben ser editados o depurados con el fin de eliminar observaciones erróneas.

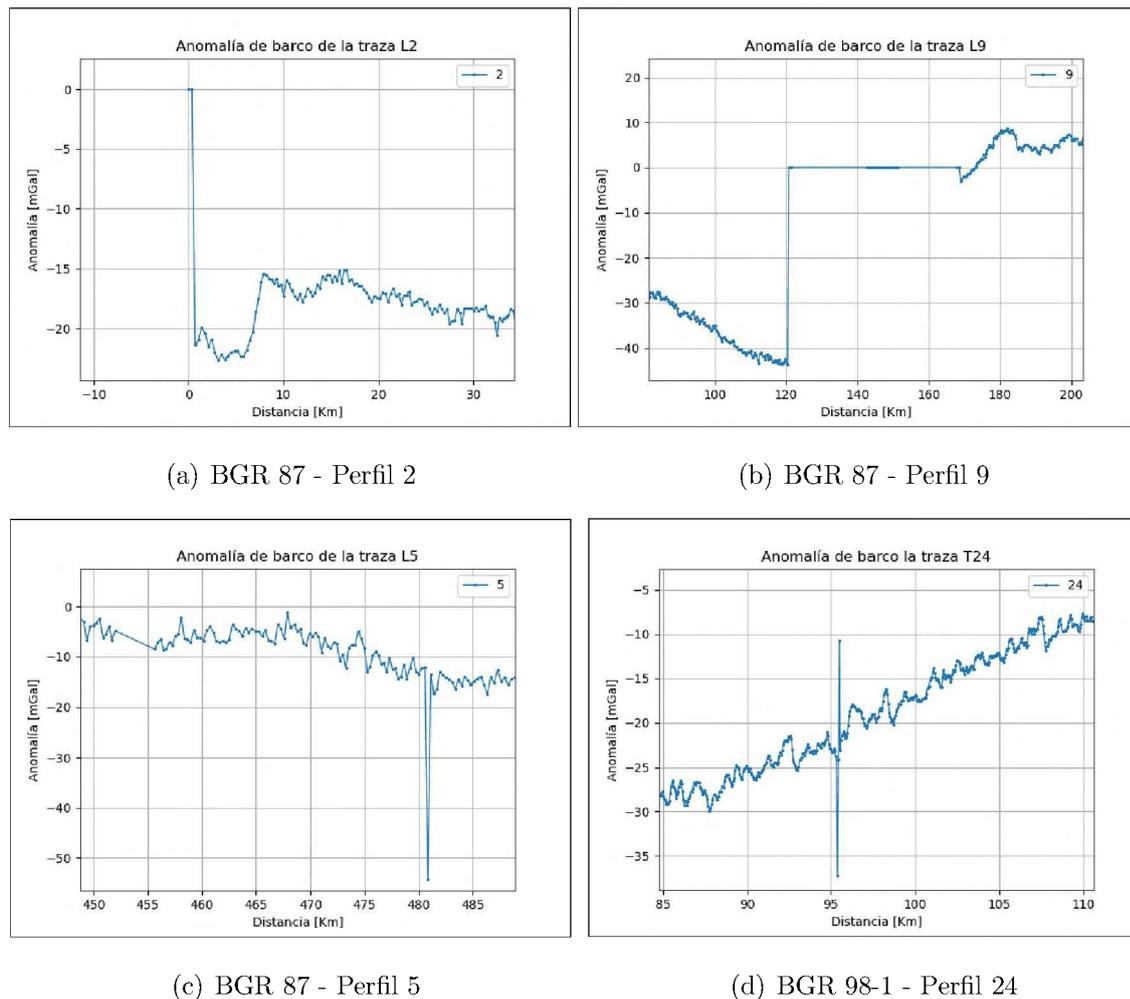


Figura 4.1: Ejemplos de errores de medición en los distintos perfiles o trazas.

En los ejemplos presentes en la figura 4.1 se detallan algunas de las situaciones

que se pueden corregir en esta etapa, como *outliers* de valor 0 mGal de anomalía de aire libre o valores extremos, tanto máximos como mínimos, con una apariencia anormal.

Además de corregir los tipos de errores de medición mencionados, se descartaron perfiles no relevantes que se encontraban muy lejanos del resto y no presentaban cruces. El número de observaciones y perfiles considerados en cada conjunto de datos, en comparación con la cantidad de datos originales, se detalla en el cuadro 4.1.

Conjunto de datos	Observaciones		Perfiles	
	Originales	Finales	Originales	Finales
Recopilación G	10683	5465	33	20
BGR 87	10465	10018	9	9
BGR 98-1	105996	105996	27	27
BGR 98-2	76086	76084	25	25
BGR 04-CHEKAN	109328	109328	14	14
BGR 04-CHETA	18188	18188	13	13
TOTAL	327600	330746	121	108

Cuadro 4.1: Cantidad de observaciones y perfiles por conjunto, antes y después del editado.

El mapeo de las observaciones finales se ilustra en la figura 4.2. Se observa que las campañas presentan diferentes cantidades y distribuciones de datos a lo largo y ancho del mar, pero todas tienen intersecciones entre sí, lo cual favorecerá las posteriores etapas de análisis y ajuste por cruces.

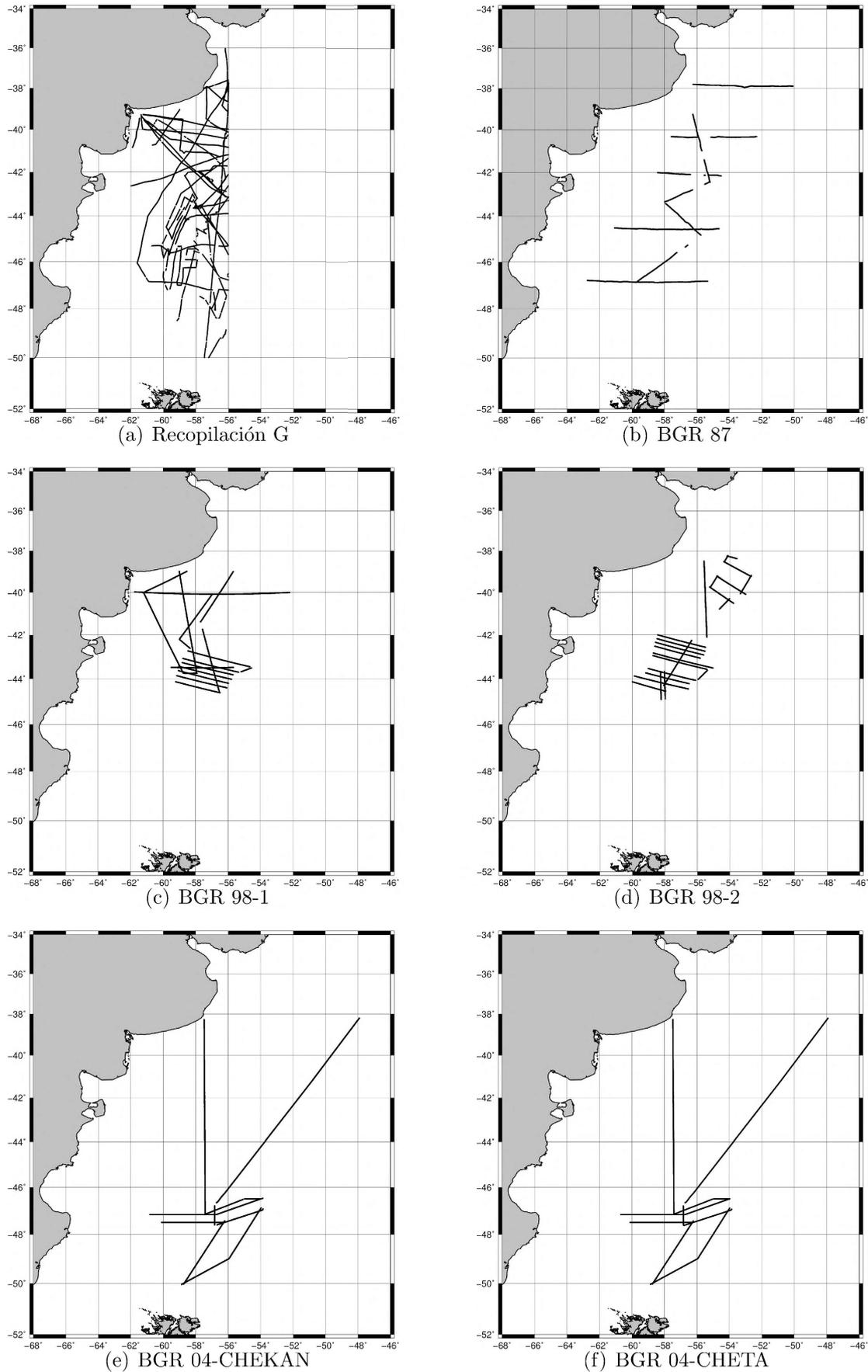


Figura 4.2: Conjuntos de datos de gravimetría marina editadas.

4.3. Análisis estadístico

Los datos de gravedad de los diversos perfiles fueron registrados en diferentes condiciones, por lo que es importante analizar de manera estadística la consistencia de cada campaña. La primera variable considerada es la diferencia entre la anomalía de aire libre proveniente de gravimetría marina y la interpolada de la grilla deducida de altimetría satelital. Tanto su valor medio como su desvío estándar van variando en cada perfil. Es crucial realizar un análisis espectral de los registros para determinar la magnitud del ruido presente en cada perfil y la longitud de onda crítica donde la información comienza a ser predominantemente ruido aleatorio, el cual asumimos como ruido blanco de media $\mu = 0$ y varianza $\sigma^2 = C$ constante.

Aplicando la FFT a la diferencia de anomalías en cada perfil, es posible realizar un análisis espectral de la información y evaluar la contribución de cada componente. El objetivo de este análisis espectral es descomponer los datos en una suma de sinusoides ponderadas. Esta descomposición permite evaluar el contenido en frecuencia del fenómeno en estudio, que podría concentrarse en una banda estrecha de frecuencias o extenderse a través de una amplia gama de frecuencias. Cuando los datos no contienen efectos aleatorios ni ruido, se denominan deterministas, y se puede calcular una transformada de Fourier. También es posible calcular la densidad espectral de potencia (PSD) [50], a partir de la transformada discreta de Fourier, cuando los efectos aleatorios oscurecen el fenómeno subyacente deseado, revelando una función constante en ella.

El método de Welch [50] estima la densidad espectral de potencia dividiendo los datos en segmentos superpuestos y obteniendo un periodograma modificado para cada segmento, para posteriormente promediarlos. Para este análisis, es necesario estimar una equidistancia promedio entre los puntos de observación para cada perfil. Al aplicar el método de Welch (con el módulo *signal* del paquete *SciPy* de

Python) a la diferencia entre las dos anomalías de aire libre para cada perfil, se puede estimar la longitud de onda λ_c donde la curva comienza a ser constante, lo cual indica la predominancia del ruido blanco.

Cada λ_c estimada será la longitud de onda de corte seleccionada para filtrar los datos del perfil correspondiente, y el área bajo la curva estima la varianza del ruido presente en ese perfil. En la figura 4.3 se presenta un ejemplo de la campaña BGR 87.

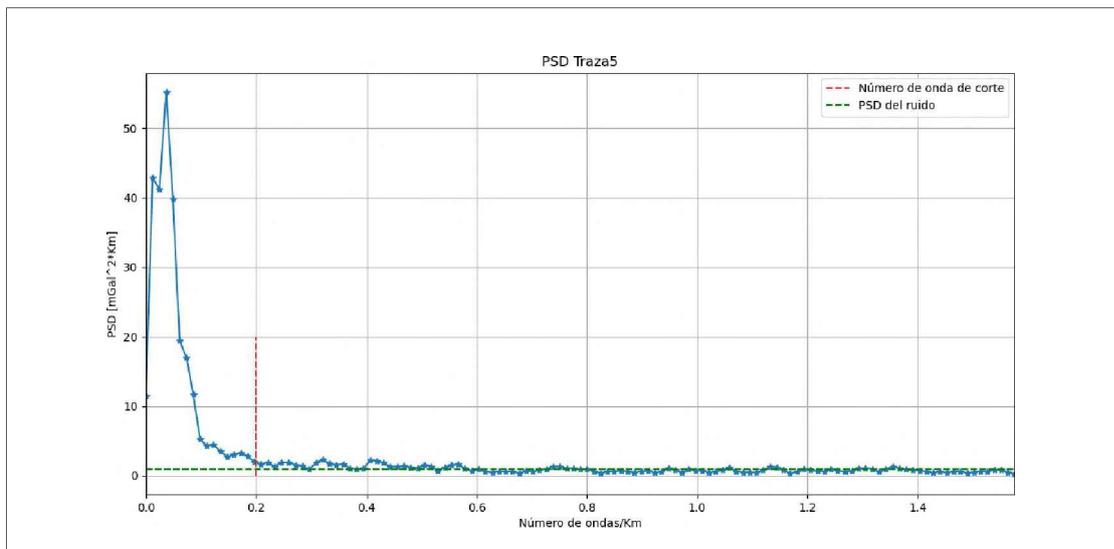


Figura 4.3: Densidad espectral de potencia estimada para el perfil 5 de la campaña BGR 87.

Para el filtrado, se utiliza la herramienta *sosfiltfilt* del módulo *signal* de *SciPy*, que aplica un filtro digital lineal dos veces (hacia adelante y hacia atrás) utilizando secciones de segundo orden en cascada. El filtro combinado tiene fase cero y un orden de filtrado doble respecto al original. El filtro seleccionado es del tipo Butterworth [5] pasa-bajo, caracterizado por su número de orden N y su frecuencia de corte ω_c , con su espectro de potencia $|H(\omega)|^2$ definido en función de la frecuencia angular ω según la ecuación 4.5.

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}} \quad (4.5)$$

El espectro de potencia de este filtro tiene sus primeras $2N - 1$ derivadas con valor 0 en $\omega = 0$, característica conocida como “aplanamiento máximo”. Luego, disminuye de manera monótona con una pendiente de $-20N$ dB por década. A la frecuencia de corte ω_c , la potencia del filtro cae a la mitad, y su espectro de amplitud se reduce a $\frac{1}{\sqrt{2}}$, lo que corresponde aproximadamente a -3 dB por debajo de la banda pasante [29].

En nuestro caso, cada perfil se filtra en el dominio de Fourier utilizando *sosfiltfilt* con un filtro Butterworth pasa-bajo de grado 6, con su correspondiente longitud de corte λ_c . La curva de este filtro se ilustra en la figura 4.4.

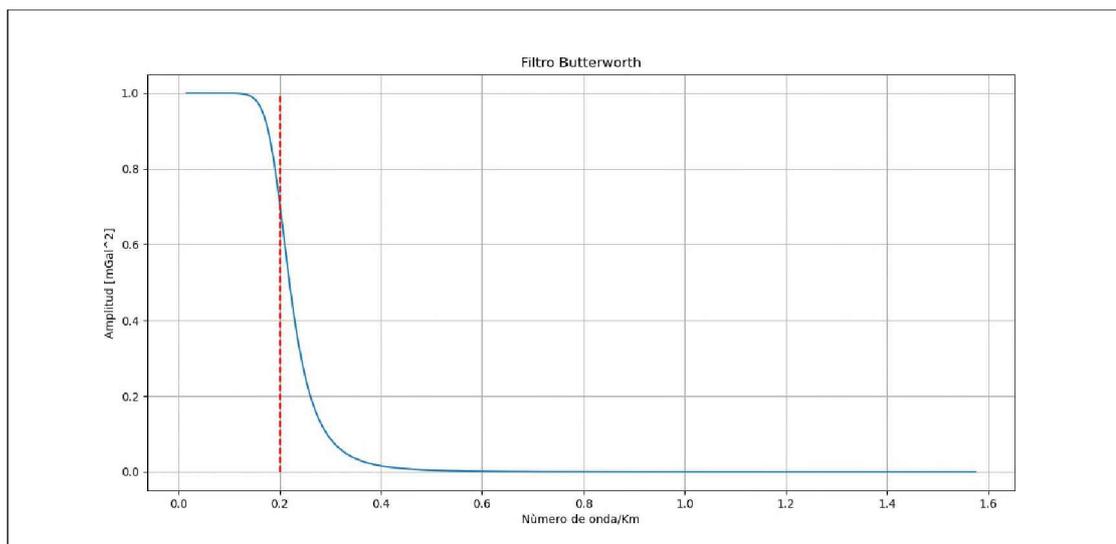


Figura 4.4: Aplicación del filtro Butterworth.

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestra un ejemplo de las tres curvas para un perfil: anomalías de aire libre de barco, tanto original como filtrada, y la correspondiente anomalía interpolada de altimetría satelital.

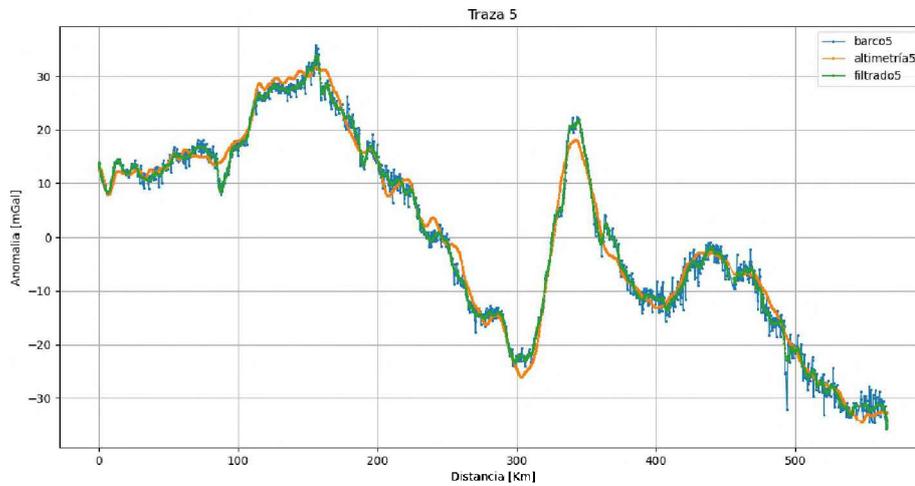


Figura 4.5: BGR 87 - Perfil 5 filtrado.

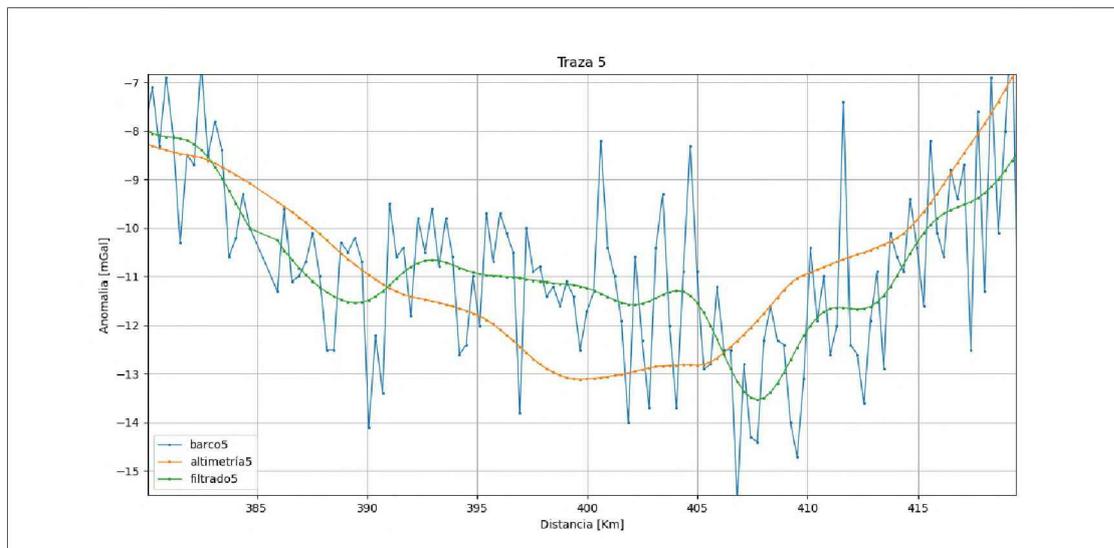


Figura 4.6: BGR 87 - Perfil 5 filtrado con ampliación.

En el cuadro 4.2 se resumen los valores obtenidos de la equidistancia promedio entre todos los perfiles de cada conjunto de datos, así como el desvío estándar

promedio del ruido, estimado con el área bajo la curva en el análisis de densidad espectral de potencia.

Conjunto	Equidistancia promedio [km]	σ_{ruido} [mGal]
Recopilación G	2.50	1.11
BGR 87	0.30	0.68
BGR 98-1	0.06	0.32
BGR 98-2	0.06	0.36
BGR 04-CHEKAN	0.04	0.06
BGR 04-CHETA	0.24	0.13

Cuadro 4.2: Equidistancias promedio y desvíos estándar estimados del ruido.

En esta etapa, se calcula un peso para cada perfil, que es inversamente proporcional al desvío estándar estimado del ruido presente, y se utilizará en etapas posteriores. También se calcula un peso promedio para cada conjunto.

4.4. Ajuste de cruces por campaña

Para analizar la coherencia interna de cada campaña de medición, así como del conjunto total de campañas en sí, es importante considerar los valores presentes en los *crossovers* de los distintos conjuntos de datos involucrados. Una vez estimados los cruces, el siguiente paso es corregir internamente cada campaña, aplicando correcciones en cada perfil, con el objetivo de minimizar las diferencias entre los datos y asegurar una coherencia interna. Para realizar esta tarea, se utilizará la rutina *x2sys* de GMT. Este conjunto de comandos para el análisis de intersecciones nos permitirá llevar a cabo cada paso de manera prolija y detallada.

4.4.1. X2SYS_HOME

El primer paso es configurar el parámetro de entorno *X2SYS_HOME* en un directorio donde se tenga permiso de escritura. Este directorio será donde *x2sys* registre nuestras configuraciones. Para ejecutar este paso, se utiliza el código 4.3.

Código 4.3 X2SYS_HOME.

```
1 export X2SYS_HOME="C:/Users/User/Desktop"
```

En el directorio indicado deberán estar todos los perfiles de la campaña sobre la cual se realice el ajuste interno por cruces. Ahora podemos inicializar nuestra tarea con *x2sys_init*, el punto de partida para cualquier usuario de *x2sys*.

4.4.2. X2SYS_INIT

La función de *x2sys_init* es inicializar un conjunto de bases de datos específicas para un tipo de datos de recorrido. Estos datos, junto con sus bases de datos asociadas y parámetros clave, reciben una notación abreviada denominada **TAG** de *x2sys*. El **TAG** permite el seguimiento de configuraciones como el formato de archivo, si los datos son geográficos o no, y la resolución para clasificar los índices de seguimiento. Ejecutar *x2sys_init* es un requisito previo para ejecutar cualquiera de los otros programas. Este paso se realiza mediante el código 4.4.

Código 4.4 x2sys_init.

```
1 gmt x2sys_init LLA -Dlla -Edat -Gd -Ndk -Rd -W%distancia% -V
```

En este comando, es importante tener en cuenta que **LLA** se refiere al nombre único de este tipo de datos **TAG** de *x2sys*. Además, **-D** indica el prefijo del archivo de definición de formato para este conjunto de datos. El archivo *lla*, de sufijo *.def* describe el formato completo, que incluye longitud, latitud, anomalía de aire libre

y otras características del tipo de dato de entrada. Nuestros archivos de datos presentan el sufijo *.dat*, por lo que el comando **-E** especificará esta extensión. Los registros se presentan en el formato de longitud $-180^{\circ}/180^{\circ}$, por lo que el atributo **-G** indicará la opción **-Gd**. El atributo **-N** establece las unidades de velocidad o distancia, por lo que en este caso **-Ndk** indicará una distancia en kilómetros. Para definir la región donde se realizarán las tareas, se elige **-Rd**, que indica una región global con longitud de $-180^{\circ}/180^{\circ}$ y latitud de $-90^{\circ}/90^{\circ}$, coincidiendo con el formato de nuestros conjuntos de datos.

Para evitar falsos cruces, es recomendable establecer un intervalo máximo permitido de distancia entre los dos puntos de datos adyacentes a cada lado de un cruce. Si se exceden estos límites, se asume una brecha de datos y no se determinará ninguna intersección. Este valor se elige adecuadamente según el orden de magnitud del equiespaciado promedio de cada conjunto de datos (ver cuadro 4.2) y se establece en el comando **-W**. El nivel de verbosidad predeterminado **-V** indicará solo las advertencias obtenidas durante la ejecución.

4.4.3. X2SYS_CROSS

El siguiente paso es utilizar la herramienta *x2sys_cross*, que se encarga de calcular los cruces entre los distintos perfiles y la diferencia de anomalía de aire libre en cada uno. Para esto, se ejecuta el código 4.5.

Código 4.5 x2sys_cross.

```
gmt x2sys_cross *.dat -TLLA -V > cross.out
```

Aquí, se establece la extensión de archivos como *.dat* con **-Edat**, el tipo de dato **LLA** como **TAG** con **-TLLA** y se genera un archivo de salida, que contiene la información de cruces. Este archivo incluye los nombres de los perfiles, la diferencia entre los valores de anomalía de ambos perfiles interpolados en las coordenadas

de cruces y el valor promedio entre ambos valores, entre otros. Además, se puede agregar $-Z$ para obtener en la salida los valores correspondientes a cada perfil en la intersección. De esta manera, se crea un mapa que refleje tanto los perfiles de una campaña como los cruces calculados con *x2sys*, con una escala que muestra el valor absoluto de la diferencia en los cruces entre los dos perfiles involucrados. Un ejemplo se ilustra en la figura 4.7.

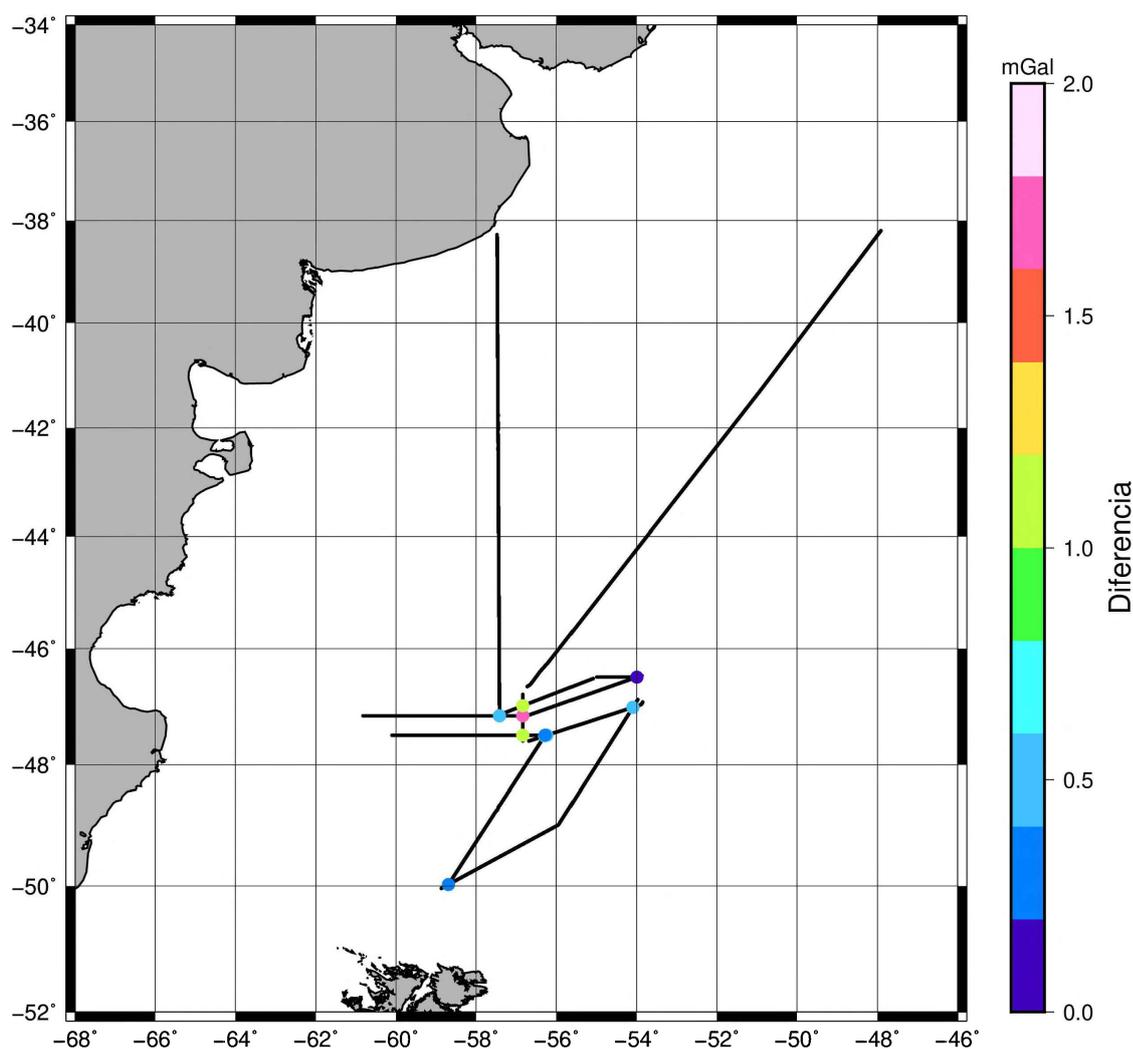


Figura 4.7: Mapa de los perfiles de BGR 04-CHEKAN y el valor absoluto de diferencia de anomalía de aire libre en los cruces.

4.4.4. X2SYS_REPORT

Con *x2sys_report* se generan un informe de estadísticas de la base de datos cruzada al ejecutar el código 4.6.

Código 4.6 x2sys_report.

```
gmt x2sys_report cross.out -Ca -Rd -TLLA -V > report.out
```

Es necesario introducir el archivo de salida de *x2sys_cross*, y en la opción de columna **-C**, seleccionar la de anomalía [a] mediante **-Ca**. El archivo de salida contiene información de los cruces de cada perfil de la campaña: número de cruces, media μ , desvío estándar σ y la media cuadrática RMS (del inglés *root mean square*), que se define según la ecuación 4.6:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum x_i^2} \quad (4.6)$$

Además, el valor de RMS se relaciona con μ y σ mediante la ecuación 4.7:

$$RMS = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (4.7)$$

Conjunto de datos	Número de cruces	RMS [mGal]
Recopilación G	125	7.12
BGR 87	4	1.09
BGR 98-1	1290	4.2
BGR 98-2	35	1.69
BGR 04-CHEKAN	10	0.81
BGR 04-CHETA	9	1.29

Cuadro 4.3: Estadísticas de *x2sys_report*: número de cruces y valores RMS.

Un resumen de estas estadísticas se muestra en el cuadro 4.3, donde se observa que los conjuntos suelen ser más consistentes mientras más recientes son, con la excepción de BGR 87, aunque el mismo solo presenta cuatro cruces.

4.4.5. X2SYS_LIST

Para realizar un ajuste por cruces, primero es necesario extraer un subconjunto de datos de cada perfil utilizado *x2sys_list*, como se muestra en el código 4.7.

Código 4.7 x2sys_list.

```
1 gmt x2sys_list cross.out -Ca -Fncw -Wpesos.w -TLLA -V > list.out
```

Es necesario introducir el archivo de salida de *x2sys_cross* y, en el comando **-W**, establecer un archivo *pesos.w* que contiene una columna con los nombres de perfiles y sus respectivos pesos asociados, calculados en la sección de análisis estadístico 4.3. El atributo **-F** asegura que la salida del comando incluya los nombres de perfiles en las intersecciones, las diferencias en ellas y el peso asociado.

4.4.6. X2SYS_SOLVE

Con esta información, estamos listos para calcular las correcciones para cada perfil con *xsy_solve*, estimadas a partir de mínimos cuadrados y que luego se aplicarán en forma sistemática a cada uno de los perfiles involucrados en cruces. Se calculan ejecutando el código 4.8.

Código 4.8 x2sys_solve

```
1 gmt x2sys_solve list.out -Ca -Ec -W -TLLA -V > solve.out
```

Se introduce el archivo obtenido previamente con la rutina *x2sys_list*, seleccionando como tipo de corrección en **-E** la de *offset* constante, mediante **-Ec**. Esto

implica aplicar un valor fijo a cada perfil. Además, se especifica con **-W** que se desea utilizar la columna extra como pesos.

Se genera un archivo de salida que contiene las correcciones sugeridas para la columna de anomalía de cada perfil junto con información sobre el cálculo de cruces mediante mínimos cuadrados. Esto incluye el número de *crossovers*, número de *clusters* o grupos independientes, distribución de los perfiles, incógnitas, restricciones y ecuación matricial.

4.4.7. X2SYS_DATALIST

Para aplicar las correcciones calculadas a los perfiles, se utiliza *x2sys_datalist*, como se expresa en el código 4.9.

Código 4.9 x2sys_datalist.

```
gmt x2sys_datalist =tracks.lis -Lsolve.out -TLLA -V > datalist.out
```

El código se aplica a los perfiles ordenados en la lista *tracks.lis*, que contiene los nombres de todos los perfiles. Las correcciones a aplicar en **-L** son las obtenidas mediante *x2sys_solve*. El archivo de salida incluye todos los registros ordenados según la lista, y tienen la columna de anomalía corregida según el ajuste de cruces interno calculado en cada campaña.

En el cuadro 4.4, que contiene con los valores RMS en los cruces calculados por *x2sys_report* antes y después del ajuste, se observa un éxito del ajuste en todos los casos. Además, en el cuadro 4.5 se muestran los promedios y desvíos estándar de los residuos entre anomalía de aire libre de gravimetría marina ajustadas y la interpolada de la grilla de altimetría satelital, donde se observa que las campañas más recientes de BGR 04 presentan en general un menor desvío estándar de residuos con altimetría satelital que el resto de las campañas, pero a la vez disponen de un mayor valor promedio de los mismos en comparación. Esta situación se

atenderá en etapas posteriores de este trabajo.

Conjunto de datos	RMS_{pre} [mGal]	RMS_{post} [mGal]	$\frac{RMS_{post}}{RMS_{pre}}$ [%]
Recopilación G	7.12	5.73	80.61
BGR 87	1.09	1.6e-4	1.5e-4
BGR 98-1	4.2	3.92	93.57
BGR 98-2	1.69	1.17	69.23
BGR 04-CHEKAN	0.81	0.08	9.87
BGR 04-CHETA	1.29	0.07	5.42

Cuadro 4.4: RMS en los cruces, antes y después del ajuste por conjunto.

Conjunto de datos	\overline{RES} [mGal]	σ^{RES} [mGal]
Recopilación G	0.32	5.16
BGR 87	0.25	2.28
BGR 98-1	-1.05	3.51
BGR 98-2	-3.03	2.54
BGR 04-CHEKAN	4.55	1.17
BGR 04-CHETA	-8.79	4.36

Cuadro 4.5: Promedio \overline{RES} y desvío estándar σ^{RES} de los residuos entre anomalía de aire libre de gravimetría marina ajustadas por conjunto e interpolada de la grilla obtenida con altimetría satelital.

Además, el resultado del ajuste realizado se muestra en las figuras 4.8 y 4.9 con el mapeo de los valores absolutos en los cruces y en las curvas de anomalía de aire libre de la figura 4.10.

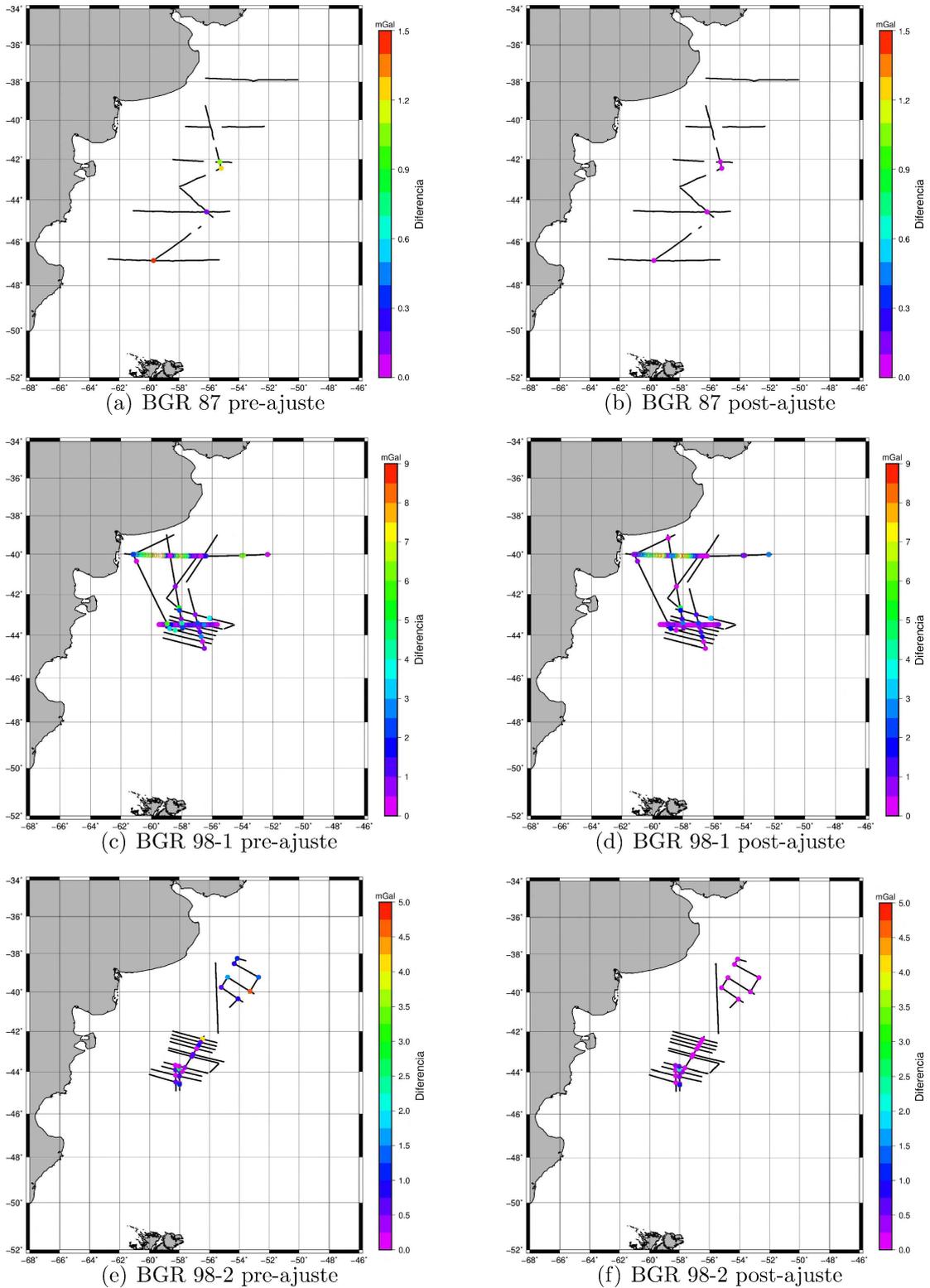


Figura 4.8: Mapas de diferencias absolutas de anomalías de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste, para los conjuntos BGR 87 y BGR 98.

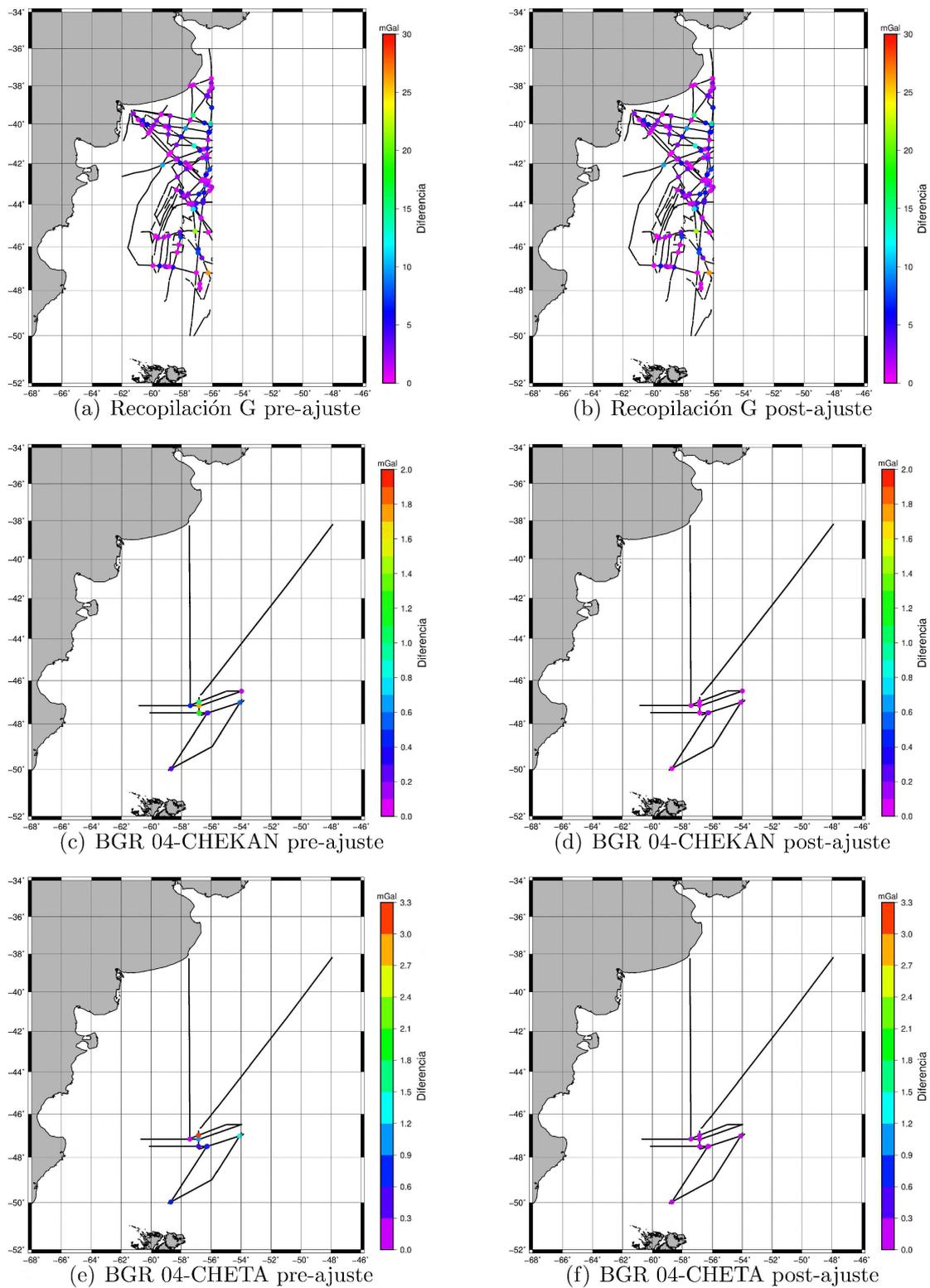
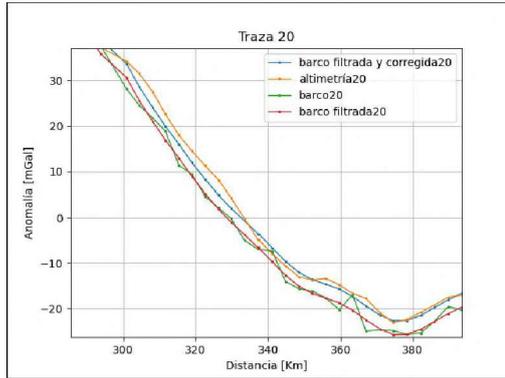
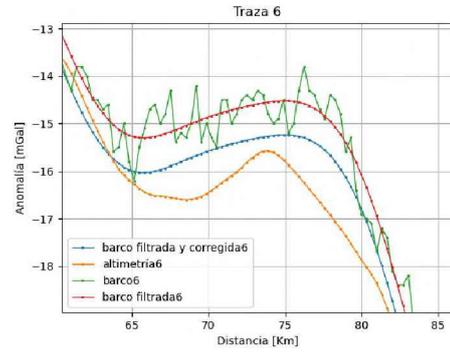


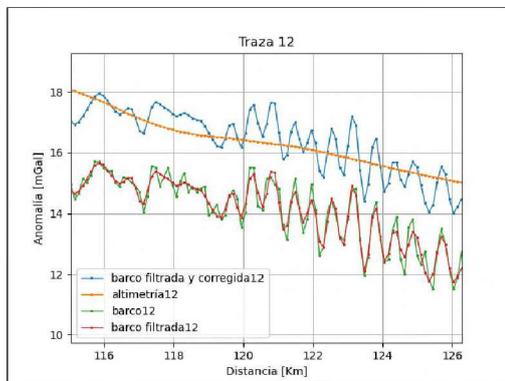
Figura 4.9: Mapas de diferencias absolutas de anomalías de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste, para los conjuntos de Recopilación G y BGR 04.



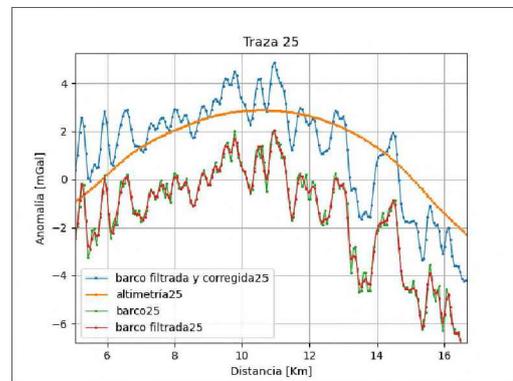
(a) Recopilación G



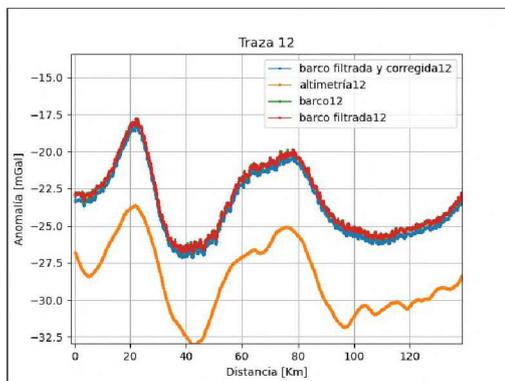
(b) BGR 87



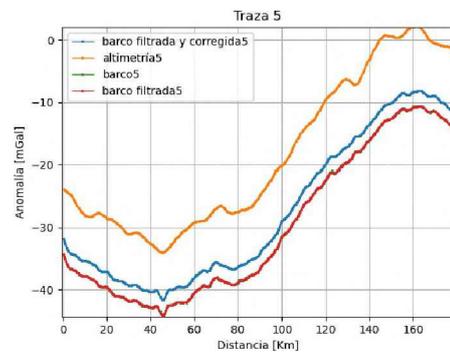
(c) BGR 98-1



(d) BGR 98-2



(e) BGR 04-CHEKAN



(f) BGR 04-CHETA

Figura 4.10: Perfiles de anomalía de aire libre observadas en barco originales, filtradas, corregidas por ajuste e interpoladas con la grilla obtenida con la técnica de altimetría satelital.

4.5. Ajuste por cruces entre campañas

Una vez que los seis conjuntos han sido corregidos internamente por cruces en la etapa anterior, se garantiza la coherencia interna en cada uno de ellos. Para lograr una base de datos total que mantenga dicha coherencia interna, es necesario también analizar los cruces entre ellos, y posteriormente realizar un nuevo proceso de ajuste, utilizando los pesos diseñados para cada uno y analizando las particularidades de cada caso.

Al examinar exhaustivamente los cuadros 4.2, 4.3 y 4.4, así como las curvas de anomalía de aire libre provenientes tanto de gravimetría marina como en altimetría satelital para cada perfil de cada campaña, se destacan las siguientes observaciones:

- A medida que las campañas son más recientes, ha sido necesario editar una menor cantidad de observaciones, lo que indica una mejora en la calidad de los datos.
- La equidistancia promedio de las campañas ha disminuido con los años (ver cuadro 4.2) desde los 2.5 km hasta los 0.04 km, lo que ha permitido un muestreo con una mejor resolución.
- El nivel de ruido presente estimado en el proceso de análisis estadístico se ha reducido considerablemente con el paso del tiempo (cuadro 4.2).
- El valor RMS de los cruces calculado por *x2sys_report* señala que los valores son generalmente mejores en las campañas más recientes (cuadro 4.3).
- Luego del proceso de ajuste por cruces, las campañas de BGR 04 destacan por presentar una mayor diferencia promedio entre las anomalías provenientes de barco y de altimetría satelital en comparación a las otras campañas (cuadro 4.4 y figura 4.10).

- Al analizar las curvas de la figura 4.10 y la información de los perfiles por separado, se observa que las diferencias estimadas para las campañas de BGR 04 son consistentes con las diferencias promedios *barco-altimetría satelital* para todos sus perfiles (cuadro 4.4), lo que sugiere la necesidad de realizar un ajuste por *offset* constante para estas dos campañas antes de realizar el ajuste final entre todas.

Con base en estas observaciones, se concluye que para realizar el ajuste final, es necesario primero considerar un ajuste excluyendo a las campañas de BGR 04, con el objetivo de establecer una referencia correcta de la base de datos que se busca obtener. Una vez referenciada la campaña BGR 04, se procede a realizar el ajuste global, esta vez incluyendo todas las campañas, completando de esta manera un proceso iterativo de retroalimentación para este ajuste. Los pasos a seguir serán entonces:

1. Realizar el ajuste por cruces únicamente entre las campañas BGR 87, BGR 98-1, BGR 98-2 y la Recopilación G, teniendo en cuenta los pesos diseñados para cada una y creando un conjunto de referencia entre todas ellas, que llamaremos REF.
2. Diseñar el ajuste por *offset* que se le deberá aplicar a BGR 04-CHEKAN, promediando el valor calculado en sus cruces con el conjunto REF. Repetir el mismo proceso para BGR 04-CHETA.
3. Aplicar el ajuste por *offset* constante a las campañas del BGR 04, logrando de esta manera referenciarlas y dejarlas listas para el ajuste global.
4. Realizar el ajuste global entre todas las campañas, teniendo en cuenta los pesos para cada campaña y considerando todos los cruces, a excepción de los sugeridos entre BGR 04-CHEKAN y BGR 04-CHETA, ya que se midieron simultáneamente.

5. Al finalizar, se obtendrá una base de datos consistente de gravimetría marina llamada GM, que incluirá las observaciones de todas las campañas.

La primera etapa consiste en realizar el ajuste entre Recopilación G, BGR 87, BGR 98-1 y BGR 98-2. Este ajuste incluirá la corrección por *offset* calculado considerando los pesos para cada una diseñados al momento de realizar el análisis estadístico de los datos y descartando los cruces internos de cada campaña (agregando -Qe en *x2sys_cross*). Para realizar este paso, se repite para las campañas la rutina de comandos de *x2sys* que se empleó para conseguir el ajuste interno de cada campaña. De esta manera se logra obtener el conjunto de referencia REF, que contiene los cuatro conjuntos mencionados previamente.

Con el conjunto REF ya creado, se podrán analizar para cada campaña de BGR 04 los cruces con REF. Siguiendo un procedimiento similar al utilizado en los ajustes anteriores, se llega en *x2sys_report* a un valor promedio de diferencia en los cruces, que se elegirá en *x2sys_solve* como corrección de *offset* para aplicarse sobre BGR 04-CHEKAN y BGR 04-CHETA mediante *x2sys_datalist*.

Una vez referenciadas las campañas del BGR 04, se procederá al ajuste final entre todas las campañas nuevamente siguiendo la rutina de comandos previamente descrita. El ajuste se realiza considerando los pesos asignados a cada campaña y utilizando correcciones constantes.

Culminado el proceso de ajuste total entre todas las campañas, realizado en base a un total de 563 cruces totales, se consigue la base de datos de anomalías de gravedad marina de cruceros pura GM. Las estadísticas de este ajuste, presentadas en el cuadro 4.6 detallan para antes y después del ajuste, los valores RMS de los cruces entre campañas en miligales, calculados por *x2sys_report*. También se muestran los valores promedios de los residuos \overline{RES} en miligales con los interpolados de altimetría satelital. En ambos casos, el ajuste muestra resultados satisfactorios.

Parámetro	Pre-ajuste	Post-ajuste
RMS_{cruces} [mGal]	5.1	4.1
\overline{RES} [mGal]	-1.9	-1.6

Cuadro 4.6: Estadísticas del ajuste final de GM: valores de RMS en los cruces RMS_{cruces} y residuos promedios con altimetría satelital \overline{RES} , *pre* y *post* ajuste.

En la figura 4.11 se realiza la comparación entre los valores absolutos de las diferencias en los cruces antes y después del ajuste.

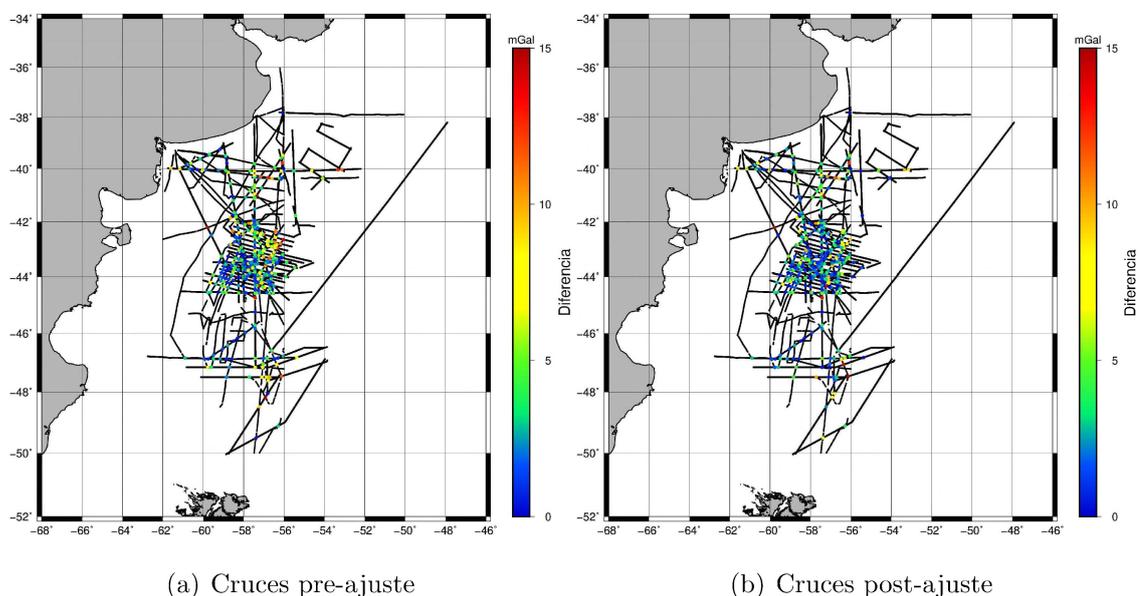


Figura 4.11: Diferencias absolutas de anomalía de aire libre en los cruces, antes y después del ajuste final entre campañas en GM.

El conjunto de datos GM será el producto final de registros de anomalías de aire libre derivadas de observaciones marinas de crucero. El mapa de anomalías de este conjunto cubre gran parte del área proporcionada por la altimetría satelital, pero con una mejor resolución. El próximo paso será combinar ambos conjuntos

de datos en una compilación.

Se mapean las anomalías de aire libre de crucero finales del conjunto GM en la figura 4.12, junto con un mapa residual con los valores interpolados de altimetría satelital.

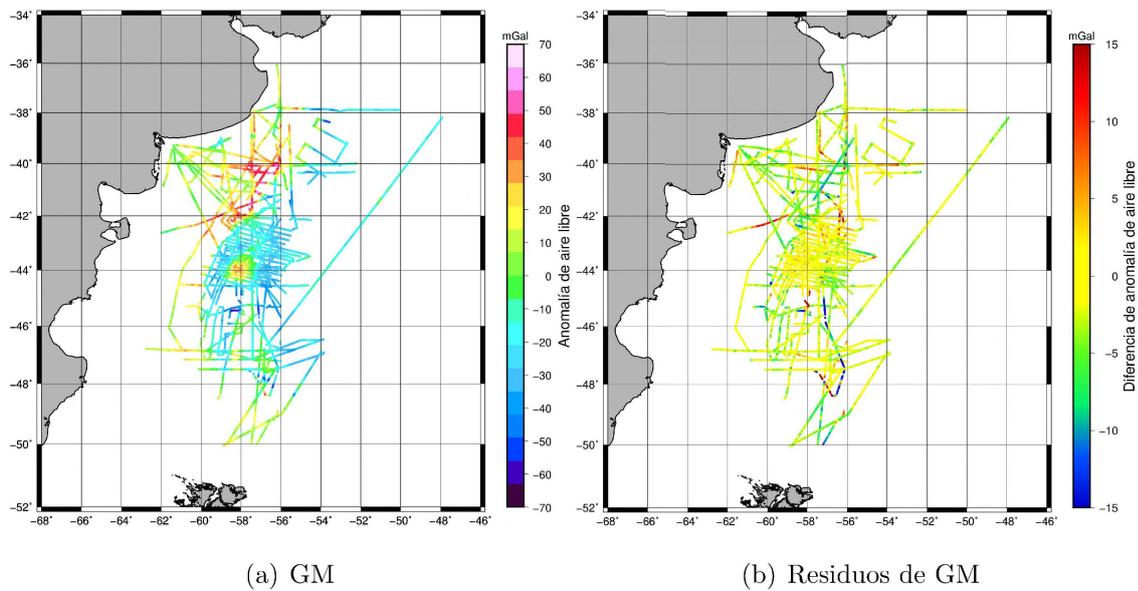


Figura 4.12: Anomalías de aire libre de GM y residuos de su comparación con interpolados de la grilla de altimetría satelital

Capítulo 5

Compilación

En este capítulo, el objetivo será obtener una técnica que permita combinar de manera optimizada los dos conjuntos correspondientes a cada una de las técnicas observacionales disponibles:

- GM: conjunto de datos de anomalía de gravedad derivados de registros de gravimetría marina. Es el producto de la unión con ajuste de los conjuntos Recopilación G, BGR 87, BGR 98 y BGR 04, cuyo procedimiento se describió y realizó en el capítulo 4.
- A: grilla de datos correspondiente a la versión V32.1 de la serie de datos derivados de altimetría satelital de Sandwell & Smith, cuya descripción se encuentra en el capítulo 3.

Al realizar el grillado de regiones extensas y con buena resolución, el factor limitante puede ser la capacidad computacional. Inicialmente, para mostrar el funcionamiento y las características de nuestra compilación se establecerá una grilla sobre el área total cubierta por los datos de GM, utilizando la mayor resolución permitida por la capacidad computacional disponible.

Posteriormente, en un área seleccionada estratégicamente por la distribución de datos presentes en ella, se realizará un nuevo grillado utilizando tanto los datos de GM como de A. La resolución en este caso será significativamente mayor gracias al área de la zona establecida, que al ser de un tamaño reducido utilizará una menor cantidad de datos, permitiendo de esta manera exigir una mejor resolución

en el cálculo computacional y demostrar el potencial que puede obtenerse con esta técnica de modelado.

Para lograr esta compilación se propone obtener dos grillas distintas finales con diferentes tamaños y resoluciones:

- Una grilla que cubra el área total de datos de GM, utilizando estos datos con el apoyo de datos de A.
- Una grilla con una mejor resolución que cubra un área reducida donde se encuentre la mayor densidad de datos de GM, utilizando estos datos con el apoyo de datos de A.

5.1. Procedimiento

Para lograr la compilación entre GM y A, se propone utilizar Verde [46], una librería en Python que cuenta con herramientas para el procesamiento espacial de datos geofísicos y su interpolación en grillas regulares. Posteriormente, se realizará una validación mediante otro algoritmo que utilice el módulo de GMT *Surface*, que permite crear grillas a partir del modelado de superficies sobre datos.

5.1.1. Grillado

La librería Verde ofrece métodos básicos de interpolación inspirados en “aprendizaje automático” (más conocido por su denominación en inglés *machine-learning*), mientras que su interfaz se presenta muy similar a otra librería de Python llamada *scikit-learn*. Será la librería encargada de realizar el modelado y de crear la grilla final de datos.

Para lograr una grilla basada en nuestros datos de GM y A, es necesario unir ambos conjuntos de datos en un único archivo, con sus respectivas columnas de

incertidumbre establecidas, que serán:

- GM: en el capítulo 4 se estimaron varios desvíos estándar σ del ruido, los cuales se promedian para tomar como incertidumbre general. El promedio calculado es de 0.25 mGal.
- A: se utilizarán las incertidumbres σ proporcionadas por la base de datos de Sandwell & Smith para una de las coordenadas utilizadas. Las mismas presentan una media estimada de 1 mGal.

El primer paso es crear una envolvente convexa mínima (*convex-hull*) para los datos de GM con el atributo *ConvexHull* del módulo *spatial* en *Scipy*. Esta envolvente se utilizará luego como máscara para los datos de A.

El modulo *gmt spatial* genera un polígono utilizando los vértices obtenidos anteriormente y se lo convierte al formato ASCII mediante el módulo *gmt convert*, ya que es el formato necesario para poder aplicar una máscara con un polígono con *gmt select*.

El módulo *gmt select* aplica la máscara de GM a los datos de A, asegurando que solo se utilicen datos que se encuentren dentro de la zona cubierta por GM. Además, se descartan las mediciones que se puedan encontrar cercanas a la costa o sobre tierra, donde se observan incertidumbres muy grandes. Por ello, también se opta por filtrar, mediante el módulo recientemente mencionado, los datos que tengan en la columna de incertidumbre un valor mayor a 3 mGal (valor aproximado a 3σ).

De este modo, se obtiene la base de datos derivados de altimetría satelital que se utilizará en el proceso y que se muestra en la figura 5.1. Aún se observan regiones de mayor incertidumbre en las zonas cercanas a la costa y en pequeñas áreas al este del meridiano -55° .

En un archivo se juntan los 325079 datos GM y los 602932 de A, con sus longitudes, latitudes, anomalías e incertidumbres. Estos datos y los resultantes se manejarán como *Data-frames* de Pandas dentro del código.

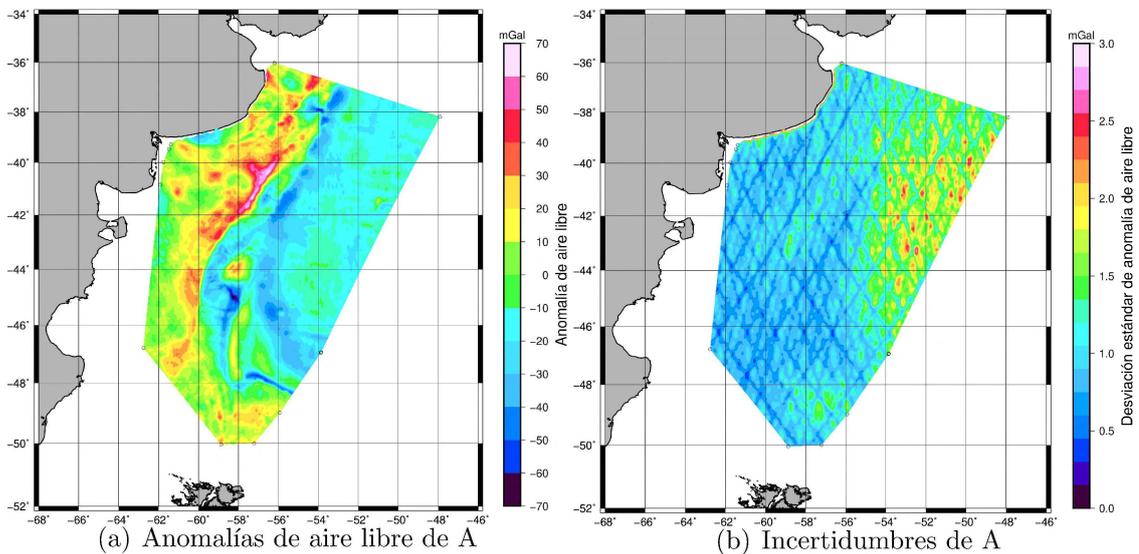


Figura 5.1: Anomalías de aire libre e incertidumbres de A.

El paquete Verde ofrece diversas herramientas para el modelado de diferentes tipos de datos. En nuestro caso, los principales elementos de nuestro modelo serán:

- *BlockMean*: calcula una media ponderada por bloques sobre los datos. Proporcionando las incertidumbres de las observaciones, conlleva a que la incertidumbre promedio del bloque se obtenga de la propagación de las correspondientes a las observaciones.
- *Trend*: aproxima los datos con una tendencia polinomial 2D, superficie definida por su grado N y calculada mediante regresión por mínimos cuadrados.
- *Spline*: correspondiente a la *Biharmonic Spline Interpolation* usando funciones de Green. Implementa los Splines 2D de Sandwell [37], donde cada

función de Green se corresponde con la deflexión elástica de una lámina delgada sujeta a una fuerza vertical. En este caso, la interpolación se realiza estimando fuerzas que producen desviaciones que se ajustan a los datos observados usando mínimos cuadrados. Luego, los puntos interpolados se pueden evaluar en cualquier ubicación. Para optimizar la estabilidad, es posible aplicar regularizaciones mediante amortiguamientos, suavizando así las fuerzas estimadas y los valores interpolados.

Finalmente, se encadena mediante *Chain* una media ponderada de bloques *BlockMean*, un modelo *Trend* y uno de tipo *Spline* ponderados. Se utilizará la propagación de incertidumbres para calcular los nuevos pesos a partir de la media de los bloques, ya que nuestros datos varían suavemente pero tienen diferentes incertidumbres.

5.1.2. Validación

Para la validación, se realizarán los grillados utilizando el modelado del módulo *surface* de GMT, que interpola los datos con una superficie que tiene *splines* con derivadas segundas continuas y una curvatura cuadrática total mínima. Esta herramienta lee la tabla de datos (x, y, z, w) , siendo x, y, z las coordenadas del punto, mientras que w es el valor otorgado en esa coordenada para el momento de grillar los datos. Se genera en un archivo una grilla binaria de valores grillados $z(x, y)$ mediante la resolución de la ecuación 5.1:

$$(1 - T) * L(L(z)) + T * L(z) = 0 \quad (5.1)$$

En la ecuación 5.1, T representa el factor de tensión, cuyo valor se encuentra dentro del rango $[0, 1]$ y L indica el operador de Laplace. Cuando $T = 0$, se obtiene la solución de “mínima curvatura”, la cual puede generar oscilaciones no deseadas

y falsos máximos o mínimos locales [53], por lo que se recomienda utilizar $T > 0$ para mitigar estos efectos. La experiencia [53] sugiere utilizar $T \approx 0.25$ para los datos relacionados con campos potenciales, como sucede en nuestro caso.

Se utilizará *blockmean* como preprocesador antes de ejecutar la superficie, para evitar el alias de longitudes de onda cortas. Esta rutina también es útil para decimar o promediar datos. Las grillas se calcularán en las mismas coordenadas que se realizaron las correspondientes a la sección Verde y el equiespaciado que se utilizará en cada caso será igual al del proceso realizado en la sección de grillado con Verde. Cabe destacar que, además, se utilizarán:

- Librerías de Python: *Pandas* y *NumPy* para el manejo de datos y operaciones, *Matplotlib* y *Seaborn* para la creación de diversos gráficos, *PyProj* para establecer proyecciones y *SciPy* para aplicar los *convex-hull*.
- Módulos de GMT: *gmt spatial* para crear polígonos, *gmt convert* para convertir a ASCII, *gmt select* para filtrar datos en el dominio espacial, *gmt mask* y *gmt landmask* para crear máscaras y *gmt math* para aplicar estas máscaras.

5.2. Grilla del área total

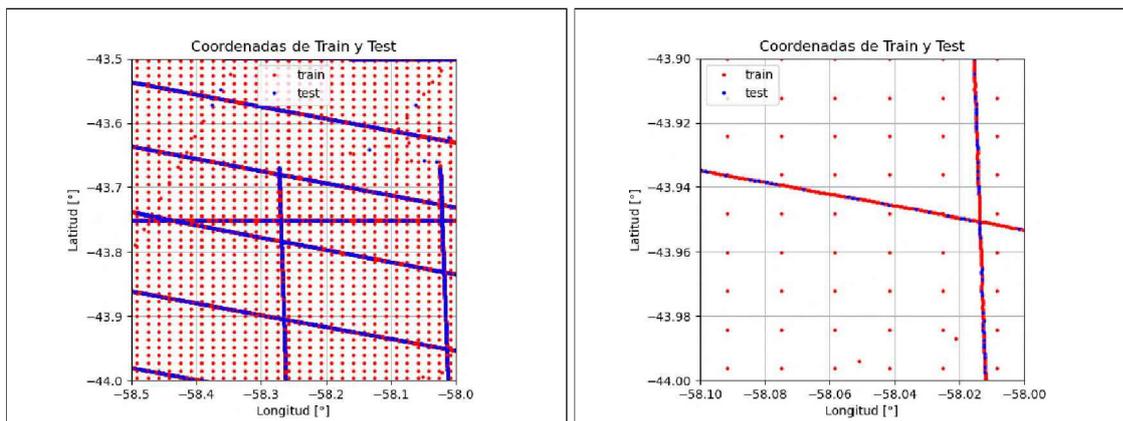
Dado que tenemos un total de 928011 datos correspondientes a GM y A, y una región muy extensa por cubrir, el cómputo a realizar limitará el espaciamiento del modelado a 1' de arco. Los datos a utilizar son aquellos mapeados anteriormente en las figuras 4.12 y 5.1.

Los datos se dividirán en *Train* y *Test* de manera aleatoria mediante *train_test_split*, utilizando las coordenadas proyectadas con *PyProj*, el vector de anomalías a , y estableciendo el vector de pesos w , donde cada peso w_i se calcula en base a las incertidumbres σ_i como se muestra en la ecuación 5.2.

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (5.2)$$

Debido a que la división realizada por *train_test_split* es aleatoria en cada compilación, si se busca asegurar una misma distribución cada vez que se compile el código es necesario “marcarla” con un número de referencia mediante *seed*. Cada vez que se desee generar el mismo *split*, se debe establecer el atributo *seed* con el número correspondiente o cambiarlo si se busca una nueva distribución.

El modelo se entrenará con el conjunto *Train*, mientras que el conjunto *Test* se utilizará para evaluarlo. En este caso se separan los registros de A junto con el 80 % de los correspondientes a GM para el set Train, reservando el 20 % restante de GM para el set Test. Esta proporción se ilustra en las imágenes de la figura 5.2.



(a) Datos de *Train* y *Test* con ampliación (b) Datos de *Train* y *Test* con más ampliación

Figura 5.2: Distribución de datos de los conjuntos *Train* y *Test*.

Entre las diferentes operaciones que pueden realizar los estimadores, destacan:

- *Predict*: predice el valor en una coordenada utilizando el estimador asociado (como *splines* o *trends*) en el comando.

- *Filter*: evalúa los residuos entre los valores de los datos observados de entrada y sus valores predichos.
- *Fit*: ajusta el estimador elegido como modelo a los datos.

Para entrenar el modelo, se ejecuta *Chain.fit* en las coordenadas de *Train*. Esta operación se encarga de realizar el ajuste de los estimadores encadenados en el modelo a los datos dados, uno por uno. Las coordenadas se conservan, aunque se van modificando los valores de las observaciones. Cada estimador de la cadena *Chain* ajusta los residuos del estimador anterior. Al realizar una predicción, los estimadores (como en *Splines* o *Trends*) de cada etapa se suman. Si las operaciones encadenadas no utilizan *predict* (como en *BlockMean*) entonces pueden cambiar el valor del dato y sus coordenadas, pero no impactan en una predicción final.

En nuestro diseño, la primera etapa de la cadena es *BlockMean*, que calcula una media ponderada por bloques a los datos. A menudo, suele haber casos de sobre-muestreo en una dirección. En estos casos, es necesario decimar los datos antes de interpolar para evitar efectos de *aliasing* y una manera adecuada de hacerlo en casos de gravimetría es aplicando *BlockMean*. La salida de esta etapa es llevada por *Chain* como entrada para el turno de las etapas de estimadores.

El primer estimador es *Trend*, que ajusta los datos ingresados con un polinomio de tendencia 2D de grado 4, utilizando los operadores *fit*, *predict* y *filter*. Los residuos resultantes al culminar la etapa *Trend* son ajustados con el estimador *Spline*, obteniendo un modelado de tipo *Biharmonic Splines Interpolation*.

Al evaluar nuestro modelo encadenado en el conjunto *Test* mediante *Chain.Score*, se obtiene un valor representativo del ajuste, producto de la comparación entre el dato original de *Test* y el valor predicho por nuestro modelo. El *score* es el coeficiente de determinación R^2 , que cuantifica la validez de una predicción con el valor 1 asociado a una predicción perfecta del estimador. Identificando a σ_{tot}^2 como

la varianza de los datos y σ_{res}^2 como la varianza de los residuos, entonces se puede definir a R^2 como se expresa en la ecuación 5.3:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_{res}^2}{\sigma_{tot}^2} \quad (5.3)$$

En nuestro caso, el *score* R arrojó un valor de 0.989, indicando una predicción altamente satisfactoria de nuestro modelo encadenado final sobre los aproximadamente 65000 datos de testeo. Este resultado fue superior a los obtenidos utilizando un espaciado mayor o bien aplicando únicamente estimadores no encadenados, como *Splines* o *Trend*. El paso final es obtener nuestra grilla final de datos evaluando a nuestro modelo en una grilla de espaciado 1' de arco mediante *Chain.grid*. La grilla resultante será el resultado de la predicción en las coordenadas de la grilla de los modelos acumulados a lo largo de la cadena aplicados en conjunto.

En la figura 5.3 se ilustran las predicciones de los modelos *Trend*, *Spline* y la predicción sumada final del modelo. La influencia del estimador *Trend* se verifica en las componentes de larga longitud de onda de la predicción final, mientras que el estimado *Spline* aporta las variaciones de menor longitud de onda, complementando un modelo bien entrenado de las anomalías de aire libre de esta región.

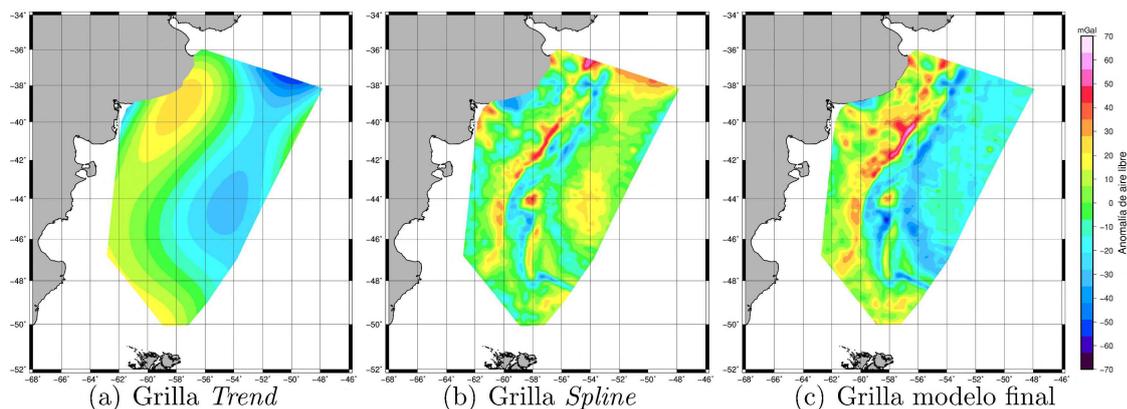


Figura 5.3: Modelos de Verde acumulados para la grilla modelo final del área total.

El resultado comparativo con las bases de datos A y GM, se muestra en las imágenes de la figura 5.4. Ambos presentan estructuras generales similares, pero con diferentes distribuciones de datos, logrando complementarse de buena manera mediante Verde para lograr el producto final.

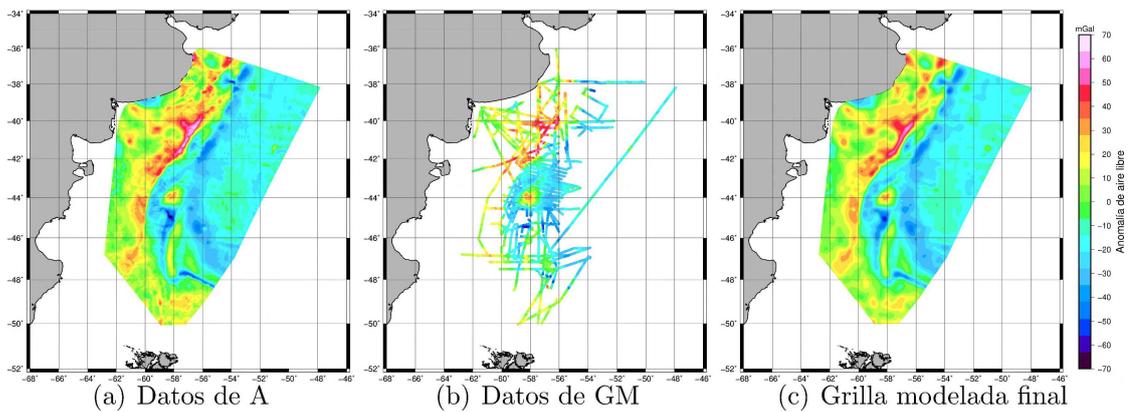


Figura 5.4: Comparación de anomalías de aire libre de A, GM y grilla resultante del modelo de Verde para la zona del área total.

Los residuos de la comparación de las anomalías de aire libre originales con las predichas por el modelo de Verde se ilustran en la figura 5.5.

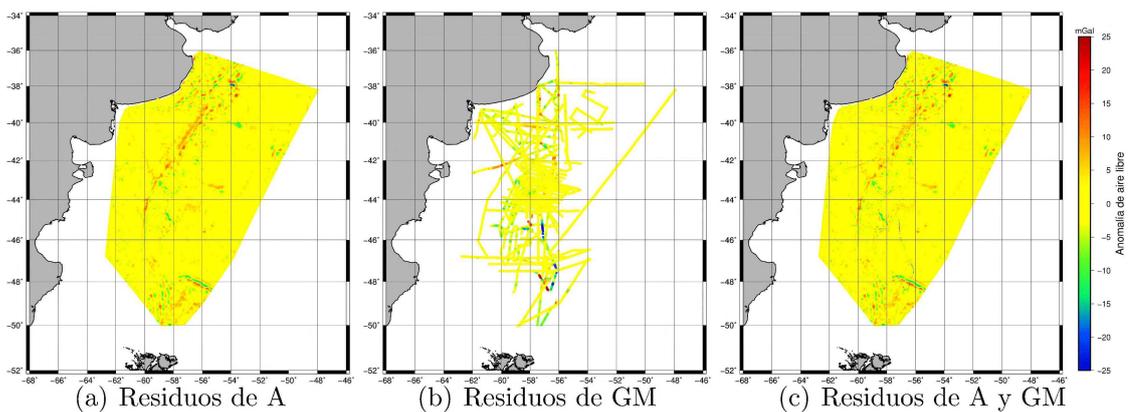
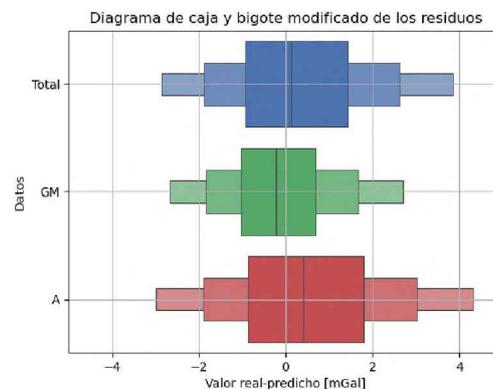
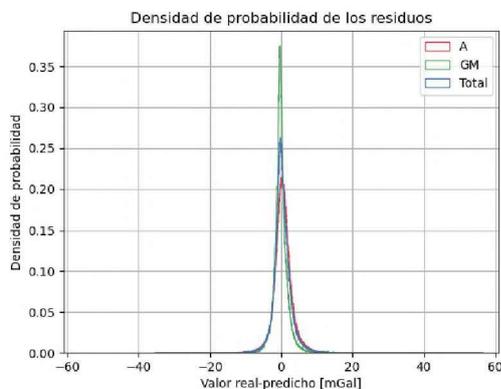


Figura 5.5: Residuos de A y GM: valores reales - predichos con el modelo de Verde para el área total.

En el cuadro 5.1 se analizan los residuos de A y GM con las predicciones de Verde. Las columnas \overline{RES} , σ_{RES} , Min_{RES} y Max_{RES} , corresponden al valor medio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo de los residuos respectivamente. En todos los casos se obtuvieron valores satisfactorios.

Conjunto de datos	\overline{RES} [mGal]	σ_{RES} [mGal]	Min_{RES} [mGal]	Max_{RES} [mGal]
A	0.5	2.6	-25.7	25.9
GM	-0.1	2.1	-35.4	56.5
TOTAL	0.3	2.4	-35.4	56.5

Cuadro 5.1: Estadísticas residuales de la grilla de área total de la diferencia valor real-predicho con Verde: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES} .



(a) Histograma de densidad de probabilidad de los residuos (b) Diagrama de caja y bigote modificado de los residuos

Figura 5.6: Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de GM y A con el modelo de Verde para el área total.

En la figura 5.6 se muestra el histograma de densidad de probabilidad, una adaptación del histograma que permite ver y comparar de mejor manera el conteo de valores de conjuntos de datos que tengan distintos tamaños. Las curvas se encuentran normalizadas debido a que el área debajo de cada curva es igual a 1. Se destaca la simetría en todos los casos y la moda centrada en el valor de 0 mGal.

El diagrama de valores de letras (del inglés “Letter values plot”) es una modificación del diagrama de caja y bigotes para grandes conjuntos de datos [17]. La línea media representa la mediana, mientras que los bloques centrales representan un 25 % de datos cada uno, los exteriores a ellos representan un 12.5 % cada uno y finalmente los más exteriores representan un 6.25 %, quedando representado entonces el rango de los valores residuales del 87.5 % del total. Este diagrama nos permite descubrir la ubicación de las distintas proporciones a lo largo y cuantificar su concentración. Se muestran en la figura 5.6 los diagramas de valores de letras residuales. Los residuos obtuvieron una excelente distribución teniendo en cuenta la enorme heterogeneidad de datos, donde se destaca una importante simetría analizando el conjunto total y una mediana cercana al valor de 0 mGal.

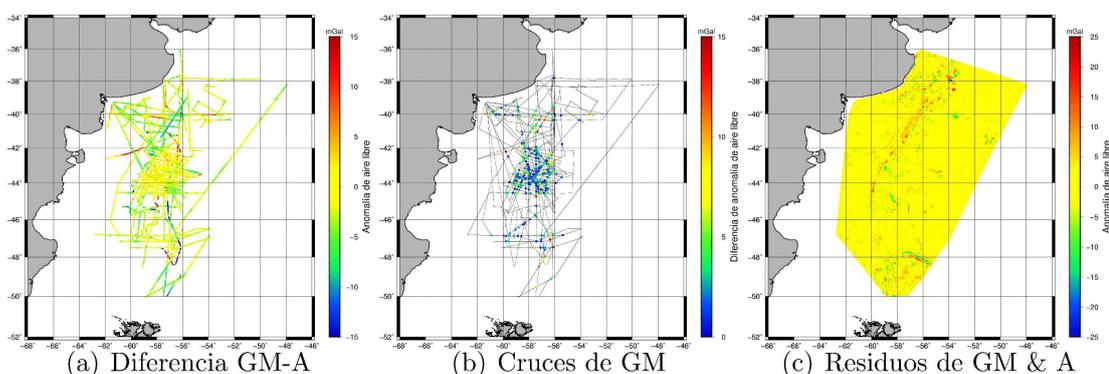


Figura 5.7: Diferencia GM - A, cruces de GM y residuos del modelo final encadenado de Verde para el área total.

Para estudiar los casos en donde suceden los mayores valores residuales se ob-

serva la figura 5.7, donde se analizan las diferencias entre GM e interpolados de A, los cruces de GM y los residuos de las predicciones. Las regiones con mayores discrepancias residuales se encuentran en la zona de talud continental, en los sectores donde el ajuste por cruces de GM resultó menos satisfactorio y en aquellas regiones donde las diferencias entre GM y A toman mayores amplitudes o bien hay una menor densidad de datos de GM.

5.2.1. Validación de la grilla del área total

Antes de comenzar con el proceso de grillado, se crea una máscara de 1' de arco llamada *mascara.grd* mediante *grdmask*. Este comando utiliza un archivo *ASCII* que contiene los nodos del polígono asociado a la máscara de nuestros datos. Esta máscara tendrá valor de 1 para los puntos cuyas coordenadas estén dentro del área del polígono y NaN para los que las tengan fuera. También se genera una máscara de tierra con *grdlandmask* de 1' de arco llamada *mascara_de_tierra.grd*, que toma el valor 1 en agua y NaN en tierra. En ambos casos la región es la correspondiente a la abarcada por los datos de GM.

Luego, se aplica el módulo *blockmean* sobre los datos, que incluyen las columnas longitud, latitud, anomalía de aire libre y peso. La columna de pesos, como lo sugiere la herramienta, se calcula como la inversa del cuadrado de los desvíos estándar utilizados en la sección de Verde. Se elige un equiespaciado de 1' de arco y una región que abarque la totalidad de los datos de GM. Se obtiene una tabla de datos llamada *datos_blockmean.dat* decimada y promediada mediante *blockmean*.

Con los datos procesados, se calcula mediante *surface* la grilla buscada, aplicándose sobre *datos_blockmean.dat* y seleccionando nuevamente el equiespaciado de 1' de arco, la región de GM y un factor de tensión T con valor 0.25. La salida será la grilla *data_surface.grd*. Para recortar las zonas no deseadas, se aplican mediante *grdmath*, las multiplicaciones con las máscaras generadas previamente, lo que re-

sulta en una grilla final del área total a partir de GM y A con *Surface*. Esto permite una comparación con los correspondientes resultados obtenidos con Verde.

La grilla computada con Verde se muestra en la figura 5.8 junto con la grilla de validación creada en una segunda instancia con *Surface* y la diferencia entre ambas. Las dos grillas presentan características y valores de anomalías de aire libre similares entre sí.

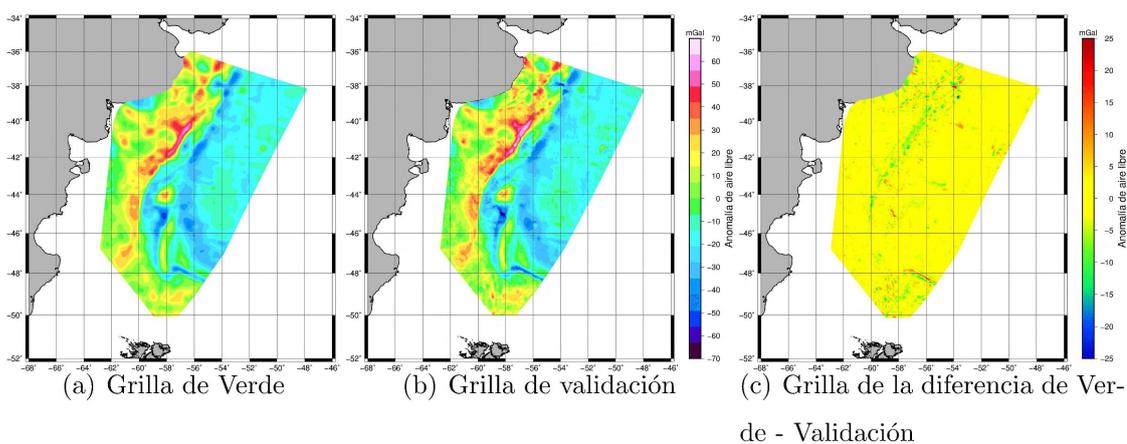


Figura 5.8: Comparación de anomalías de aire libre de la grilla generada con Verde y su validación con *Surface* para el área total.

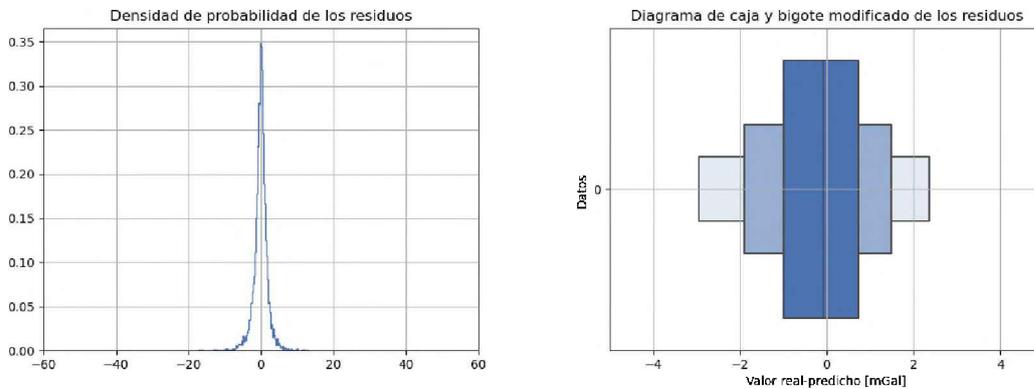
\overline{RES}	σ_{RES}	Min_{RES}	Max_{RES}
[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]
-0.4	2.4	-35.3	25.4

Cuadro 5.2: Estadísticas residuales de la grilla del área total generada por Verde con la grilla de validación: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES} .

En el cuadro 5.2 se muestran las estadísticas residuales entre la grilla calculada con Verde y la obtenida posteriormente como validación, inspirada en *Surface*. Las

columnas \overline{RES} , σ_{RES} , Min_{RES} y Max_{RES} , corresponden al valor medio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo de los residuos, respectivamente. Los valores resultan satisfactorios.

En la figura 5.9 se presentan tanto el histograma de densidad de probabilidad como el diagrama de caja y bigote modificado de los residuos, producto de la diferencia entre la grilla de Verde con su validación calculada con Surface. Se observan modas y medianas relativamente centradas en el valor de 0 mGal y una distribución simétrica entre valores positivos y negativos.



(a) Histograma de densidad de probabilidad de los residuos. (b) Diagrama de caja y bigote modificado de los residuos.

Figura 5.9: Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de la grilla de Verde con su validación con Surface para el área total.

A partir de análisis de todos los diagramas, mapas y estadísticas de este proceso, se concluye que los resultados obtenidos mediante el paquete Verde se encuentran validados por el método alternativo inspirado en el módulo Surface para la grilla del área total con una resolución de 1' de arco.

5.3. Grilla del área reducida

Con el objetivo de optimizar el proceso de cómputo y mejorar la resolución se selecciona un espaciamiento de apenas 8" de arco, reducida adecuadamente a la zona de mayor densidad de datos de GM, con un total de 24758 datos distribuidos sobre la región confinada entre las latitudes $-44.5^\circ \leq \phi \leq 43.5^\circ$ y las longitudes $-58.5^\circ \leq \lambda \leq -57.5^\circ$. Considerando un total 19718 datos de GM y 5040 de A, se obtiene una proporción óptima de GM. Se seleccionaron como datos de testeo a 3943 datos aleatorios de GM, que representan un 20% de los datos marinos y un 16% del total de datos. Los datos para entrenamiento estuvieron conformados tanto por el resto de observaciones de GM como por la totalidad de datos de A de la región.

En la figura 5.10 se comparan los datos de A y GM con la grilla modelo final del área reducida obtenida a partir de los mismos. Se observan características similares a la grilla de A, aunque con variaciones en corta longitud de onda debido a la influencia de GM.

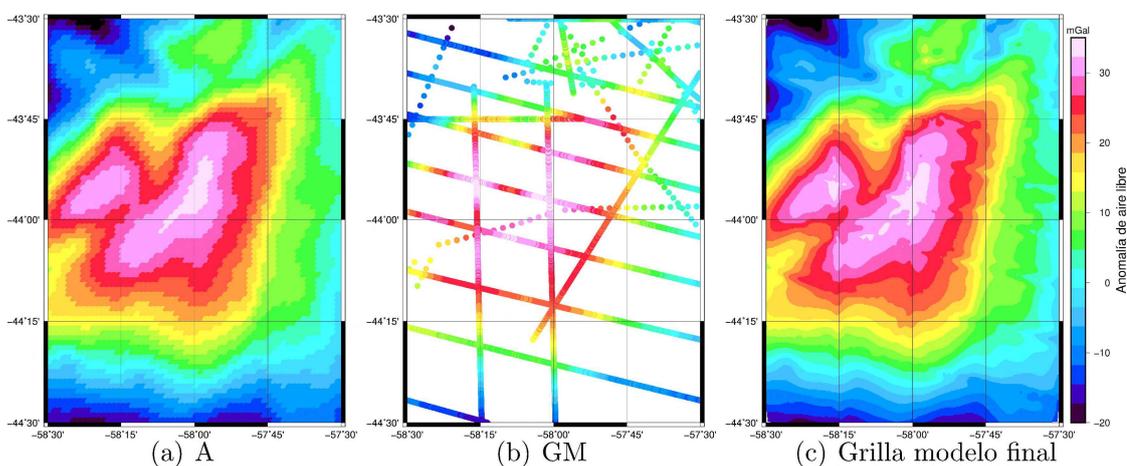


Figura 5.10: Comparación de anomalías de aire libre de A, GM y grilla resultante del modelo de Verde para la zona del área reducida.

Se realizó el mismo procedimiento de modelado encadenado que para el caso del área total, obteniendo esta vez un valor aún más exitoso de *score* R de 0.997. En la figura 5.11 se ilustran las predicciones de los modelos *Trend* y *Splines* en las coordenadas propuestas para esta grilla reducida, así como la predicción final del modelo encadenado resultante. Se observa que *Trend* se logra capturar los rasgos regionales de la zona reducida, mientras que *Spline* refina las características más locales, resultando en una grilla modelo final de mayor calidad que la correspondiente al caso del área total.

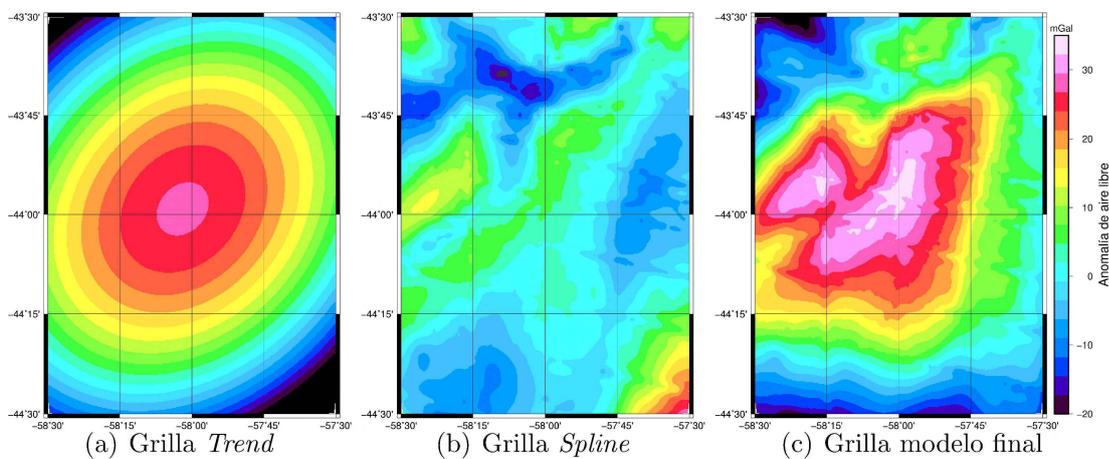


Figura 5.11: Modelos de Verde acumulados para la grilla del área reducida.

En el cuadro 5.3 se presentan las estadísticas de los residuos de GM y A con las predicciones del modelo de Verde. Las columnas \overline{RES} , σ_{RES} , Min_{RES} y Max_{RES} , corresponden al valor medio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo de los residuos, respectivamente. Se verifica que tanto el valor medio como el desvío estándar de cada conjunto de datos, muestran una reducción en magnitud respecto al caso del área total y los valores extremos residuales también disminuyen considerablemente.

Conjunto de datos	\overline{RES} [mGal]	σ_{RES} [mGal]	Min_{RES} [mGal]	Max_{RES} [mGal]
GM	4.10^{-4}	0.68	-5.91	6.1
A	0.01	0.78	-5.29	5.82
TOTAL	6.10^{-3}	0.7	-5.91	6.1

Cuadro 5.3: Estadísticas residuales para la grilla de área reducida de la diferencia valor real - predicho con Verde: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES} .

Las distribuciones de los residuos se muestran en la figura 5.12.

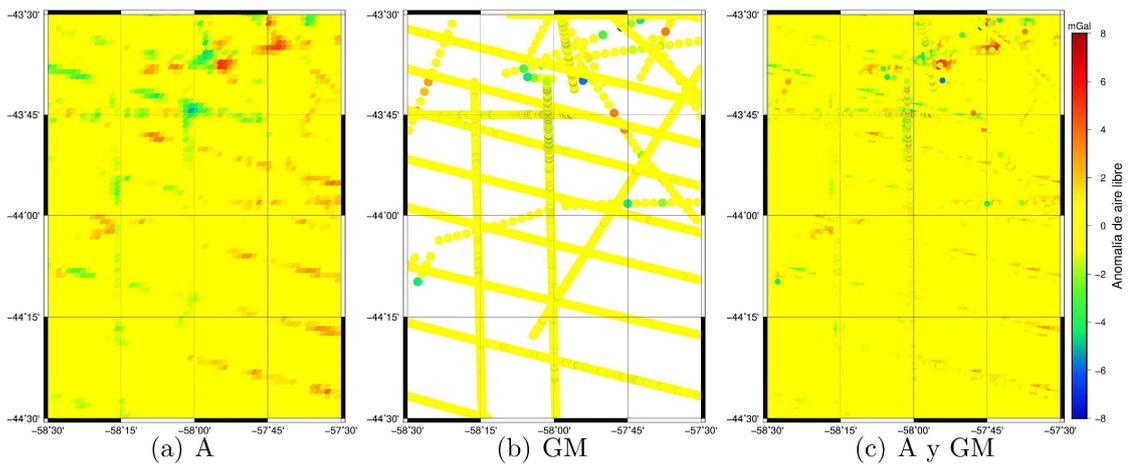
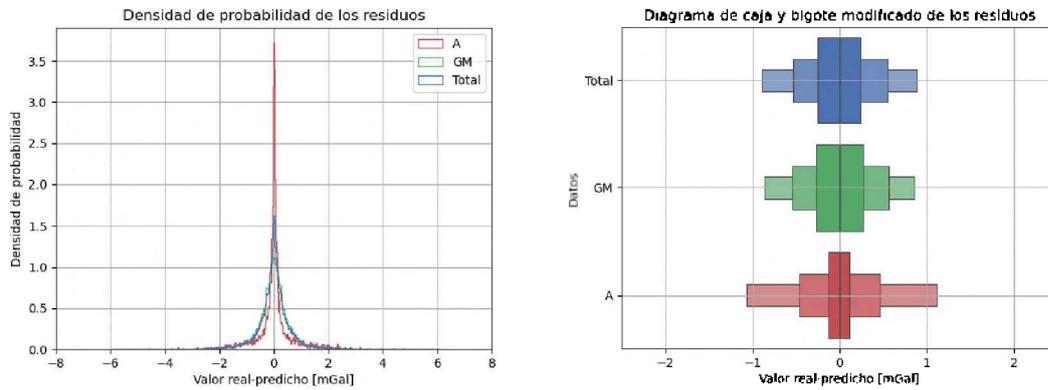


Figura 5.12: Residuos de A y GM: valores reales - predichos con el modelo de Verde para el área reducida.

En la figura 5.13 se muestran los diagramas de caja y bigote modificados y los histogramas de densidad de probabilidad residuales respectivamente.



(a) Histograma de densidad de probabilidad de los residuos (b) Diagrama de caja y bigote modificado de los residuos

Figura 5.13: Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de GM y A con el modelo de Verde para el área reducida.

Las concentraciones de los residuos muestran una distribución significativamente simétrica para valores positivos y negativos. Las curvas de densidad de probabilidad muestran que los picos de las modas se hallan centrados alrededor de los 0 mGal y alcanzando mayores alturas que en el caso del área total. Las medianas que aparecen en el diagrama de caja y bigote modificado, se encuentran centradas alrededor de los 0 mGal, aún más que en las correspondientes al área total, mientras que los residuos también se encuentran más concentrados en un rango más pequeño en el caso reducido.

En la figura 5.14 se analizan los residuos junto con las diferencias entre GM e interpolados de la grilla de altimetría satelital y cruces de GM en busca de correlaciones. La escala de magnitudes se cambió con respecto al caso del área total, debido a que ahora el rango de los residuos es mucho menor. Se observa que los valores residuales alcanzan magnitudes mucho menores que en el caso del área total y las zonas con valores más grandes se encuentran asociadas a regiones

con mayores magnitudes de diferencia entre GM y A, así como a aquellas regiones donde los valores de cruces de GM alcanzan sus mayores discrepancias.

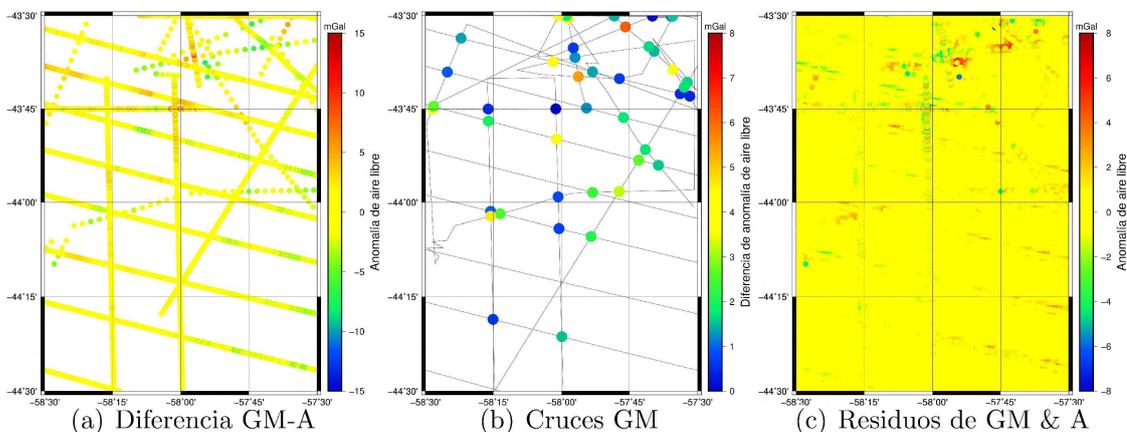


Figura 5.14: Diferencia GM - A, cruces de GM y residuos del modelo final encadenado de Verde para la zona del área reducida.

5.3.1. Validación de la grilla del área reducida

Al buscar una grilla para el área de mayor densidad de datos de GM, se establece como polígono inicial el del área reducida. Repitiendo el proceso del modelado del caso del área total, se llega al producto final con *Surface*.

Se obtiene una grilla final con un espaciado de apenas 8" de arco tal como fue establecido en su correspondiente modelado con Verde. Al igual que en el caso del área total, se calculan los residuos de la diferencia entre la grilla de Verde y la de validación con *Surface*.

En la figura 5.15 se realiza la comparación entre ambas grillas y se muestra el mapa de los residuos resultantes. Se observa una considerable similitud entre ambas grillas. Además, las diferencias presentan magnitudes notablemente inferiores en comparación con el caso del área total.

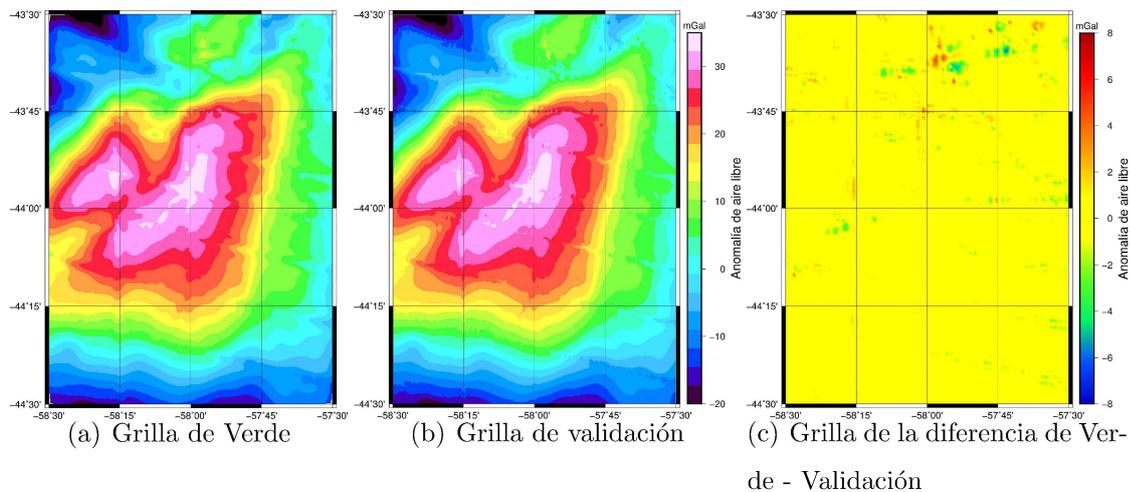
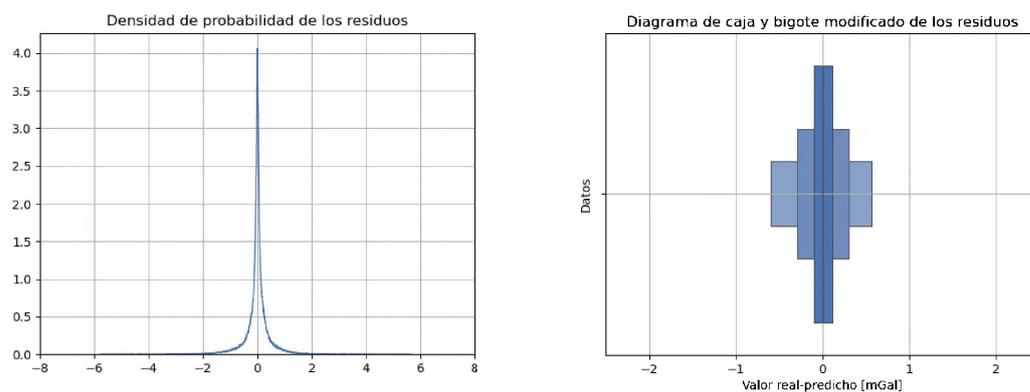


Figura 5.15: Comparación de anomalías de aire libre de la grilla generada con Verde y su validación con Surface para el área total.



(a) Histograma de densidad de probabilidad de los residuos (b) Diagrama de caja y bigote modificado de los residuos

Figura 5.16: Histograma de densidad de probabilidad y diagrama de caja y bigote modificado de los residuos de la grilla de Verde con su validación con Surface para el área reducida.

En la figura 5.16 se muestran el histograma de densidad de probabilidad y

al diagrama de caja y bigote modificado residuales entre la grilla de Verde y la de validación. Las distribuciones presentan mejores simetrías y concentraciones en torno al valor de 0 mGal que el caso del área total. Asimismo, la moda y la mediana también se muestran más centradas.

En el cuadro 5.4 se presentan las distintas estadísticas residuales correspondientes a cada set de datos para las grillas de Verde y de validación con *Surface*. Las columnas \overline{RES} , σ_{RES} , Min_{RES} y Max_{RES} , corresponden al valor medio, desvío estándar, valor mínimo y valor máximo de los residuos, respectivamente. En todos los parámetros residuales, se puede notar que las nuevas estadísticas terminan validando aquellas obtenidas en primera instancia con Verde, a la vez que presentan magnitudes significativamente inferiores al caso del área total.

\overline{RES}	σ_{RES}	Min_{RES}	Max_{RES}
[mGal]	[mGal]	[mGal]	[mGal]
-0.01	0.49	-5.39	5.66

Cuadro 5.4: Estadísticas residuales para la grilla de área reducida generada por Verde con la grilla de validación: promedio \overline{RES} , desvío estándar σ_{RES} , mínimo Min_{RES} y máximo Max_{RES} .

Después de completar la comparación a través de mapeos, residuos y estadísticas entre ambos métodos de modelado para el caso del área reducida con una resolución de 8" de arco, se concluye que los resultados obtenidos con nuestro modelo encadenado de Verde fueron exitosamente validados.

Capítulo 6

Conclusiones

Al finalizar este trabajo, es importante destacar que se alcanzaron los objetivos estipulados. Tal como se propuso en el Capítulo 1, los métodos, algoritmos y técnicas elaboradas lograron analizar, caracterizar y compilar los datos disponibles. De esta tesis se desprenden varias conclusiones correspondientes a distintos aspectos:

En lo referente a anomalías de gravedad

Las misiones satelitales han permitido la obtención de modelos globales del campo de gravedad marinos y se sigue trabajando arduamente para mejorar la calidad y precisión de las mediciones geodésicas que los generan. Los diferentes modelos propuestos, como los de *Sandwell & Smith* en sus diferentes versiones, posibilitan a los científicos utilizarlos en la mayoría de las regiones marinas del mundo, ofreciendo un contexto sobre la validez los mismos.

Diversas instituciones se han abocado a realizar numerosas campañas marinas con el objetivo de recolectar datos en diferentes regiones del mundo. Estas propuestas se encuentran muchas veces limitadas por zonas de difícil acceso para los barcos o a que convenios entre países u otras instituciones que permitan el acceso a los datos.

En esta tesis se ha propuesto desarrollar un método que permite integrar datos provenientes tanto de gravimetría marina como de altimetría satelital.

En lo referente a la generación de la base de gravedad marina pura GM

Los datos de crucero tienen distintas fuentes, cada una con su época, duración, precisión, objetivos y recorrido. Para crear una base de datos consistente, es necesario consolidar los perfiles de cada conjunto de datos. Esto se realiza mediante el tratamiento de las observaciones, incluyendo las correcciones, filtrados y ajustes. Se propone como método de ajuste una serie de pasos utilizando las subrutinas del módulo *x2sys* de GMT.

Este procedimiento se realizó para alcanzar una coherencia interna óptima en cada campaña, así como en las etapas de ajuste final entre las diferentes campañas de gravimetría marina. Se aprovechó la utilidad de cada herramienta del módulo *x2sys*, tomando la precaución de entender los manuales por completo y asegurando la mejor combinación de parámetros disponibles.

En lo referente a la generación de la base de gravedad marina combinada (de GM y A) y sus productos directos derivados

Integrando los datos de gravedad de altimetría satelital con la base consistente de datos de gravimetría marina se obtuvo la base combinada de GM y A, además de sus productos directos derivados:

- Grilla de área total con una resolución de 1' de arco, que cubre la totalidad de la zona con datos de gravimetría marina GM.
- Grilla de área reducida con una resolución de 8" de arco, que cubre la zona de 1° x 1° con mayor densidad de datos de gravimetría marina GM.

En lo referente al método para generar los productos derivados de GM y A

Se emplearon dos alternativas de modelado:

- **Compilación:** se utilizó al paquete Verde de Python, que ofrece varias herramientas basadas en aprendizaje automático, para integrar, modelar y generar grillas, demostrando un amplio abanico de opciones para decimar, ponderar, modelar y encadenar datos.
- **Validación:** se realizó un procesamiento basado en el módulo *Surface* de GMT, que ofrece menos opciones de parametrización que Verde, pero cuya capacidad y velocidad de cómputo no se ven tan limitadas por la potencia de la computadora utilizada para el procesamiento.

Para validar los productos se analizaron diversos mapeos, comparaciones, diagramas y estadísticas residuales. Se concluye que los resultados obtenidos de la compilación fueron sumamente satisfactorios, tanto para el área total como para el área reducida. Además, estos resultados fueron validados exitosamente mediante el uso de *Surface*.

Conclusiones finales

En resumen, este trabajo de tesis ha logrado crear conjuntos de datos consistentes de anomalía de gravedad marina, tanto pura (GM) como combinada con anomalías basadas en altimetría satelital (A) en una base total. Los procesos de obtención han sido debidamente documentados en esta tesis, junto con sus productos directos: una grilla para el área total de estudio y otra para un área reducida. Como resultado destacado de este trabajo, se ha desarrollado un conjunto de rutinas que permiten obtener diferentes modelos y grillas según los propósitos y condiciones de interés para un potencial geocientista interesado en estos productos, rutinas o procedimientos.

Bibliografía

- [1] AMOS, M., FEATHERSTONE, W., AND BRETT, J. Crossover adjustment of New Zealand marine gravity data, and comparisons with satellite altimetry and global geopotential models. https://doi.org/10.1007/3-540-26932-0_46, 2005. In: Jekeli C., Bastos L., Fernandes J. (eds) Gravity, Geoid and Space Missions. International Association of Geodesy Symposia, vol. 129. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] ANDERSEN, O. B., AND KNUDSEN, P. Global marine gravity field from the ERS-1 and Geosat geodetic mission altimetry., 1998. Journal of Geophysical Research, vol. 103, no. C4, p. 8129-8137.
- [3] ANDERSEN, O. B., AND KNUDSEN, P. Recent developments in high-resolution global altimetric gravity field modeling., 2010. The Leading Edge, vol. 29, no.5, p. 540-545.
- [4] BUREAU GRAVIMETRIQUE INTERNATIONAL. (N.D). Global gravity database (marine data). [dataset]. <https://doi.org/10.18168/BGI.2/>, 2023.
- [5] BUTTERWORTH, S. On the Theory of Filter Amplifiers, 1930. Experimental Wireless and the Wireless Engineer. 7: 536-541.
- [6] CHENEY, R. E., DOYLE, N. S., DOUGLAS, B. C., AGREEN, R. W., MILLER, L., TIMMERMAN, E. L., AND MCADOO, D. C. The complete Geosat altimeter GDR handbook. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/30447>, 1991. United States. National Ocean Service. Office of Charting and Geodetic Services. Series : NOAA manual NOS/NGS ; 7.

-
- [7] COMISIÓN DE LÍMITES DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL. Plataforma Continental. <http://www.plataformaargentina.gov.ar/es/limite>, 2023. Argentina.
- [8] DEL COGLIANO, D. Modelado del geoide con GPS y gravimetría. caracterización de la estructura geológica de tandil. <https://doi.org/10.35537/10915/60243>, 2006. Universidad Nacional de Rosario.
- [9] DENKER, H., AND ROLAND, M. Compilation and evaluation of a consistent marine gravity data set surrounding EUROPE, 2003. In: Sansò F. (eds) A Window on the Future of Geodesy. International Association of Geodesy Symposia, vol. 128. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [10] DRINKWATER, M. R., FLOBERGHAGEN, R., HAAGMANS, R., MUZI, D., AND POPESCU, A. Goce: ESA's first earth explorer core mission. in: Beutler g et al (eds) Earth gravity field from space—from sensors to Earth science. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1333-7_36, 2003. Space sciences series of ISSI, vol 18. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 419–432.
- [11] DUMONT, J., OGOR, F., AND STUM, J. Quality assessment of cersat altimeter opr products: 168-day repeat period, 1995. French Processing and Archive Facility, Toulouse, France.
- [12] DUNG, T. T., KULINICHIC, R. G., VAN SANGD, N., QUEE, B. C., DAIA, N. B., DUNGA, N. K., DUONGA, T. T., AND LAPA, T. T. Improving accuracy of altimeter-derived marine gravity anomalies for geological structure research in the VIETNAM south-central continental shelf and adjacent areas, 2019. Russian Journal of Pacific Geology, vol. 13, no. 4, p. 364–374.

-
- [13] EUROPEAN SPACE AGENCY. Envisat ASAR global monitoring mode L1 product. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Envisat, 2002.
- [14] EUROPEAN SPACE AGENCY. CryoSat-2 Mission. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/CryoSat, 2010.
- [15] FEATHERSTONE, W. E. Comparison of different satellite altimeter-derived gravity anomaly grids with ship-borne gravity data around Australia, 2003. in: TZIAVOS, I. N. (ED) gravity and Geoid 2002, Ziti editions, Thessaloniki, p. 326-331.
- [16] HEISKANEN, W. A., AND MORITZ, H. Geodetic Reference System 1967, 1967. Physical Geodesy. W.H. Freeman, San Francisco.
- [17] HOFMANN, H., KAFADAR, K., AND WICKHAM, H. Letter-value plots: Boxplots for large data. Tech. rep., had.co.nz, 2011.
- [18] HWANG, C. Inverse vening meinesz formula and deflection-geoid formula: applications to the predictions of gravity and geoidover the South China Sea. <http://dx.doi.org/10.1007/s001900050169>, 1998.
- [19] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. Geodetic Reference System 1967, 1967. Publi. Spéc. n° 3 du Bulletin Géodésique, Paris.
- [20] INTROCASO, A. Geodesia física. https://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia/NE1_2006/BIFG_NE1_web.pdf, 2006. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología, Rosario.
- [21] KEATING, P., AND PINET, N. Comparison of surface and shipborne gravity data with satellite-altimeter gravity data in Hudson Bay, 2013. Leading Edge, vol. 32, no. 4, p. 450-458.

- [22] LANDERER, F. W., FLECHTNER, F. M., SAVE, H., WEBB, F. H., BANDIKOVA, T., BERTIGER, W. I., ET AL. Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>, 2020. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088306.
- [23] LEMOINE, F. G., KENYON, S. C., FACTOR, J. K., TRIMMER, R., PAVLIS, N., CHINN, D., COX, C., KLOSKO, S., LUTHCKE, S., TORRENCE, M., WANG, Y., WILLIAMSON, R., PAVLIS, E., RAPP, R., AND OLSON, T. The development of the joint NASA GSFC and NIMA Geopotential Model EGM96, 1998. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 20771 USA.
- [24] MINISTERIO DE JUSTICIA Y DERECHOS HUMANOS. Información Legislativa y Documental. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=367>, 2023. Argentina.
- [25] MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, COMERCIO INTERNACIONAL Y CULTO. Dirección Nacional del Antártico. <https://cancilleria.gob.ar/es/iniciativas/dna>, 2023. Argentina.
- [26] MITTAL, P. K. Algorithm for error adjustment of potential field data along a survey network, 1984. *Geophysics*, vol. 49, no. 4, p. 467-469.
- [27] MORITZ, H. Report of special study group n° 539 of i.a.g., fundamental geodetic constants, 1979. Presented at XVII General Assembly of I.U.G.G., Canberra.
- [28] MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. <https://doi.org/10.1007/s001900050278>, 2000. *Journal of Geodesy* 74, 128–133 (2000).

- [29] OPPENHEIM, A. V., AND SCHAFER, R. W. Digital Signal Processing, 1975.
- [30] PAL, P. Spectral characteristics of the gravity and magnetic profile data over a geological contact. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(81\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90001-6), 1981. *Geoexploration*, vol. 19, no. 3, p. 167-177.
- [31] PAMPA AZUL. Proyecto Pampa Azul. <https://pampaazul.gob.ar>, 2019.
- [32] PAVLIS, N., HOLMES, S., KENYON, S. C., AND FACTOR, J. The development of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>, 2012. *J Geophys Res* 117:B04406.
- [33] PAVLIS, N., HOLMES, S., KENYON, S. C., AND FACTOR, J. Correction to “the development of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). <https://doi.org/10.1002/jgrb.50167>, 2013. *J Geophys Res* 118:2633.
- [34] PEDRAZA DE MARCHI, A. C. Análisis de nuevos estándares para reducir datos de gravedad, 2009. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de la Plata, p. 77.
- [35] PEDRAZA DE MARCHI, A. C., TOCHO, C., AND GHIDELLA, M. Comparación de anomalías de gravedad derivadas de altimetría satelital con datos de gravedad marina en el margen continental argentino, 2012. *Bol. Ciencias Geodésicas*, vol. 18, no. 1.
- [36] PINCE, R. A., AND FORSYTH, D. W. A simple objective method for minimizing crossover errors in marine gravity data, 1984. *Geophysics*, vol. 49, no. 7, p. 1070-1083.
- [37] SANDWELL, D. T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. <https://doi.org/10.1029/GL014i002p00139>, 1987.

- [38] SANDWELL, D. T., MÜLLER, R. D., SMITH, W. H. F., GARCIA, E., AND FRANCIS, R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure, 2014. *Science*, Vol. 346, no. 6205, pp. 65-67, doi: 10.1126/science.1258213.
- [39] SANDWELL, D. T., AND SMITH, W. H. F. Marine gravity from geosat and ERS 1 satellite altimetry, 1997. . *Geophys. Res.*, vol. 102, 10039e10054. B5.
- [40] SANDWELL, D. T., AND SMITH, W. H. F. Global marine gravity from retracted Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate. <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>, 2009. *J. Geophys. Res.*, vol. 114, B01411.
- [41] SCHRÖDER, L., RICHTER, A., FEDOROV, D. V., EBERLEIN, L., BROVKOV, E. V., POPOV, S., KNÖFEL, C., M., H., R., D., MATVEEV, A. Y., SCHEINERT, M., AND V., L. V. Validation of satellite altimetry by kinematic GNSS in central East Antarctica, 2017. *The Cryosphere*, vol. 11, no.3, p. 1111-1130.
- [42] SPATH, F., ANTOKOLETZ, E., AND TOCHO, C. Tópicos de gravimetría. [://doi.org/10.35537/10915/97536](https://doi.org/10.35537/10915/97536), 2020. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- [43] SPECTOR, A. GRANT, F. S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data, 1970. *Geophysics*, vol. 35, no. 2, p. 293-302.
- [44] TAPLEY, B. D., BETTADPUR, S., WATKINS, M., AND REIGBER, C. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>, 2004. *Geophy Res Lett* 31(9):L09607.

-
- [45] TORGE, W. Gravimetry, 1989. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- [46] UIEDA, L. Verde: Processing and gridding spatial data using Green's functions. *Journal of Open Source Software* 3, 29 (2018), 957.
- [47] UNIVERSITY OF CALIFORNIA SAN DIEGO. Scrips Institution of Oceanography. https://topex.ucsd.edu/pub/global_grav_1min/.
- [48] VIOLANTE, R., CAVALLOTTO, J. L., AND MARCOLINI, S. Estudios geológicos en el margen continental argentino. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73693>, 2018.
- [49] VISSER, P. N. A. M. Gravity field determination with GOCE and GRACE. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00154-4), 1999. Argentina.
- [50] WESSEL, P. The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms, 1967. *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* vol. 15, pp. 70-73.
- [51] WESSEL, P. Tools for analyzing intersecting tracks: The x2sys package, 2010. *Computers Geosciences*, vol. 36, no. 3, p. 348-354.
- [52] WESSEL, P., LUIS, J. F., UIEDA, L., SCHARROO, R., WOBBE, F., SMITH, W. H. F., AND TIAN, D. The Generic Mapping Tools version 6. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>, 2019. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 20, no. 3, p. 5556-5564.
- [53] WESSEL, P., AND SMITH, W. H. F. Gridding with continuous curvature splines in tension, 1990. *Geophysics* Volume 55(3):293-305, doi:10.1190/1.1442837.
- [54] WESSEL, P., AND WATTS, A. On the accuracy of marine gravity measurements. <http://dx.doi.org/10.1029/JB093iB01p00393>, 1988.

- [55] YVES, M., FU, L.-L., ESCUDIER, P., PARISOT, F., PERBOS, J., VINCENT, P., SAYALI, D., HAINES, B., AND KUNSTMANN, G. The Jason-1 Mission, 07 2003. Pp 131-146. Volume 26. Marine Geodesy.