



TRABAJOS DE LA BECA FUNDACIÓN ALVARGOZÁLEZ 2021

Fundación Alvargonzález
Real Instituto y Observatorio de la Armada



MINISTERIO DE DEFENSA

**REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA
ARMADA EN SAN FERNANDO
BOLETÍN ROA Nº 2/2022**

TRABAJOS DE LA BECA FUNDACIÓN ALVARGOZALEZ 2021

BECA DE INVESTIGACIÓN SOBRE TEMAS DE ACTIVIDAD CIENTÍFICA Y CULTURAL
DEL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA 2021

Fundación Alvargonzález
Real Instituto y Observatorio de la Armada



FVNDACIÓN
ALVARGONZÁLEZ



Catálogo de Publicaciones de Defensa
<https://publicaciones.defensa.gob.es>



Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
<https://cpage.mpr.gob.es>

publicaciones.defensa.gob.es
cpage.mpr.gob.es

Edita:



Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autor y editor, 2022

NIPO 083-22-198-0 (impresión bajo demanda)
Colección: ROA, ISSN 1131-5040

NIPO 083-22-199-6 (edición en línea)

Fecha de edición: diciembre de 2022
Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son exclusiva responsabilidad del autor de la misma. Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

En esta edición se ha utilizado papel 100% libre de cloro procedente de bosques gestionados de forma sostenible.

Foto portada:

Fachada del Edificio Principal del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (siglo XVIII).

ÍNDICE

- 1. Posibles alternativas y mejoras de los programas de reducción actuales del TFRM.** **5**
Carlos Abad Hiraldo y Pedro Azorín Montesinos

- 2. ESTRUCTURA MAGNÉTICA DE UN VOLCÁN SUBMARINO ANTÁRTICO Y SU RELACIÓN CON LOS INICIOS DE FORMACIÓN DE FONDO OCEANICO** **21**
Alberto Santamaría Barragán

Memoria del Trabajo:

Posibles alternativas y mejoras de los programas de reducción actuales del TFRM

Carlos Abad Hiraldo y Pedro Azorín Montesinos

PREFACIO

Se presenta el informe sobre el trabajo que se ha realizado hasta el momento relacionado con la mejora de los programas que actualmente realizan la reducción de las observaciones en el TFRM e incluso se ha introducido otro modelo de reducción de observaciones para que el usuario pueda intervenir en el cálculo de la solución y aportar mejoras en los resultados que actualmente se obtienen con programas elaborados externamente.

Mi vida laboral astrométrica ha estado fuertemente relacionada con la observación astronómica y ligada al uso de telescopios calificados de astrométricos por el extenso campo y profundidad que abarcan. Basta nombrar la cámara "J. Stock" (1m) telescopio de tipo Schmidt, el reflector (1m) y el astrógrafo doble con 2 tubos (0.5m respectivamente) todos instalados en el Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela "Llano del Hato" el cual está bajo el control del Centro de Investigaciones de Astronomía, instituto del cual he sido miembro por más de 32 años.

He tenido la oportunidad de trabajar en la reducción de las observaciones realizadas con ellos y he participado en las múltiples transformaciones que se han dado en ellos particularmente y en su evolución en general. Se ha pasado del uso de placas al CCD como detectores. Han habido que realizar transformaciones que adapten esos detectores e incluso se han instalado equipos sofisticados que han supuesto cambios profundos en la estructura de su sistema óptico, por ejemplo la instalación de un mosaico de 16 CCD en el plano focal, incluyendo elementos ópticos adaptados al fin perseguido en el proyecto que generó la instalación, el proyecto QUEST en su fase inicial (Baltay et al., 2002). Todo ello ha producido una especial atracción por lo que significa la observación astronómica y la adaptación de modelos y sus programas a los nuevos retos astrométricos planteados.

En el año 2018 y por motivos personales tuve que regresar a España, dejando atrás truncada una muy disfrutada experiencia profesional de 32 años de la que queda un sentimiento de finalización no cumplido, y se anexan condiciones que te obligan a buscar y encarar el futuro con diferentes y nuevas perspectivas.

A principios de 2019 y tras una visita al ROA en San Fernando, donde saludé a la Dirección de la Institución para ese momento, junto a la nueva Dirección para el actual y donde conocí al personal asignado a la Sección de Astronomía. Al poco tiempo recibí con orgullo, por medio del Dr. Antonio Elipe (todavía para ese momento director del CUD y catedrático de Unizar), la idea de continuar con la colaboración Unizar – ROA para dirigir tesis de doctorado al personal del ROA, aprovechando mi venida a España.

Como ya he comentado, personalmente, por mi edad y por lo abrupto del cambio, anuncié que no me podía comprometer como director de tesis en ese proyecto aunque sí podía contribuir a su éxito con colaboraciones puntuales. Con esa visión y durante una visita del TN Pedro Azorín a Zaragoza pude comprobar el cómo se trabaja en el ROA la astrometría en relación a las observaciones realizadas con el telescopio TFRM y qué tipo de observaciones se realizaban. Temas que atrajeron mi atención por coincidir con temas puntuales que han adquirido especial importancia en mi trayectoria laboral. Digamos que ese fue el origen de este trabajo-colaboración que estamos desarrollando y que forma parte de la beca que la Fundación AlvarGonzález me concedió.

Llega el momento de rendir cuentas del trabajo realizado ante ambas Instituciones, Fundación y ROA y con la visión puesta en trabajo-colaboración, el informe se compone de esta breve introducción y el verdadero informe que he preferido lo realice el TN Pedro Azorín como principal interlocutor del ROA. Con ello quiero resaltar los valores que se le exigían al trabajo a realizar en las bases de la beca concedida: tema de interés para el ROA y que beneficie a su proyección laboral.

Por último agradecer tanto al ROA como al Departamento de Astronomía del ROA y TN Azorín en particular por su colaboración para que el trabajo se haya realizado tal y como se ha hecho.

Carlos Abad Hiraldo
Investigador Titular jubilado CIDA

INTRODUCCIÓN.

Como se describía en el proyecto presentado, los trabajos realizados durante este tiempo ya se habían iniciado en 2019 entre el Dr. Carlos Abad Hiraldo y el TN Pedro Azorín Montesinos, formando parte de sus estudios de Tesis Doctoral.

Por otra parte los objetivos eran dotar de una alternativa a la Sección de Astronomía para la reducción de las imágenes y que el personal de la misma fuera el encargado de decidir su uso.

Teniendo en cuenta lo anterior y como detallaremos más adelante se han conseguido los objetivos previstos, incluso se han superado al dejar nuevas líneas de investigación abiertas.

Estas circunstancias nos han llevado a plantear este informe como un texto donde plasmar los conceptos y los trabajos realizados, pero sin llegar a profundizar en los datos, ya que el personal de la Sección y en particular el TN Azorín se plantean profundizar los estudios llevados a cabo, con el fin de que sean aportados a los estudios de doctorando y posibles publicaciones en revistas de interés científico.

1. DESARROLLO.

El objetivo principal del proyecto era mejorar la reducción de las observaciones llevadas a cabo por el Telescopio Fabra-ROA en el Montsec (TFRM) en el campo del seguimiento y la detección de cuerpos en órbita terrestre (satélites y basura espacial).

Se plantearon dos vertientes para el estudio del problema, las trazas (función Tepui) y los patrones de distorsión (modelo de Stock).

Con la única finalidad de ser fiel a la cronología de los acontecimientos empezaremos por detallar este último campo de estudio.

1.1. PATRONES DE DISTORSIÓN.

Los patrones de distorsión buscan determinar de forma numérica los errores que de forma sistemática introducen el telescopio y el detector en la placa durante la observación. Estas deformaciones tienen que tener un carácter sistemático, con lo que serán repetibles en diferentes observaciones. Como ya se dijo, aunque se podría buscar una expresión algebraica para corregir estos errores se considera más eficiente crear una máscara que los represente en cada uno de los puntos o píxeles del detector. La aplicación de estos errores permite conocer la posición de los objetos de una forma más cercana a la realidad.

El objetivo astrométrico de una exposición es determinar la posición astronómica de los objetos observados y plasmados sobre el detector. Las coordenadas astronómicas son coordenadas sobre la esfera celeste y por tanto en el espacio de 3 dimensiones. Las coordenadas medidas sobre el detector están en el plano, es decir en un espacio de 2 dimensiones.

Al proceso de relacionar las coordenadas planas con las espaciales lo llamamos "reducción de la exposición".

Antes de comenzar la reducción debemos seleccionar el catálogo de referencia a usar y en qué espacio (2D o 3D) vamos a buscar la relación que une catálogo de referencia y observación. El catálogo de referencia nos trasladará el sistema y la dimensión el cómo trabajar, si sobre el plano del detector o sobre la esfera celeste.

Tradicionalmente los métodos de trabajo desarrollados en este campo trabajan sobre el detector de la cámara, es decir, sobre el plano. Para esto se utilizan polinomios que relacionan las coordenadas planas del sensor con las coordenadas estándar o posiciones ideales que producirían las estrellas de referencia sobre dicho sensor, tras pasar por el mismo telescopio pero sin introducir problemas. Los polinomios a determinar deben ser de un orden suficiente y contener los términos que creamos son los necesarios para absorber los problemas generados durante la observación. Sean atmosféricos, ópticos, electrónicos o matemáticos. En el caso del TFRM los polinomios usados son de orden 6 e incluyen términos dependientes de la magnitud.

Los polinomios creados para el cálculo de la solución plana buscan absorber todos los problemas de la observación, lineales y no lineales.

En el estudio que se ha llevado a cabo se hace uso del método de reducción de (Stock, 1981) que trabaja sobre la esfera celeste de radio unidad. Tomando como radio unidad la distancia focal F del telescopio. Realizar la reducción en el "espacio" en lugar del plano provoca una serie de diferencias.

La primera de estas diferencias es que al trabajar en el detector se proyectan las estrellas de catálogo sobre el plano, mientras que al trabajar sobre la esfera son los objetos del plano los que se proyectan sobre la esfera.

$(\alpha, \delta)_{\text{catálogo}} \rightarrow \text{seproyecta} \rightarrow (x, y)_{\text{proyectadas}}$

$$u = \frac{x \operatorname{sen}(r)}{F \star r}$$

$$v = \frac{y \operatorname{sen}(r)}{F \star r}$$

$$w = \cos(r),$$

$$\text{dónde } r = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{F}$$

Ecuaciones 1. Comparación proyecciones¹

Izquierda: Proyección de esfera en el plano, en caso de trabajar sobre el plano.

Derecha: Proyección del plano a la esfera, en caso de trabajar sobre la esfera. (Proyección Concéntrica)

La segunda es que la solución dada por el método de Stock viene representada por una matriz (3x3) que se corresponde con un giro sobre la esfera. Esta matriz representa un giro sobre la esfera con la que se procura llevar a coincidencia las coordenadas de las imágenes proyectadas que provienen del detector con las coordenadas del catálogo de referencia, para aquellas estrellas que dejaron huella en el detector durante la exposición.

$$\xi_{2d} = a_2 + a_0x + a_1y + a_6x^2 + a_7xy + a_8(x^2 + y^2) + a_{10}x(x^2 + y^2) + \dots$$

$$\eta_{2d} = a_5 + a_3x + a_4y + a_7y^2 + a_6xy + a_9(x^2 + y^2) + a_{10}y(x^2 + y^2) + \dots$$

$$\begin{pmatrix} \xi_{3d} \\ \eta_{3d} \\ \zeta_{3d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

Ecuaciones 2.

Arriba: Solución en forma de polinomios (resolución sobre plano).

Abajo: Solución por el método de Stock (resolución sobre la esfera).

La matriz obtenida por el método de Stock sólo busca la mejor solución lineal del problema, y es a través de lo que hemos llamado patrones de distorsión que extendemos la solución a la parte no lineal. Una vez corregidos los datos iniciales por dichos patrones y volviendo a aplicar el método de Stock a las coordenadas corregidas conseguiremos dar a la solución el mismo significado que con los polinomios.

En el mismo artículo de (Stock, 1981) se presenta una variante del modelo haciendo uso de la búsqueda de una solución conjunta de exposiciones que se solapan parcialmente. El solapamiento permite añadir nuevas ecuaciones de condición en la búsqueda de soluciones individuales por el método de mínimos cuadrados que complementan a las dadas por las estrellas de referencia, pero generadas por estrellas que se solapan, sin necesidad de que éstas sean de referencia. (Ecuación 3)

De este modo se le impone al conjunto de matrices solución la necesidad de que la matriz solución de cada exposición tenga en cuenta que influye en el cálculo de las matrices de las exposiciones a las que traslapa, pues imágenes en exposiciones diferentes que fueron formadas por una misma estrella deben dar el mismo punto en el cielo al aplicar la solución obtenida para cada una de esas exposiciones.

¹ Puesto que el concepto de este estudio es diferente de la proyección en el plano no se pretende explicar los detalles, aunque se pueden encontrar en (Calabretta & Greisen, 2002)

$$a_{m11}u_{mi} + a_{m12}v_{mi} + a_{m13}w_{mi} = \xi_i$$

$$a_{m21}u_{mi} + a_{m22}v_{mi} + a_{m23}w_{mi} = \eta_i$$

$$a_{m31}u_{mi} + a_{m32}v_{mi} + a_{m33}w_{mi} = \zeta_i$$

$$a_{m11}u_{mi} + a_{m12}v_{mi} + a_{m13}w_{mi} - a_{n11}u_{ni} - a_{n12}v_{ni} - a_{n13}w_{ni} = 0$$

$$a_{m21}u_{mi} + a_{m22}v_{mi} + a_{m23}w_{mi} - a_{n21}u_{ni} - a_{n22}v_{ni} - a_{n23}w_{ni} = 0$$

$$a_{m31}u_{mi} + a_{m32}v_{mi} + a_{m33}w_{mi} - a_{n31}u_{ni} - a_{n32}v_{ni} - a_{n33}w_{ni} = 0$$

Ecuaciones 3.

Arriba: Ecuaciones de condición para estrellas de catálogo de referencia en el método de Stock.

Abajo: Ecuaciones de condición añadidas que se añaden método de Stock por solapamiento.

Este aporte permite reducir placas con menor número de estrellas, aspecto importante a tener en cuenta como se vio con algunas placas de la Piggy-Back.

El solapamiento llega a ser el principal responsable de que el entramado de las exposiciones sea robusto, mientras que las estrellas de catálogo introducen el sistema. Una muestra de esta afirmación podemos verla en el artículo de C. Abad, 1993, donde las 1260 placas de la zona de París del proyecto Catálogo Astrográfico, cubriendo 2°x2° del cielo cada una de ellas, son reducidas con apenas 104 estrellas del FK5 como estrellas de referencia.

El solapamiento entre placas permite que una estrella se encuentre en dos placas diferentes y en dos posiciones distintas del detector, por lo cual, cada solución² deberá de acomodar a dicha estrella de la mejor forma posible.

Para la elaboración de los patrones de distorsión, vamos a utilizar los residuos o valores que representan las desigualdades en que se convierten las ecuaciones de condición (Ecuaciones 3) al aplicarles las matrices dadas por una solución inicial del método de Stock con solapamiento. Estos residuos serán tratados por el "polinomio deslizante" (Stock & Abad, 1988). Es una forma de trabajo en la que, dado un conjunto de datos asociados a unos puntos, esta función nos permite determinar tendencias sistemáticas de los datos y su cuantía para cualquier punto interior del conjunto.

Como último punto importante, decir que el fin del modelo de reducción es conseguir la solución general o conjunto soluciones que satisfagan individualmente cada una de las exposiciones. La corrección de las coordenadas medidas por estas tendencias sistemáticas permitirá que unas matrices lineales como las que aporta el método de Stock sean la solución definitiva de la reducción.

En este artículo de 1988, además de definir el Polinomio Deslizante, se desprende que una mayor densidad de datos y una buena distribución de los mismos sobre el área donde se aplica el Polinomio Deslizante favorecen enormemente la detección de componentes sistemáticas en los datos, si es que existen.

La valoración de la reducción por este método puede realizarse en forma externa o interna, según con quien se comparen las posiciones del catálogo de estrellas obtenidas en la reducción.

Una vez realizada la reducción de las exposiciones en forma conjunta podremos formar un catálogo de posiciones astronómicas en donde habrá estrellas obtenidas a partir de imágenes

² Solución: matriz que representa la transformación para cada placa de forma individual.

solitarias en el conjunto de las exposiciones y otras obtenidas a partir del promedio de posiciones dadas por imágenes solapadas.

Si se comparan las posiciones obtenidas en las placas con un catálogo astronómico de referencia, se puede conocer la bondad externa de la solución obtenida de la reducción. Si por el contrario estudiamos los residuos a partir de las posiciones promedio y sus contribuciones para imágenes solapadas podemos obtener la bondad interna de la solución, una estimación donde no entra directamente un medio externo de comparación.

1.1.1. Desarrollo práctico.

Un programa y un paquete de programas realizan la implementación del método de Stock a las observaciones. El llamado CM1 y el conjunto de programas RAA. El primero de ellos aplica el método a una exposición simple. El segundo, lo aplica a un conjunto de exposiciones que se solapan. Son autoconsistentes y basta con conocer su contenido y el manejo de los mismos. Están realizados en lenguaje FORTRAN y son fáciles de manejar.

Los programas que manejan los residuos que aportan estas soluciones lineales, sean obtenidas individualmente o en grupo, aunque están ya elaborados, deben ser adaptados a las condiciones del telescopio usado. Estos programas son los que crean y aplican los Patrones de Distorsión o complemento no lineal a la reducción por el método de Stock.

Inicialmente se planteó usar el método de Stock para las observaciones llevadas a cabo con el TFRM en el campo de vigilancia espacial sobre satélites y basura espacial (*Space & Surveillance Tracking "SST"*) debido al tipo de observaciones y la estrategia seguida. Dichas observaciones contemplan la repetición de campos del cielo y el solapamiento entre exposiciones, con lo que se ajusta a las necesidades del método. Por otra parte con el diseño actual de programación de las observaciones del ROA, no es necesario hacer esfuerzos extra en observación para conseguir los patrones.

Para aprender el manejo de los programas CM1 y RAA, así como familiarizarse con el cálculo, creación y aplicación de los Patrones, se realizaron una serie de observaciones que se solapan parcialmente, alrededor del zenit, con el telescopio TFRM, cuyas enseñanzas y conclusiones fueron útiles tanto para la cámara Baker Nunn, como para las observaciones simultáneas obtenidas por el telescopio refractor asociado a ella.

Como inicialmente se pretendía conocer la bondad y las limitaciones del método con respecto a los programas que en la actualidad manejan las exposiciones del TFRM, se aprovecharon pasos necesarios en la reducción ya realizados por dichos programas, como son: la detección y medición de las coordenadas (x, y) de las imágenes que hay sobre el detector (hacen uso del programa comercial Sextractor) y la identificación de las estrellas de referencia para el catálogo usado.

Además, el uso simultáneo de los mismos datos, en los programas TFRM y en aquellos asociados al nuevo método, nos permite una mejor comparación de métodos de reducción, pues cualquier mejora astrométrica puede ser asociada al método.

Las soluciones obtenidas por los programas del TFRM vienen representadas por dos polinomios por exposición, uno para cada una de las coordenadas estándar y contienen la parte lineal y no lineal. Las soluciones dadas por el método de Stock con los patrones de distorsión vienen dados por una matriz individual por exposición, más unos patrones que son comunes a todas las exposiciones.

Este aporte común de los patrones a la solución final pone un punto de atención en la enorme área del cielo que cubre cada uno de los detectores, $4,4^{\circ} \times 4,4^{\circ}$ para el detector asociado a la

cámara Baker-Nunn y $5,3^{\circ} \times 3,5^{\circ}$ para el detector asociado a la cámara Piggy-Back. Y más aún en el área cubierta para el conjunto de exposiciones solapadas.

La refracción atmosférica está siempre presente en las observaciones, aunque en aquellas de campo ancho se presenta como refracción diferencial, es decir, como una compresión del campo en la dirección de los círculos máximos que convergen en el zenit.

Detectores de tamaño grande implican refracción diferencial notable. Y un mismo zenit para exposiciones solapadas y diseminadas sobre un área extensa define direcciones de compresión diferentes para cada exposición. Todo ello implica que en cada exposición, la refracción producirá patrones que no siempre van a coincidir entre ellos. En consecuencia, y en nuestro caso, la refracción atmosférica no puede ser incluida en este tipo de solución como origen de patrones de distorsión comunes a todas las exposiciones.

Las coordenadas (x, y) deberán ser corregidas por refracción diferencial antes de comenzar la solución conjunta. Para ello bastará con hacer uso de los programas CM1 y RAA para asociar unas coordenadas (a, d) a cada (x, y) medida con las cuales determinar el valor de refracción correspondiente. Dicho valor puede ser trasladado a su equivalente sobre el detector y aplicado a las coordenadas (x,y) originales en forma diferencial sin más que efectuar dichas correcciones manteniendo intacto el punto central, es decir, restando a todos los valores un valor igual a la refracción del punto central.

Este primer conjunto de exposiciones solapadas alrededor del zenit que se realizaron con el TFRM fueron esenciales para aprender el contenido y manipulación del CM1 y los programas del paquete RAA, así como que, con sus datos, se trabajaron los conceptos: Polinomio Deslizante, Patrón de Distorsión, aplicación de las correcciones a los datos e iteración del proceso de reducción cuando haga falta. Pero también sirvieron para mostrar la necesidad de no incluir la refracción como parte del Patrón de Distorsión, construir los gráficos de los Patrones, ver la existencia de otros Patrones de Distorsión (aquellos que además de la posición dependen de la magnitud de la estrella que produce la imagen) y adaptar los nuevos modelos a las exposiciones realizadas por el TFRM, tanto la cámara Baker-Nunn como la cámara Piggy-Back.

El gráfico 1 contiene, como muestra, un primer Patrón de Distorsión que depende de la posición de las imágenes sobre el detector, obtenido de este conjunto de observaciones.

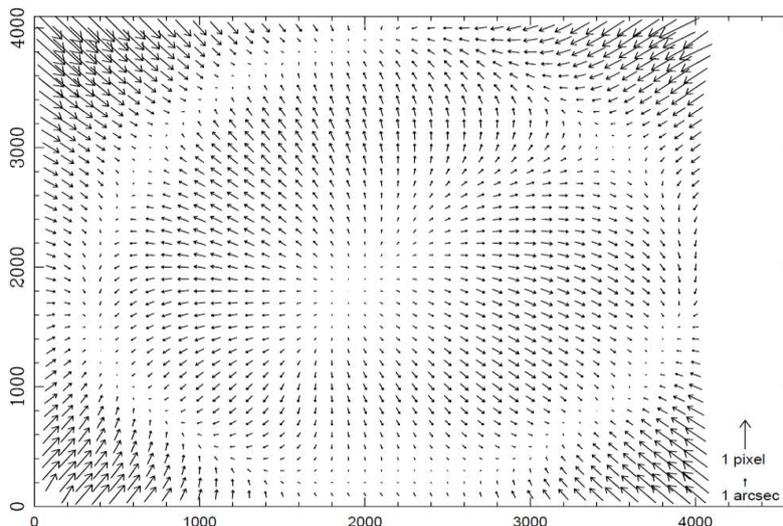


Gráfico 1.

Patrón de distorsión obtenido para la Baker-Nunn, del TFRM.

Las flechas de la leyenda marcan el tamaño de un píxel y un arcosegundo.

Las flechas de la imagen representa la deformación calculado en ese punto del plano.

En igual forma se fue comparando los resultados obtenidos por los programas actuales del TFRM con aquellos obtenidos en la nueva forma de reducción, haciendo uso del catálogo de referencia Tycho-2 (usado en la actualidad por el TFRM) y cambiado por otro más profundo (UCAC5) o por la versión actual del todavía, en proceso de formación, GAIA. Además, como se explicó en una sección anterior, hemos hecho uso de los residuos que comparan las posiciones obtenidas de la reducción (referencia externa de comparación) con las del catálogo de referencia o los residuos obtenidos de cada posición de cada imagen respecto a la posición promedio del conjunto de contribuyentes para estrellas solapadas en el catálogo producto de la reducción (referencia interna). (Gráfico 2)

N° e a/d	RAA			Tycho			RAA (fort.24)			UCAC5			RAA (fort.25)			UCAC5			RAA (fort.25,tol=2.0)			GAIA			RAA (fort.25,tol=1.5)			GAIA							
	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d	N**s	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d	N**s	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d	N**s	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d	N**s	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d	N**s	er. a	er. d	e a/d	er. a	er. d
1	0.718	0.512	0.504	0.687	0.500	0.472	2608	0.669	0.481	0.465	8391	0.660	0.476	0.457	8298	0.470	0.465	8973	0.451	0.442	8884														
2	0.693	0.492	0.488	0.656	0.475	0.453	2477	0.647	0.463	0.452	8208	0.636	0.455	0.444	8208	0.458	0.456	9056	0.436	0.435	8973														
3	0.698	0.494	0.493	0.642	0.459	0.449	2386	0.631	0.452	0.440	8056	0.619	0.446	0.429	8054	0.455	0.443	8894	0.433	0.420	8808														
4	0.613	0.424	0.442	0.579	0.405	0.413	2341	0.585	0.411	0.416	7571	0.575	0.407	0.406	7565	0.415	0.416	8186	0.393	0.397	8115														
5	0.672	0.471	0.478	0.635	0.457	0.440	2179	0.630	0.453	0.438	7357	0.622	0.449	0.430	7358	0.453	0.439	7872	0.432	0.421	7796														
6	0.730	0.516	0.515	0.680	0.492	0.478	2612	0.726	0.515	0.512	8852	0.720	0.512	0.506	8849	0.522	0.524	9673	0.496	0.488	9502														
7	0.684	0.482	0.485	0.644	0.468	0.442	2493	0.652	0.467	0.455	8717	0.644	0.464	0.446	8716	0.467	0.463	9889	0.446	0.442	9795														
8	0.698	0.493	0.493	0.666	0.482	0.459	2346	0.688	0.490	0.483	8273	0.683	0.487	0.479	8272	0.490	0.493	9551	0.465	0.460	9412														
9	0.691	0.487	0.490	0.675	0.477	0.477	2228	0.692	0.491	0.488	7776	0.689	0.492	0.483	7776	0.491	0.488	8955	0.463	0.462	8826														
10	0.661	0.466	0.469	0.635	0.454	0.444	2666	0.641	0.449	0.458	8293	0.639	0.448	0.455	8281	0.450	0.458	6700	0.430	0.439	6632														
11	0.719	0.521	0.494	0.682	0.497	0.468	2603	0.722	0.515	0.506	8875	0.715	0.511	0.500	8873	0.526	0.511	9873	0.495	0.480	9715														
12	0.683	0.485	0.480	0.639	0.460	0.444	2528	0.665	0.478	0.462	8740	0.661	0.477	0.458	8738	0.488	0.474	9857	0.469	0.450	9758														
13	0.688	0.492	0.481	0.644	0.463	0.448	2477	0.655	0.466	0.461	8684	0.651	0.464	0.456	8684	0.476	0.472	9929	0.455	0.454	9830														
14	0.677	0.481	0.476	0.646	0.466	0.447	2416	0.638	0.452	0.450	8567	0.632	0.451	0.443	8564	0.459	0.454	9683	0.441	0.436	9600														
15	0.649	0.467	0.451	0.608	0.438	0.421	2279	0.629	0.449	0.440	8030	0.627	0.451	0.430	8028	0.457	0.449	8869	0.442	0.435	8809														
16	0.663	0.467	0.471	0.611	0.439	0.425	2692	0.649	0.465	0.453	8898	0.641	0.460	0.447	8894	0.475	0.469	9915	0.456	0.442	9793														
17	0.655	0.467	0.459	0.606	0.438	0.418	2538	0.639	0.458	0.445	8739	0.628	0.453	0.435	8734	0.470	0.457	9942	0.448	0.436	9842														
18	0.640	0.439	0.466	0.597	0.419	0.425	2488	0.639	0.458	0.445	8739	0.629	0.445	0.445	8631	0.457	0.463	9880	0.438	0.438	9777														
19	0.660	0.457	0.476	0.627	0.438	0.450	2405	0.675	0.470	0.484	8514	0.668	0.468	0.477	8513	0.478	0.491	9682	0.454	0.468	9563														
20	0.661	0.447	0.487	0.620	0.427	0.449	2315	0.637	0.451	0.450	8368	0.631	0.450	0.442	8366	0.467	0.462	9500	0.445	0.439	9394														
21	0.689	0.484	0.491	0.644	0.457	0.454	2586	0.704	0.495	0.500	6685	0.694	0.490	0.492	6682	0.502	0.516	7268	0.474	0.489	7155														
22	0.636	0.447	0.452	0.596	0.426	0.415	2550	0.626	0.445	0.440	8322	0.620	0.443	0.434	8321	0.459	0.459	9510	0.442	0.439	9435														
23	0.667	0.471	0.473	0.633	0.451	0.445	2500	0.682	0.484	0.480	8396	0.674	0.481	0.472	8395	0.496	0.480	9568	0.471	0.467	9550														
24	0.609	0.419	0.441	0.576	0.410	0.404	2413	0.588	0.410	0.422	7739	0.581	0.407	0.415	7738	0.424	0.436	8721	0.408	0.414	8645														
25	0.646	0.451	0.462	0.611	0.437	0.427	2390	0.641	0.454	0.452	8183	0.636	0.452	0.447	8182	0.466	0.465	9113	0.443	0.446	9024														

Gráfico 2.

Tabla comparativa de errores asociados a cada placa de la serie según el método de reducción usado.

La primera columna corresponde con el número de exposición, las 3 siguientes con los valores para los programas actuales del TFRM.

Las siguientes columnas hacen referencia a los resultados con el método de Stock, combinado con el Polinomio Deslizante (RAA) y las variantes en función del catálogo usado.

Variantes: catálogos Tycho-2, UCAC5, GAIA, Residuos de comparación externa (fort.25) e interna (fort.24).

tol es el criterio para la determinación de las componentes asociadas

Se han realizado ya 3 series de observaciones solapadas desde el inicio del proyecto y entre la primera y la segunda serie se observó una variación de los patrones de distorsión calculados y que suponemos se deben a correcciones realizadas en el sistema óptico del telescopio entre las fechas de ambas colecciones de exposiciones, pues conocemos su existencia.

La tercera serie, todavía por trabajar, está pensada para estudiar la independencia de los patrones de distorsión con el apuntado del telescopio para acceder al campo de observación y las series incluyen campos separados por una gran diferencia de alturas, guiados y no guiados sobre las estrellas.

El cómo trabajar en esta asociación de dos métodos de trabajo se puede resumir como:

1) Tras una primera reducción el método de Stock con solapamiento es posible obtener unas posiciones aproximadas de las coordenadas astronómicas de cada imagen en cada exposición. Estas coordenadas nos permitirán realizar el cálculo del efecto producido por la refracción atmosférica y llevarla a refracción diferencial al compararla con la asignada al punto central del detector.

2) Las coordenadas medidas, corregidas por la refracción diferencial expresada en píxeles, serán tomadas como iniciales y volvemos a realizar la reducción por el método de Stock con solapamiento, creando nuevas matrices solución que producirán los residuos que formaran el

patrón de distorsión al ser tratados por la función Polinomio Deslizante. Este patrón nos muestra la corrección que hay que aplicar a cada punto definido por las coordenadas (x, y) de entrada.

3) Una vez efectuadas estas correcciones las coordenadas corregidas se convertirán en coordenadas iniciales y la reducción vuelve a comenzar y el nuevo Patrón de Distorsión no debería contener valores significativos. En caso contrario, las correcciones se aplicarán a los últimos valores y el proceso se reanudará en forma iterativa hasta conseguir la desaparición significativa de los valores de los patrones.

Desaparecidos los patrones de distorsión, la reducción por el método de Stock con solapamiento nos dará el conjunto de matrices solución de cada una de las exposiciones que han intervenido en el proceso.

1.2. MEDICIÓN DE TRAZAS.

Durante los estudios para mejorar la astrometría surgió un problema con unas exposiciones en las que las estrellas aparecían como trazas oblicuas, esto nos llevó a pensar que podía existir una mala medición de la placa, en lo que respecta a los puntos que representan a las estrellas (trazas), y que son los utilizados para realizar la comparación con el catálogo de referencia.

Para concretar la nomenclatura que usaremos en esta sección, pondremos CCD cuando hablemos de detector, píxel indicará cada uno de los elementos que componen el CCD y cuentas como respuesta del píxel a la luz que incide en él durante la observación.

Antes de detallar el problema y las soluciones es conveniente hacer referencia al tipo de observaciones realizadas con el TFRM. La forma de trabajo en SST del TFRM siempre se realiza sin seguimiento sideral, bien sea realizando seguimiento sobre un objeto o bien sean exposiciones con el telescopio parado (exploración). Además la cámara utilizada obliga a que la duración de las exposiciones sean de al menos de 2 segundos en seguimiento y 5 en exploración. La combinación de ambos factores provoca que las estrellas no aparezcan como imágenes puntuales, sino que aparecen como trazas horizontales en exploración y como trazas oblicuas en seguimiento.

Al aparecer una estrella como traza y realizar un análisis fotométrico se observa que la traza tiene una zona inicial y otra final inclinadas, con el mismo o diferente grado de inclinación³ y entre ambas una zona plana, aunque irregular, que llamaremos meseta.

La altura de esta meseta se corresponde con la respuesta, en cuentas, a la luz que incide de la estrella, en los píxeles que la forman. La irregularidad observada en estas cuentas puede ser debida a varios factores: el *seeing* o calidad de las condiciones atmosféricas durante la observación y la trayectoria y velocidad seguidas por la luz de la estrella sobre el CCD.

El *seeing* indica que la luz que llega de la estrella se reparte sobre la superficie del detector siguiendo una distribución normal en torno al punto de incidencia. Al haber movimiento de las estrellas respecto al CCD durante la observación, los puntos de incidencia para cada instante siguen una trayectoria sobre el CCD y el cómo afecta a los píxeles involucrados en la imagen dependerá de la posición del píxel respecto al área que abarca la distribución durante ese camino y de la velocidad o tiempo durante el cual recibe luz dicho píxel.

En el caso de las observaciones de seguimiento, el satélite aparece como una imagen puntual con simetría radial, pues la luz se distribuye alrededor de un único punto de incidencia. Este caso es el ideal para aplicar la *Point Spread Function* (PSF), o una función gaussiana, siendo el punto (x, y) del CCD al que le corresponde el máximo de la función que representa esa imagen en la

³ Dichas inclinaciones corresponden con el aumento y la disminución del número de cuentas que se observan al realizar el análisis fotométrico.

medición. El resto de las imágenes son trazas y es en el tratamiento de ellas es donde radica la esencia de esta sección del presente trabajo.

En la actualidad, el TFRM usa la función gaussiana como única función de ajuste para la medición de ambos tipos de imágenes. En este trabajo se propone tratar en forma diferente para la medición las imágenes puntuales que los trazos, a menos que los trazos sean muy cortos, donde podría hacerse uso de la función gaussiana.

Antes de determinar el punto de cada trazo que va a ser su representante en una observación SST debemos de tener en cuenta, que cada punto del trazo indica la posición de la imagen sobre el CCD para ese instante de la exposición. Por tanto cualquier conjunto de puntos obtenidos en un proceso de medición deben de estar asociados a un instante de tiempo interno al de la exposición. En observaciones SST es tan importante conocer el conjunto de coordenadas medidas cómo el instante o tiempo asociado a ellas, pues una vez obtenida la reducción de la observación, su aplicación a la posición del objeto satelital nos permite obtener sus coordenadas astronómicas "para ese instante". Se hace necesario acompañar la posición con una etiqueta de tiempo.

Por lo general, la etiqueta de tiempo que se toma es la mitad del tiempo de exposición, que debería de coincidir con el centro de la señal detectada en el caso de una traza y con el pico (también el centro de la señal detectada) en el caso de una imagen puntual (por ejemplo satélite en seguimiento).

La función gaussiana, que suele usarse en la medición de imágenes puntuales, hace recaer el peso del ajuste en tres parámetros: píxel de simetría (media); cuentas asociadas a ese píxel (amplitud de la imagen); y anchura de la imagen (sigma). Como hemos dicho las trazas producen una figura parecida a una meseta con irregularidades, que son aleatorias, por lo que el punto de mayor número de cuentas no tiene que ser necesariamente el punto de la traza asociado al tiempo mitad de la exposición, y por lo tanto no es el punto que mejor representa a dicha traza. Eso no quita para que si la traza es de muy corta longitud, aparezca un máximo absoluto de cuentas. En tal caso, aunque la función gaussiana no fuera la función de distribución de las cuentas, podría ser usada para definir el punto de representación de la misma.

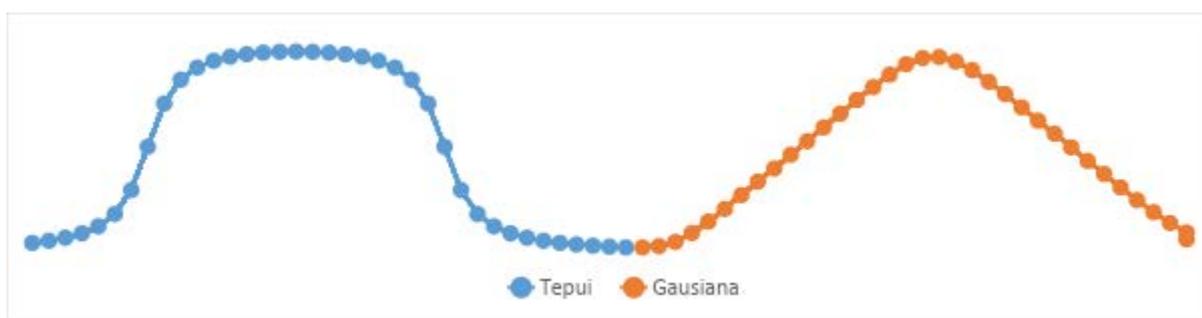


Gráfico 3.

Izquierda: representación de la función Tepui.

Derecha: representación de la función Gaussiana.

Buscando una función que se pudiera ajustar mejor se decidió probar con la función Tepui, presentada en (Abad et al., 2004), y usada en un proyecto anterior del ROA como se puede ver en (Montejo et al., 2011). También podemos encontrar un artículo posterior en (Lacruz et al., 2018) donde se detalla su uso.

La función Tepui, creada originalmente para definir coordenadas (x, y) en imágenes saturadas y por tanto definida en el espacio 3D, puede ser también tratada en el espacio 2D como es el caso de los trazos.

$$Z = alt * (\arctan(b_1 * ((x - x_0) - semiancho)) - \arctan(b_2 * (x - x_0) + semiancho))$$

Ecuaciones 4.

Representación de la función Tepui.

alt - relacionado con la magnitud instrumental y el factor de normalización del resto de la función

b₁ & b₂ - relacionado con las pendientes en la mitad de las inclinaciones

x₀ - punto central, coordenada en la mitad del tiempo de exposición

semiancho - mitad de la distancia entre b₁ y b₂.

Entre las ventajas de esta función, destacamos que la función Tepui está creada en función del punto central (x₀), aunque éste no destaque, visualmente, en el trazo. Además, los parámetros b₁ y b₂ están asociados a los píxeles situados en los extremos de los trazos. Las cuentas de los píxeles asociados a la meseta del trazo (valores en el entorno Alt) están relacionadas a la fotometría instrumental de la estrella que la produce.

Por otro lado, dejamos independientes los parámetros b₁ y b₂ para que puedan absorber posibles desigualdades en los tiempos de apertura y cierre del obturador así como condiciones atmosféricas diferentes que pudieran ocurrir al principio y final de la observación, posible fuente de aparición de una cierta pendiente de la meseta.

Hay que resaltar como limitación del ajuste de la función Tepui que tiene un gran número de parámetros a determinar (5) y más si incluimos una base (recta) que simula el piso (fondo de cielo) sobre el cual se apoya (7). Eso quiere decir que el número de píxeles para su determinación por el método de mínimos cuadrados deber suficientemente mayor que el de parámetros. El uso de una recta de apoyo a la función por su posibilidad de que el fondo de cielo no sea plano tiene su justificación al poseer un fuerte viñeteo el TFRM.

En este caso, donde la longitud del trazo combinada con el tamaño del píxel no es capaz de alcanzar trazos con un número suficiente de píxeles para el ajuste, pensamos que está justificado el uso de funciones como la gaussiana. Incluso nos atreveríamos a afirmar que los trazos comprenderían un máximo absoluto de cuentas.

1.2.1. Desarrollo práctico.

Como se ha anticipado, la decisión tomada a partir del presente trabajo fue usar la función Tepui. Dicha decisión vino motivada por un problema que surgió con el TFRM al realizar seguimiento de satélites Galileo y determinar la posición de estos. La reducción calculaba una mala posición y se pudo determinar que el problema radicaba en una mala medición de las trazas.

El estudio anterior identifico que el problema solo ocurría con las trazas oblicuas, mientras que no sucedía con las trazas horizontales y verticales, así pues con las finalidades de comprobar la viabilidad del uso de la función Tepui en el TFRM y para aprender sus conceptos y manejo se decidió realizar pruebas sobre una exposición de exploración, con trazas horizontales. De este modo solo había que ajustar la función en la dirección X, mientras en la dirección Y se ajustaría una gaussiana sobre los píxeles y sus cuentas que rodean en la dirección de Y en un entorno del punto determinado como centro de X.

El primer paso antes de realizar la medición es detectar dónde hay trazos sobre el CCD. Para ello y debido al tamaño del CCD en número de píxeles, 4096x4096, se separó el CCD en secciones rectangulares más pequeñas, con un pequeño traslape, que se trataron en forma independiente.

El método usado y empleado anteriormente en la publicación Montojo et al, 2011, consiste en realizar una integración de cuentas de todos los píxeles alineados en una misma fila sobre su píxel correspondiente en una nueva columna, ya que sobre ella, podremos detectar qué filas contienen señal. Luego, sobre esa misma fila buscaremos la causa de esa señal, si es asociada a una o varias imágenes o si es trazo o puntual la forma por medio de una convolución.

De este proceso podemos extraer parámetros iniciales, suficientemente buenos, necesarios para el ajuste de la función Tepui por el método de mínimos cuadrados. En esta función los parámetros no aparecen unidos en forma lineal y su solución aparece en forma iterativa a partir de esos valores iniciales con incógnitas los incrementos necesarios para mejorarlos.

La aplicación de la Tepui sobre las detecciones de la convolución permitió conocer las soluciones y los errores asociados a este método sobre el TFRM. Comparando los datos con los proporcionados por los sistemas del TFRM se decidió que el método era viable y podía mejorar las actuales mediciones. Si bien hemos indicado que la novedad es la aplicación sobre las trazas inclinadas.

Para las observaciones de seguimiento, donde aparecen los trazos oblicuos, el método de trabajo a seguir será diferente al seguido con los trazos horizontales de las observaciones de exploración. Detallamos a continuación los pasos seguidos en el método con este tipo de observaciones.

El primer paso está relacionado con la búsqueda de trazos sobre la exposición. Para ello, y sobre una misma columna, buscamos píxeles con máximos absolutos de cuentas bajo un criterio de separación y columna a columna recorreremos todo el CCD. Una vez determinados, buscamos aquellos píxeles que están en contacto o muy próximos. Puesto que sabemos de la necesidad de como mínimo 7 datos para proceder al ajuste de la Tepui, solo se considerará como traza aquellos grupos de máximos que unidos tienen como mínimo 7 elementos.

A partir de este momento, nos centramos en el cálculo de la posición del punto central para cada uno de estos trazos. Para ello hemos considerado si trabajar sobre el espacio 3D ajustando a la traza una función compuesta de dos funciones de distribución independientes, Tepui y gaussiana o trabajar en un espacio bidimensional al proyectar la traza sobre cada uno de los ejes de coordenadas, ajustando a estas proyecciones una función Tepui en 2D. Finalmente se decidió optar por el uso de las proyecciones.

Una vez realizada la detección se procede a realizar un ajuste lineal a la traza que nos indique durante todo el proceso la trayectoria de la estrella sobre el sensor. Este ajuste será el encargado de definir los puntos que formarán parte de las proyecciones de la traza sobre cada uno de los ejes.

Los puntos a proyectar deben sobrepasar la longitud de la traza. A cada proyección se le aplica la convolución para determinar si la traza está aislada y si es así, calcular los parámetros iniciales para el ajuste de la función Tepui respectiva.

De esta manera se calculan las coordenadas cartesianas (x_0, y_0) del punto central del trazo por separado.

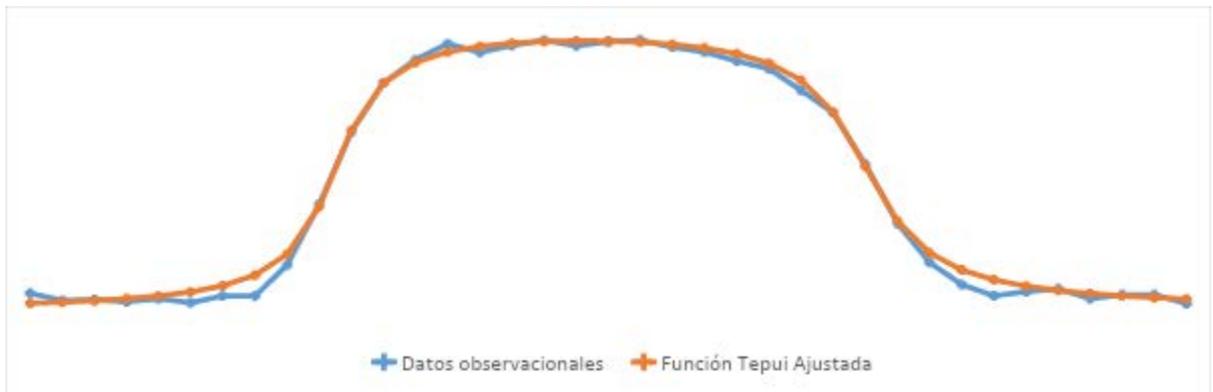


Gráfico 4.

Ejemplo de ajuste en una de las direcciones sobre los datos observacionales de una estrella.

Tras una comparación de los datos obtenidos en la medición de una placa con los datos del TFRM, se desprende que se ha conseguido mejorar la medición, aunque también se ha observado la necesidad de mejorar el ajuste lineal a la traza al inicio del proceso.

2. CONCLUSIONES.

Tras el análisis de los trabajos llevados a cabo se observa que los datos mejoran la astrometría actual del TFRM, además de aportar independencia sobre los actuales programas usados pertenecientes a terceros. También se ha podido comprobar que el personal de la Sección de Astronomía del ROA, en especial el TN Azorín es capaz de trabajar y aportar nuevas soluciones a los métodos aquí presentados.

Por todo lo anterior se considera que la beca Alvargonzález ha sido fructífera y beneficiosa para el ROA.

Como hemos visto en el desarrollo y anticipábamos en la introducción quedan líneas de investigación abiertas y trabajos pendientes de mejorar. Estos trabajos se pretende que sean expuestos en futuras publicaciones.

Las líneas futuras pendientes son:

- Comprobación de la invariabilidad de los Patrones de Distorsión con la posición del telescopio.
- Eficacia de los Patrones de Distorsión que se obtiene a partir de una observación de exploración en SST.
- Aplicación de mejoras en el ajuste lineal para la traza, previo al ajuste de la Tepui.
- Aplicación del método de Stock para la resolución de placas con pocas estrellas (Piggy-Back).

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, C. (1993). Determination of field distortion by a plate-overlap method. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 98, 1–6.
- Abad, C., Docobo, J. A., Lanchares, V., Lahulla, J. F., Abelleira, P., Blanco, J., & Alvarez, C. (2004). Astronomy Astrophysics Reduction of CCD observations of visual binaries using the “Tepui” function as PSF. *A&A*, 416, 811–814.
- Baltay, C., Snyder, J. A., Andrews, P., Emmet, W., Sinnott, J., Bailyn, C., Coppi, P., Oemler, A., Sabbey, C. N., Sofia, S., Van Altena, W., Vivas, A. K., Abad, C., Bongiovanni, A., Briceñ, C., Bruzual, G., Prugna, F. Della, Magris, G., Sá Nchez, G., ... Geary, J. (2002). A Large-Area CCD Camera for the Schmidt Telescope at the Venezuelan National Astronomical Observatory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 114, 780–794.
- Calabretta, M. R., & Greisen, E. W. (2002). II Representations of celestial coordinates in FITS. *A&A*, 395, 1077–1122.
- Lacruz, E., Abad, C., Downes, J. J., Hernandez-Perez, F., Casanova, D., & Tresaco, E. (2018). High astrometric precision in the calculation of the coordinates of orbiters in the Geo Ring. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 54(1), 209–216.
- Montejo, F. J., López Moratalla, T., & Abad, C. (2011). Astrometric positioning and orbit determination of geostationary satellites. *Advances in Space Research*, 47(6), 1043–1053.
- Stock, J. (1981). Block Adjustment in Photographic Astrometry. *Revis*, 6, 115–118.
- Stock, J., & Abad, C. (1988). The Unification of Astrometric Catalogues. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 16, 63–68.

ESTRUCTURA MAGNÉTICA DE UN VOLCÁN SUBMARINO ANTÁRTICO Y SU RELACIÓN CON LOS INICIOS DE FORMACIÓN DE FONDO OCEANICO

Alberto Santamaría Barragán

Beca Alvargonzález

Mayo 2021 – Noviembre 2021

INDICE

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	25
CONTEXTO GEOLÓGICO, TECTÓNICO Y GEODINÁMICO	26
DATOS Y METODOS.....	29
RESULTADOS.....	38
DISCUSION	41
CONCLUSIONES.....	43
BIBLIOGRAFIA	44

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La cuenca cenozoica de Bransfield (CB) es una cuenca de retroarco, localizada entre la Península Antártica (PA) y las Islas Shetland del Sur (ISS) que ha sido objeto de diversas campañas geológicas-geofísicas con el objetivo de obtener más información acerca de los factores geológicos que afectan a esta área.

Los principales resultados obtenidos a lo largo de todas las campañas han indicado que la CB presenta una corteza delgada (Guterch *et al*, 1991), actividad sísmica y volcánica activa (Pelayo and Wiens, 1989), una anomalía magnética negativa, localizada en el centro de la cuenca (Roach *et al*, 1978), una gran anomalía gravimétrica de Bouguer positiva que se extiende por el centro de la CB (Catalán *et al.*, 2013) y una gran actividad hidrotermal (Nagihara and Lawver, 1989). El conjunto de todos estos resultados son indicadores de que esta cuenca podría ser una cuenca de rift activa y joven, de edad Cenozoica. En este trabajo nos centraremos en el magnetismo como método geofísico principal para obtener nuestros objetivos.

Las anomalías magnéticas son el resultado de la suma de los campos magnéticos asociados a la magnetización de las distintas fuentes localizadas en la corteza, analizándolas podemos obtener información de la distribución de los cuerpos que generan dichas anomalías en superficie. Se entiende por magnetización a la capacidad de un cuerpo de magnetizarse cuando se le aplica un campo magnético. En este trabajo realizaremos el estudio del campo magnético de un volcán activo, en concreto el volcán Orca, localizado en la CB.

Las zonas volcánicas presentan magnetizaciones remanentes elevadas y suelen ser muy variables por lo que presentan una respuesta magnética característica. Las variaciones del campo magnético terrestre en estas áreas pueden deberse a distintos procesos: efectos piezomagnéticos (cambios en los esfuerzos que pueden causar variaciones en la magnetización inducida o remanente), efectos electrocinéticos (alteraciones provocadas por la circulación de fluidos) y efectos termomagnéticos (cambios en la magnetización por variación de temperatura) (Tanaka, 1993).

La estructura volcánica es bastante compleja y posee una gran heterogeneidad a causa de la sedimentación continua de distintos materiales asociados a los distintos periodos de actividad volcánica que han tenido lugar hasta la actualidad. Como resultado, los mapas de anomalías magnéticas de estas regiones reflejan normalmente anomalías intensas y fuertes gradientes.

El presente trabajo se centra principalmente en el estudio de los datos magnéticos disponibles de la campaña científica BRAVOSEIS llevada a cabo en la CB desde el año 2017 hasta la actualidad.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización en detalle de la estructura magnética del volcán Orca, a partir de datos magnéticos de la zona. Este volcán es de gran interés ya que se localiza en el eje de expansión de una cuenca que no se sabe con exactitud si se encuentra en la etapa inicial o final del rift. Los objetivos específicos a alcanzar son:

- 1) Procesado e interpretación de los datos magnéticos obtenidos durante la campaña BRAVOSEIS.
- 2) Generación de mapas de anomalías magnéticas del volcán Orca, a partir de los datos magnéticos de la campaña BRAVOSEIS.
- 3) Procesado e interpretación de los datos gravimétricos obtenidos durante la campaña BRAVOSEIS.

- 4) Generación de mapas de anomalías gravimétricas de Bouguer del volcán Orca, a partir de los datos gravimétricos de la campaña BRAVOSEIS.
- 5) Interpretación geodinámica de los resultados obtenidos en los puntos anteriores.
- 6) Integrar los resultados obtenidos con otra información geológica y geofísica de la zona, obtenida directamente como la batimetría, o derivada de otras fuentes como la magnetización, con el fin de obtener más información sobre la evolución de la CB.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO, TECTÓNICO Y GEODINÁMICO

La CB está considerada una cuenca de retroarco del arco volcánico de las ISS, es decir, una zona extensional situada detrás de un arco magmático, desarrollada durante el Cenozoico tardío, con unas dimensiones aproximadas de 500 km de longitud y 100 km de anchura, que presenta una dirección NE-SW. Si el proceso de extensión continua, se producirá un adelgazamiento de la corteza terrestre hasta desaparecer, provocando la creación de una dorsal. Este proceso finalizaría con la generación de corteza oceánica (Fig. 1). Existen dos hipótesis principales que explican el origen de la CB:

- 1) La extensión NW-SE de la CB guarda relación con el régimen transtensional de la placa de Scotia y Antártica por toda la dorsal del Sur de Scotia (Giner-Robles *et al.*, 2003).
- 2) La formación de la CB se debe a la migración hacia el NW de las ISS como consecuencia del "roll-back" de la fosa de las ISS (Maldonado *et al.*, 1994, Lawver *et al.*, 1995,1996).

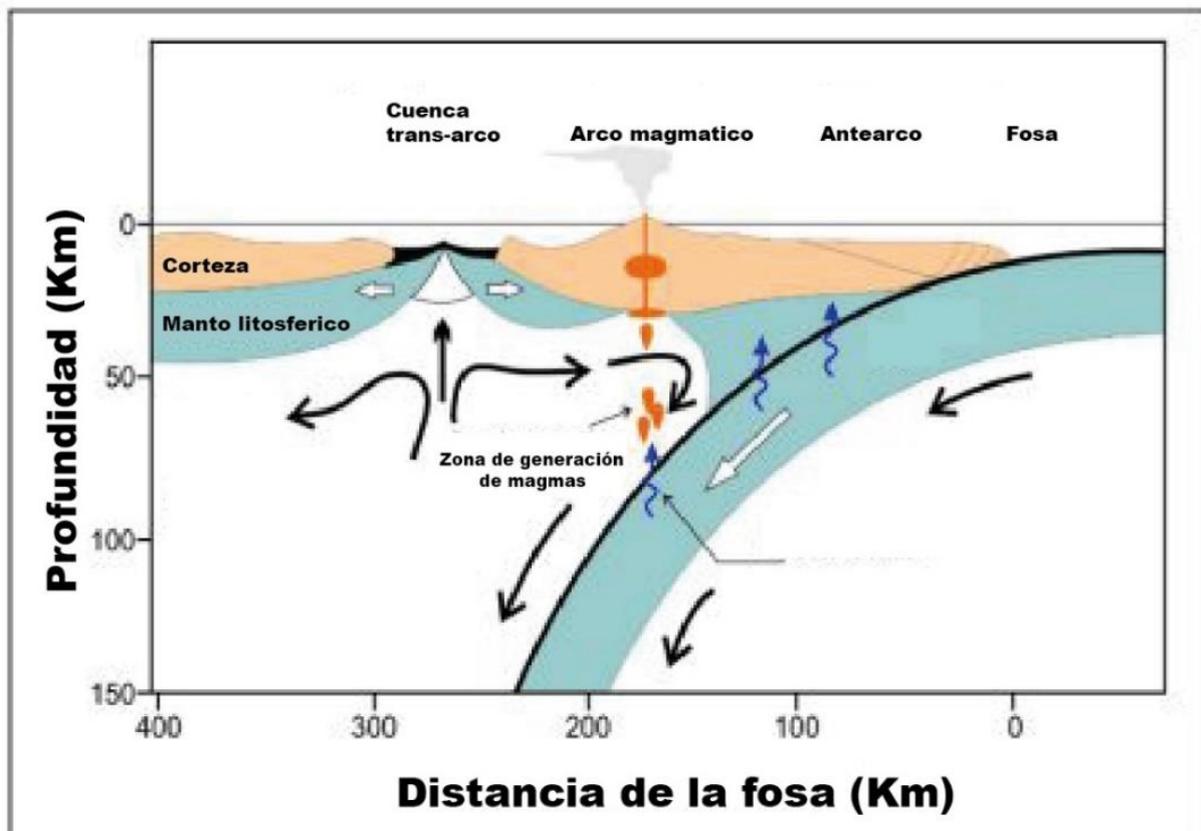


Fig. 1 Esquema de la situación tectónica de la zona de estudio. (Modificado de López-Ruiz *et al.*, 2015)

Información sísmica y gravimétrica previa indica que la corteza de la CB no se encuentra excesivamente adelgazada (Barker y Austin, 1998; Barker *et al.*, 2003), lo que indicaría que la CB se encuentra en una etapa primitiva de formación de corteza oceánica o en una situación en la que todavía no ha comenzado este proceso. Los vuelos aeromagnéticos reflejan la "anomalía magnética del Pacífico" (PMA), localizada en las ISS y PA. Estudios de sísmica multicanal indican que la CB se expande actualmente y los estudios de GPS proponen una velocidad de 10 mm/año en dirección NW-SE (Dietrich *et al.*, 2001).

Geográficamente (Fig. 2A), la CB limita al noreste con la parte sur de la Placa de Scotia, al norte con la fosa de las ISS, y al suroeste con la prolongación sureste de la zona de fractura de Hero.

La cuenca se divide morfológicamente en tres sub-cuencas que separan las ISS de la PA: Occidental, Central y Oriental (Fig. 2B) (Galindo-Zaldívar *et al.*, 2004, Catalán *et al.*, 2013). El límite entre la sub-cuenca occidental y la central está representado por una falla transformante que limita la PA con la Placa de Phoenix (Galindo-Zaldívar *et al.*, 2004). Esta falla juega un papel más importante en la zona norte, en el límite con las ISS, donde la subducción determina la deformación local y los levantamientos del terreno, así como la formación de rocas metamórficas HP / LT en la isla Smith (Catalán *et al.*, 2013) (Fig. 2B). Los procesos tectónicos disminuyen hacia el sur donde la falla no muestra evidencias claras de actividad.

La sub-cuenca central (Fig. 3), limita al norte con las ISS, donde encontramos un gran número de fallas extensionales y al sur con la PA, donde se distingue un conjunto de fallas normales muy espaciadas. Esta sub-cuenca presenta unos 60 km de ancho, 230 km de largo y ~2000 m de profundidad (Gràcia *et al.*, 1996).

La característica más importante de esta sub-cuenca es la presencia de seis volcanes submarinos, que se localizan a lo largo del eje de la CB y están alineados con orientación NE-SW (Gràcia *et al.*, 1996). Uno de ellos es el volcán Orca, representado por la letra 'A' (Fig. 3).

Esta sub-cuenca está formada por corteza continental poco adelgazada (Guterch *et al.*, 1991, Grad *et al.*, 1992). La profundidad del basamento es mayor en el límite de la PA (3 km) donde se distinguen dos secuencias sedimentarias principales; una secuencia Syn-Rift y otra Post-Rift. Hacia las ISS la profundidad del basamento disminuye hasta los 2 km (Gràcia *et al.*, 1996).

El límite entre la sub-cuenca central y oriental es difuso, y aproximadamente marcado por la isla volcánica Bridgeman.

La sub-cuenca oriental (Fig. 2B) tiene 42 km de ancho, 150 km de largo y ~2700 m de profundidad (Gràcia *et al.*, 1996). Esta sub-cuenca está formada por cuatro depresiones distribuidas de sur a norte, cada una de ellas presenta una profundidad y características diferentes al resto (Gràcia *et al.*, 1996).

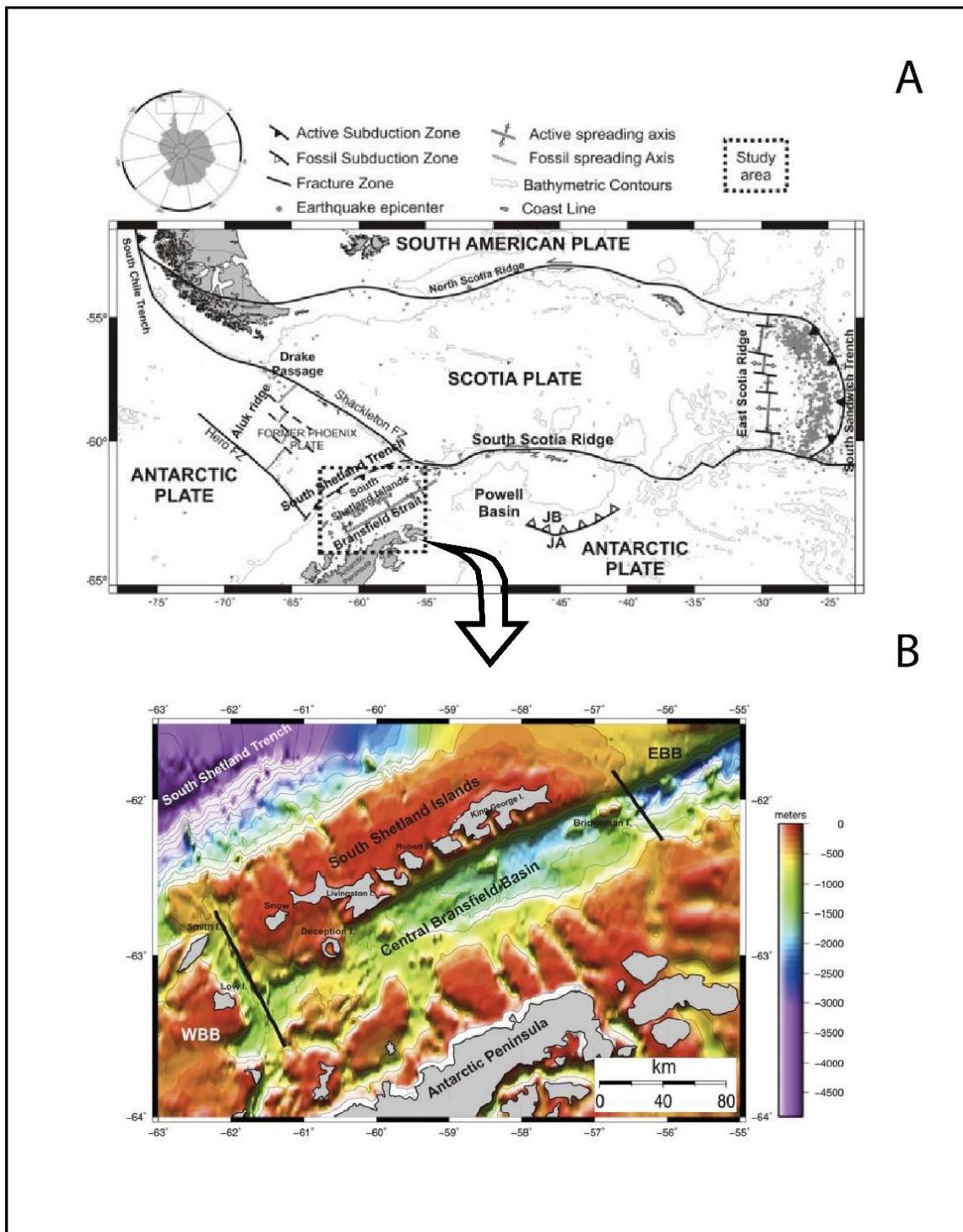


Fig. 2. A) Mapa regional geotectónica de la región. El recuadro negro indica la zona de estudio B) Mapa batimétrico en detalle de la zona de estudio dividido en las distintas sub-cuencas. EBB: Sub-cuenca Oriental, CBB: Sub-cuenca central, WBB: Sub-cuenca Occidental. (Modificado de Catalán et al., 2013)

La ausencia de estudios sobre la corteza de la sub-cuenca Oriental dificulta su interpretación, sin embargo, los estudios realizados en la sub-cuenca central podrían ayudar en este sentido. Los datos morfológicos obtenidos indican que el basamento podría estar constituido por corteza continental adelgazada, afectada por la intrusión de diques, presentando distintas características de profundidad y procesos sedimentarios con respecto a la sub-cuenca central (Gràcia et al., 1996).

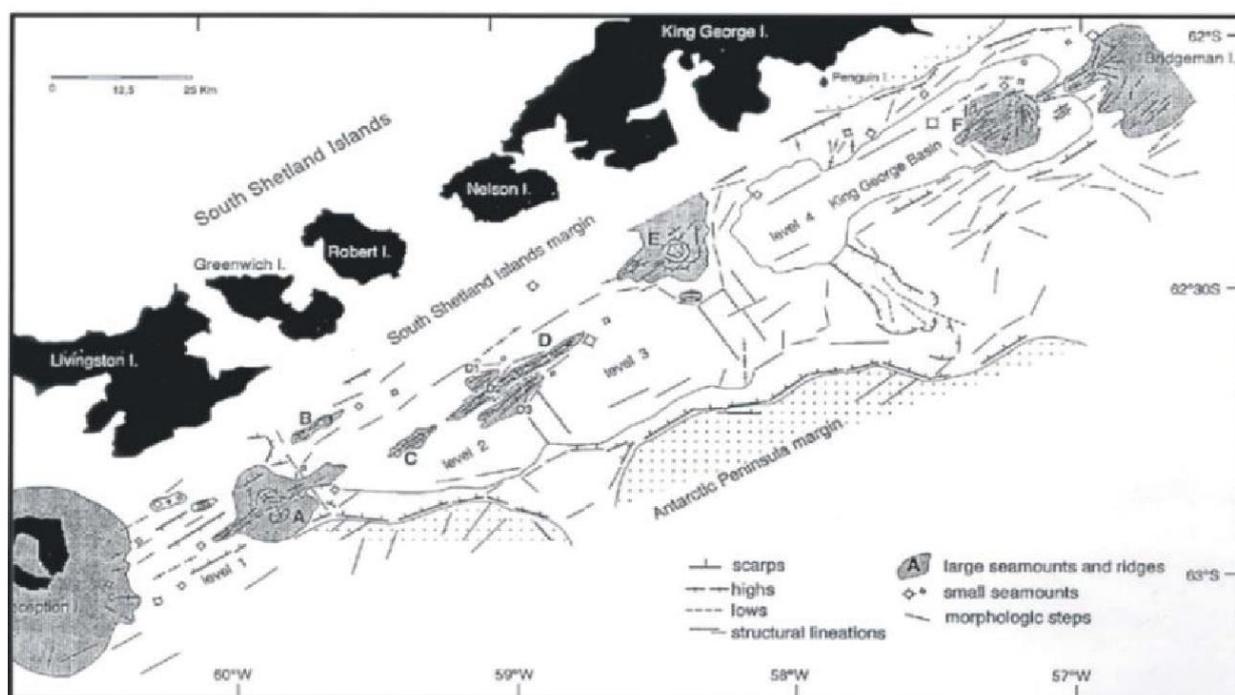


Fig. 3. Esquema morfoestructural de la sub-cuenca central. Las letras A-F representan los principales volcanes submarinos. La letra 'A' representa el volcán Orca (Modificado de Gràcia et al., 1996).

3. DATOS Y METODOS

En este apartado se llevará a cabo la descripción de los datos usados así como el tratamiento teórico y práctico de los mismos hasta generar las anomalías de campos potenciales (magnetismo, gravimetría y batimetría). Haciendo especial énfasis en los datos magnéticos y gravimétricos. Todos los datos han sido procesados con el programa Oasis Montaj de Geosoft.

3.1. ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA CAMPAÑA BRAVOSEIS

Durante la campaña BRAVOSEIS tuvo lugar la adquisición de datos magnéticos, gravimétricos y batimétricos utilizando la instrumentación geofísica a bordo del buque oceanográfico 'Sarmiento de Gamboa (Fig.4A) en el que tuvo lugar la campaña. Todos los instrumentos (Figs. 4B y 4C) son controlados desde el laboratorio de geofísica que se localiza en el barco.

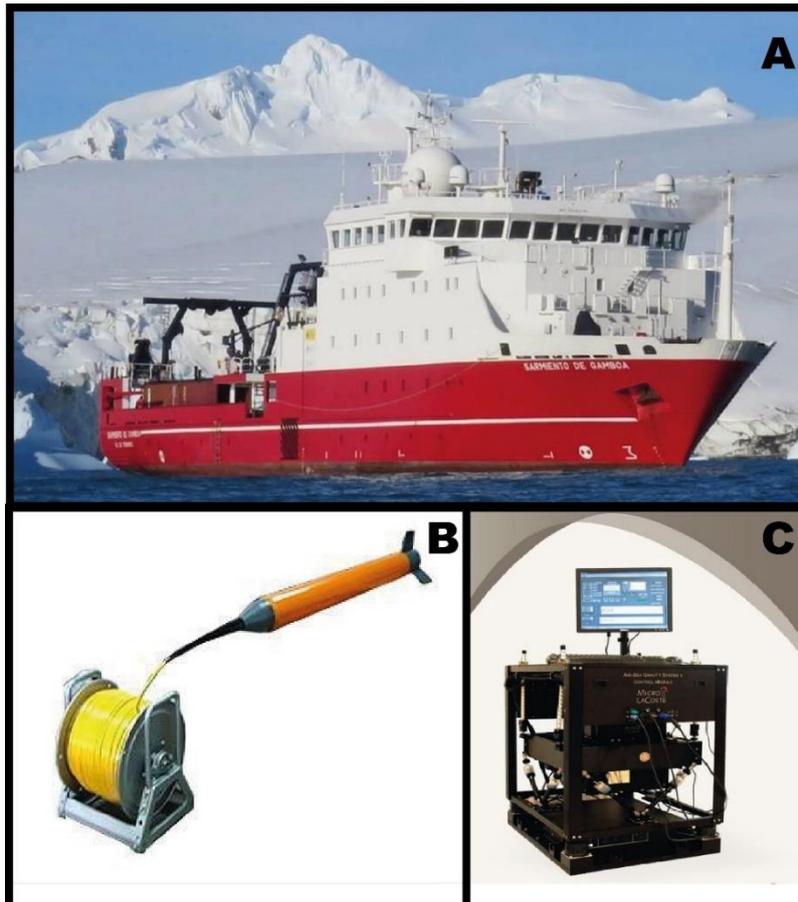


Fig. 4 A) Imagen del buque oceanográfico Sarmiento de Gamboa. B) Imagen del magnetómetro con el que se han tomado las medidas magnéticas. C) Imagen del gravímetro con el que se han tomado las medidas gravimétricas.

3.1.1. Magnetismo

La toma de medidas del campo magnético se llevó a cabo con el magnetómetro marino SeaSpy 300. Este equipo es un magnetómetro de protones basado en el efecto Overhauser y tiene una precisión de 0.2 nT.

Una vez adquirida, la medida de campo magnético es almacenada y georreferenciada mediante el sistema de posicionamiento GPS. El sensor de presión del magnetómetro nos indica en todo momento la profundidad a la que nos encontramos.

El magnetómetro va largado por la popa del barco 300 m para minimizar los efectos magnéticos producidos por el propio barco en la toma de medidas

3.1.2. Gravedad

Las medidas del campo gravimétrico se obtuvieron con un gravímetro Micro-g LaCoste Air-Sea System II (resolución de 0.01 mGal). Adicionalmente para calibrar este equipo, se utilizó en puerto un gravímetro portátil Scintrex CG-5 con una resolución de 1 μ Gal.

El gravímetro se localiza en una zona lo más próxima posible al centro de gravedad del barco, en una de las cubiertas inferiores. El gravímetro contiene unos giróscopos que mantienen al instrumento en la vertical con respecto a la Tierra y permiten que este no se mueva con las oscilaciones del barco, proporcionando de esta forma valores de aceleración en la dirección vertical. No obstante, existen otras aceleraciones espurias que contaminan la medición de la aceleración de la gravedad y que deberán de extraerse mediante correcciones como la de Eotvos.

3.1.3. Batimetría

Para la toma de medidas batimétricas el buque dispone de tres ecosondas localizadas bajo el casco del barco que se controlan desde el laboratorio de geofísica.

- Una ecosonda monohaz hidrográfica Kongsberg Maritime AS EA 600. Esta ecosonda detecta el fondo marino y puede trabajar con dos transductores: uno de 12 kHz (de gran profundidad, hasta 12.000 m) y otro de 200 kHz (poca profundidad y mucha resolución)
- Una ecosonda multihaz de aguas profundas Atlas Hydrosweep DS-3 1° x1°. Permite elaborar mapas batimétricos. La frecuencia de trabajo es de 15.5 kHz y 11.000 m de profundidad de alcance, con un rango de operación entre 10 y 11000 m.
- Una ecosonda multihaz de aguas someras Atlas Fansweep FS-20-100. Esta ecosonda interferométrica para realizar mapas de fondo con una frecuencia de 100 kHz.

3.2. MÉTODOS Y PROCESADO DE LOS DATOS

Con el fin de obtener las anomalías magnéticas y gravimétricas en el volcán Orca, adquiridas durante la campaña BRAVOSEIS, ha sido necesario aplicar una serie de correcciones a los valores magnéticos y gravimétricos.

En primer lugar es necesario seleccionar los datos válidos de la zona en la que se va a trabajar (Fig. 5). Para ello debemos de eliminar todas aquellas medidas que puedan ser erróneas o que se localicen fuera de la zona de interés. Posteriormente habrá de aplicarse correcciones específicas para cada disciplina: magnetismo y gravimetría.

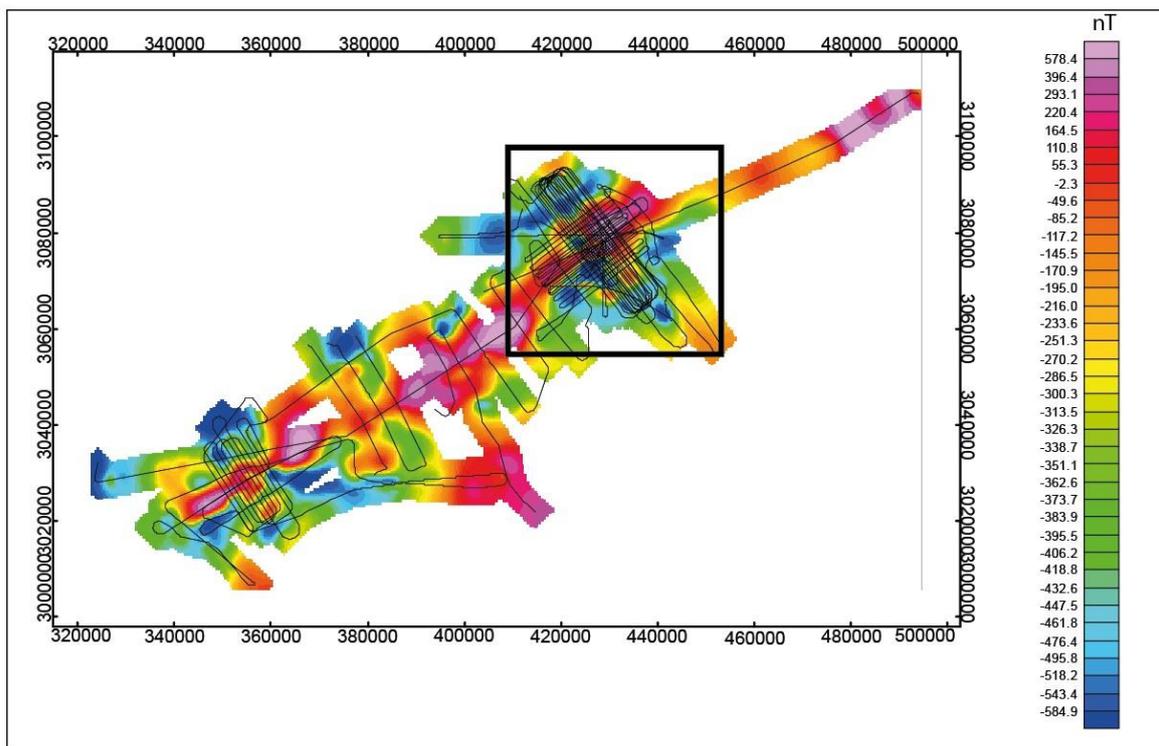


Fig. 5. Mapa magnético de la CB con el conjunto de datos de la campaña BRAVOSEIS. Las líneas negras representan las distintas trazas en las cuales se han tomado valores del campo magnético terrestre. El recuadro negro representa la zona del volcán Orca (Fig. 8).

3.2.1. Correcciones magnéticas

3.2.1.1. Corrección del posicionamiento del sensor

Una de las principales correcciones consiste en reposicionar el sensor marino, para ello trasladamos la medida tomada por el GPS, localizado en el barco, a la posición donde se encuentra el magnetómetro realmente. Esta corrección se efectúa con un algoritmo que implementa el programa Oasis Montaj y que precisa para su determinación, del valor del rumbo y la longitud de cable de magnetómetro largado por la popa del buque.

3.2.1.2. Corrección de variación diurna (VD)

En segundo lugar, se realiza la corrección por VD. Esta es la variación del campo magnético terrestre provocado por los campos magnéticos externos, principalmente por la actividad solar.

La radiación de alta energía emitida por el sol ioniza una parte de la atmósfera (ionosfera) que al desplazarse, como consecuencia de desequilibrios térmicos y fuerzas gravitatorias, generan un campo magnético. Este es más intenso cuando mayor es la influencia del sol. Por ello, durante el día, el campo magnético ionosférico es mayor en las horas de máxima radiación solar (mediodía) y mínimo durante la noche. El campo magnético de la ionosfera se superpone al campo magnético terrestre de origen interno de modo que la suma de ambos, al ser vectorial, altera el campo magnético medido. Como consecuencia debe aplicarse una corrección para evitar que las anomalías magnéticas estén influenciadas por el campo magnético de la ionosfera.

Para realizar la corrección por VD disponemos de dos procedimientos:

- a) Se utilizan los datos del magnetómetro de la estación de referencia (Observatorio geomagnético de Livingston (Fig. 6)). Para ello se determina un nivel de referencia (R_f) utilizando la media de los niveles marcados durante periodos nocturnos. Posteriormente este valor se sustrae a cada medida del observatorio, determinando de esta forma la aportación por campos externos. Este valor posteriormente se sustrae a cada medida en la mar mediante un proceso de interpolación.
- b) Si no existen valores disponibles de la estación de referencia, debido a que no existe ninguna suficientemente próxima (distante de la zona de trabajo menos de unos 200 km), o por inoperatividad de la existente (en el caso de este trabajo sería la isla Livingston), se utilizará el modelo CM4 (Sabaka *et al.*, 2004), usado en otros trabajos de manera satisfactoria (Martos, 2010). Este programa permite estimar la componente externa de un lugar concreto introduciendo la fecha y posición de dónde se quiere realizar la medida.

3.2.1.3. Cálculo de la Anomalía Magnética Absoluta

Una vez aplicadas las correcciones diurnas, obtenemos el mapa del campo magnético total. Los mapas de campo total son poco representativos porque en ellos está incluida la aportación del campo magnético principal de la Tierra, que es prácticamente un 95% del total de la medida. Si nuestro propósito es destacar la aportación del campo magnético cortical, la aportación del núcleo debe de ser extraída. Para ello, al mapa de campo total, se le sustrae el Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF, por sus siglas en inglés) resultando en el mapa de la Anomalía Magnética de nuestra zona de estudio.



Fig. 6 Imagen del Observatorio geomagnético situado en la isla Livingston.

3.2.1.4. Nivelado

Una vez calculada la anomalía magnética es preciso realizar un nivelado en los perfiles cercanos al volcán Orca, con el objetivo de eliminar errores de posicionamiento y obtener un mapa que presente una mayor resolución en esta zona. Para ello primero, se han subdividido los perfiles en diferentes subconjuntos dependiendo de la forma de las trazas de navegación; las trazas paralelas se han denominado con la letra L, las trazas transversales a las líneas de levantamiento con la letra T, y las trazas que dibujaban formas circulares con la R. El ajuste de nivelado de la zona del volcán Orca se ha llevado a cabo de forma manual.

Este proceso permite atenuar el impacto de los errores en posicionamiento y otros acumulados en cada línea, utilizando el hecho de que las medidas de anomalía magnética en dos trazas que se cortan en un mismo punto (Figs. 8A y 8C) debería ser la misma.

Este proceso utiliza una combinación de filtros en el dominio del espacio y de la frecuencia para determinar con claridad si una señal es geológica o si es ruido (Fig. 7). La aplicación de este método exige una componente manual previa importante para obtener resultados correctos.

El resultado del nivelado es un mapa magnético obtenido únicamente con las líneas del levantamiento una vez niveladas utilizando para ello las líneas perpendiculares a estas tan solo a modo de referencia durante la nivelación. Las trazas curvilíneas son desechadas debido a la falta de confianza en el posicionamiento del sensor.

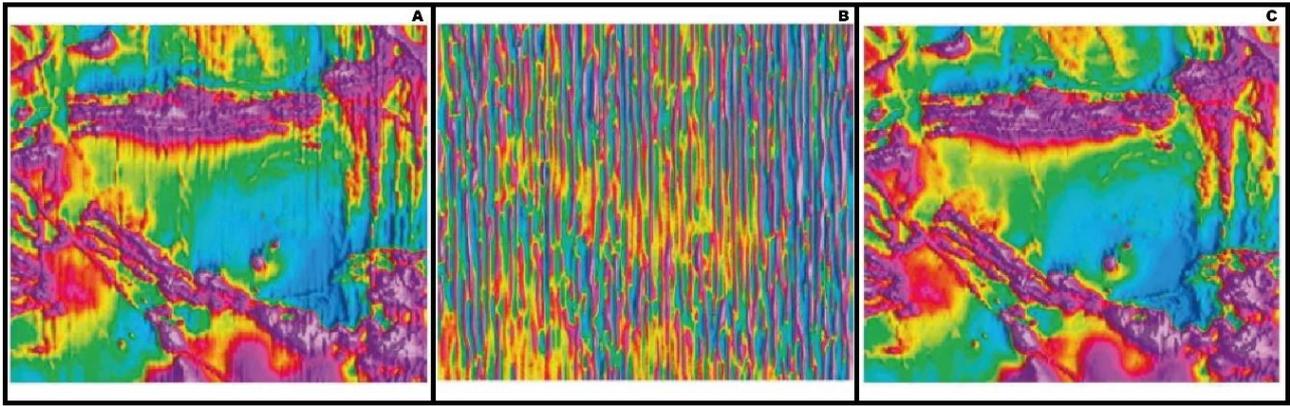


Fig. 7 Ejemplo de nivelación en una región de estudio con ruido. A) Representa el grid original. B) Representa el grid de ruido. C) Representa el grid nivelado. Imagen obtenida de <https://www.seequent.com>.

3.2.2. Correcciones gravimétricas

Los valores de gravedad deben corregirse para extraer una serie de dependencias geográficas e instrumentales al objeto de poder calcular el valor de las anomalías. Estas correcciones son:

3.2.2.1. Corrección de la deriva instrumental

Las lecturas del gravímetro pueden variar en el tiempo debido a los cambios en la constante elástica del muelle del gravímetro. Aunque estas variaciones son pequeñas hay que tenerlas en cuenta si queremos alcanzar precisiones de décimas de mGal. Esto implica la necesidad de establecer una estación base donde se mida la gravedad, al menos, al principio y al final de cada jornada de medición.

En una campaña marina esto no es posible. Se usa un gravímetro de tierra para medir antes de salir de la campaña y al finalizar esta. Se mide en puntos designados en las zonas de puerto donde se conoce el valor de la gravedad absoluta. La diferencia en el valor de la gravedad en las mediciones realizadas en esos puntos fundamentales, en dos momentos diferentes del día, nos permite estimar la deriva del gravímetro y así poder aplicar una corrección a esta. Esta corrección se puede calcular mediante la ecuación (1):

$$d = \frac{(l_{B2} - l_{B1})}{(t_{B2} - t_{B1})} \quad (1)$$

Dónde: d es la deriva instrumental, l_{B2} es la segunda lectura de la gravedad observada en la base-estación mientras que l_{B1} es la primera lectura en la misma base. t_{B2} representa el tiempo de lectura de la segunda lectura en la base y t_{B1} es el tiempo de la primera lectura.

3.2.2.2. Obtención de la gravedad teórica

La gravedad teórica es la gravedad obtenida a partir de fórmulas basadas en el establecimiento de un elipsoide de rotación que se aproxime lo más posible a la figura de la tierra. La ecuación utilizada (2) para calcular las variaciones de la gravedad respecto a su latitud es la de 1967 (Dobrin y Savit, 1988):

$$g(\theta) = 978031 * (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) \quad (2)$$

Dónde: $g(\theta)$ es la aceleración normal de la gravedad en mGal de la superficie del elipsoide de referencia y φ es la latitud geográfica.

3.2.2.3. Corrección del efecto Eotvos

Esta corrección pretende extraer la aportación provocada por la componente vertical de la aceleración de Coriolis. Esta aceleración es provocada por el movimiento de la plataforma de medición (el barco), y contamina el valor de aceleración de la gravedad al que pretendemos ser sensibles. La ecuación empleada para aplicar esta corrección es la siguiente (3):

$$\delta g_{Eotvos} = 7.5 * V * \cos\Phi * \sin\alpha + 0.004154 * V^2 \quad (3)$$

Dónde: δg_{Eotvos} es la corrección del efecto de Coriolis, V es la velocidad de la nave en nudos, Φ es la latitud geográfica y α es el rumbo del buque.

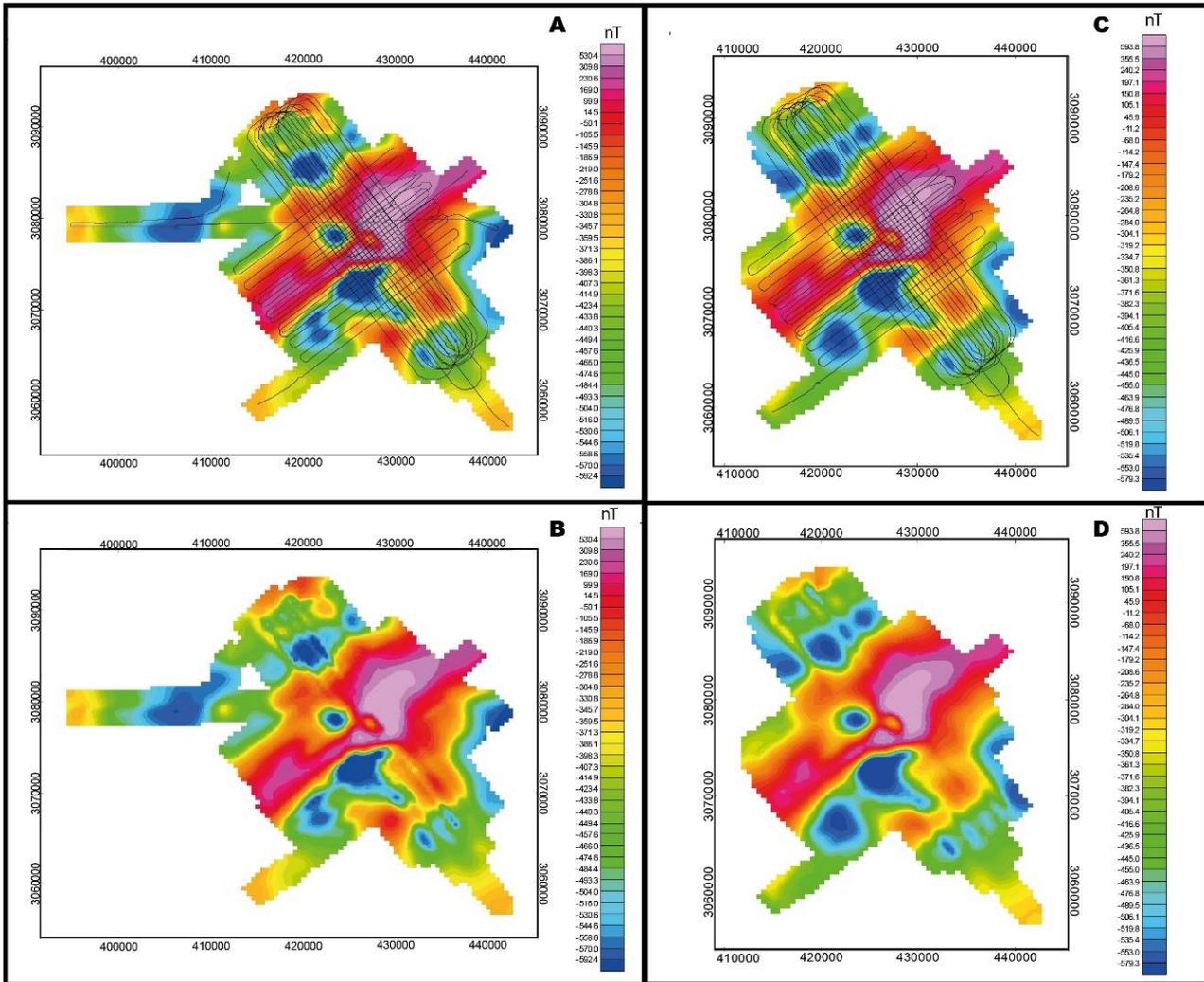


Fig. 8 Mapa de anomalía magnética del entorno del volcán Orca. A) Mapa sin corrección de nivelado mostrando las diferentes trazas. B) Mapa de anomalía magnética sin aplicar la corrección de nivelado. C) Mapa de anomalía magnética aplicando la corrección de nivelado mostrando las diferentes trazas. D) Mapa de anomalía magnética aplicando la corrección de nivelado.

3.2.2.4. Corrección de Aire Libre

Esta corrección estima el decaimiento de la gravedad con el aumento de la altura. En consecuencia, debe aplicarse siempre que se realicen mediciones en puntos con diferente altitud. Esta corrección se explica por la siguiente ecuación (4):

$$g_{Al} = 0.3086 * h \quad (4)$$

Dónde: g_{Al} es la gravedad expresada en mGals y h la altura.

En zonas marinas, donde todas las lecturas se obtienen desde un mismo nivel, (superficie marina), no es preciso aplicar esta corrección.

3.2.2.5. Corrección de la placa de Bouguer

El objetivo de esta corrección es la eliminación del efecto de gravedad producido por las masas existentes desde el punto de medida hasta el elipsoide o geoide. Para tener en cuenta esta diferencia, se suele utilizar el modelo simple de una placa infinita con una densidad constante (ρ). Se explica mediante la siguiente ecuación (5):

$$g_m = -0.4191 * \rho * h \quad (5)$$

Dónde: g_m es la corrección de Bouguer expresada en mGal, ρ es la densidad de las masas en kg/m^3 . El valor exacto de ρ depende del área de estudio y h es la distancia al elipsoide o geoide en m.

En campañas marinas, la corrección de Bouguer sustituye al agua marina por la densidad de una roca asumida (normalmente 2.67 g/cm^3), y ρ es la diferencia en las densidades de la roca de reemplazo y la del agua marina.

3.2.2.6. Obtención de la Anomalía de Bouguer

Después de aplicar estas correcciones y de realizar el nivelado de los datos para obtener una mayor resolución de las anomalías gravimétricas, podemos calcular el mapa de la anomalía de Bouguer con la siguiente ecuación (6):

$$A_{\text{Bouguer}} = g_{\text{AI}} - g_m \quad (6)$$

Dónde: A_{Bouguer} son los valores obtenidos de la anomalía para cada punto medido.

3.2.3. Cálculo de errores

Los errores en el presente estudio dependen fundamentalmente del error de posicionamiento de los aparatos de medida, y de todos aquellos procesos (campos externos, aceleraciones del buque por cambios de velocidad debido al estado de la mar, o alteraciones en el rumbo...) que para ser extraídos se han aplicado modelos o estaciones de referencia no suficientemente cercanas a las zonas de levantamiento. En particular el desarrollo de nuevas técnicas basadas en los satélites GPS se ha podido ir disminuyendo la aportación al error producida por el posicionamiento.

3.2.4. Magnetismo

Para el cálculo del error en nT se han tomado como referencia los valores de la desviación estándar antes y después del nivelado de los datos magnéticos. La desviación estándar mide la cantidad de variación de un conjunto de valores alrededor de un valor medio. Una desviación estándar baja, correspondiente a los datos obtenidos al realizar el nivelado (Fig. 9B) indica que los valores tienden a estar cerca del valor esperado para cada punto, demostrando así una mayor coherencia. Por otro lado, una desviación estándar alta indica que los valores se distribuyen en un rango más amplio (Fig. 9A) por lo que el error es más elevado. Con este proceso hemos conseguido disminuir la desviación estándar a 22.73 nT desde un valor inicial de dispersión de 95.63 nT. Ello muestra el impacto tan positivo que ha tenido el proceso de nivelación.

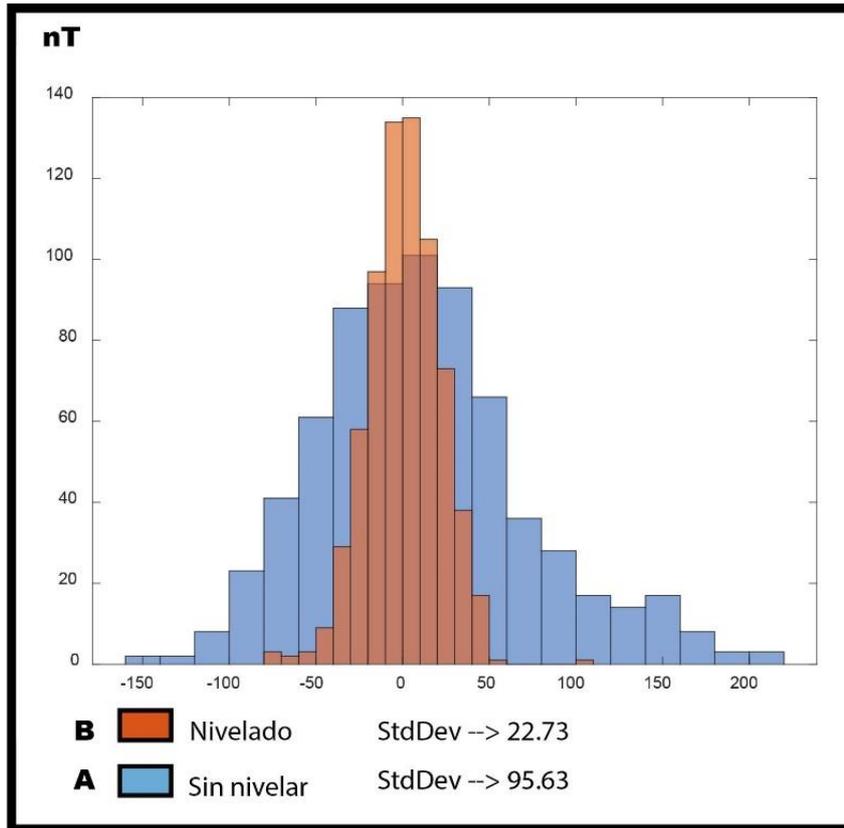


Fig. 9 Representación estadística de los datos. A) El color azul representa los datos sin nivelar. B) El color naranja representa los datos nivelados. StdDev indica la desviación estándar para cada caso calculada por el programa Oasis Montaj.

3.2.5. Gravedad

Para los datos de gravedad se ha tenido en cuenta el levantamiento realizado sobre la traza (Fig. 10A) que pasa por nuestra zona de estudio con dirección SW-NE (Fig. 10B), dando una mayor resolución de los datos en esta área.

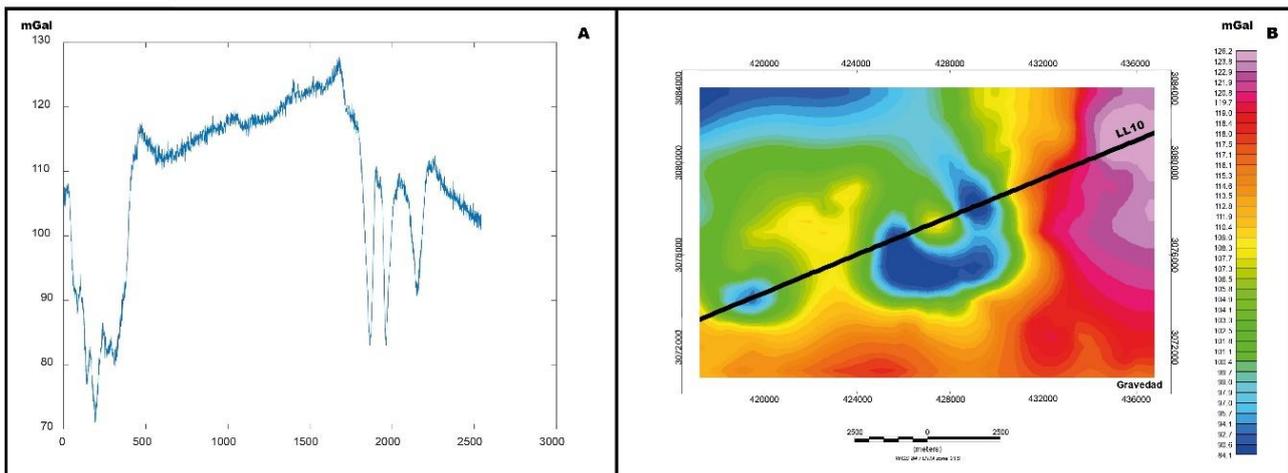


Fig. 10 Traza de anomalía de Bouguer. A) Representación gráfica del perfil que hemos utilizado. B) Localización de la traza empleada para la obtención del mapa gravimétrico.

4. RESULTADOS

Una vez calculadas y aplicadas todas estas correcciones, obtenemos los mapas de anomalías. Todos los mapas de anomalías obtenidos están proyectados en coordenadas UTM WGS84 H21S. Hay que tener en cuenta a la hora de realizar la interpretación de los mapas el error que hemos calculado ya que podría dar lugar a cambios en la interpretación de los resultados.

4.1. MAPAS MAGNÉTICOS

El mapa de anomalía magnética de nuestra zona de interés, el volcán Orca (Fig. 11), presenta un máximo de 1281 y un mínimo de -751, exhibiendo una amplitud de 2032 nT. Existen una serie de máximos en torno a este volcán que presentan una orientación preferente de dirección NE-SW. Los mínimos tienen forma circular y se localizan al sur y oeste del volcán. Los valores obtenidos son presentan una incertidumbre de ± 20 nT debido al error obtenido en el levantamiento.

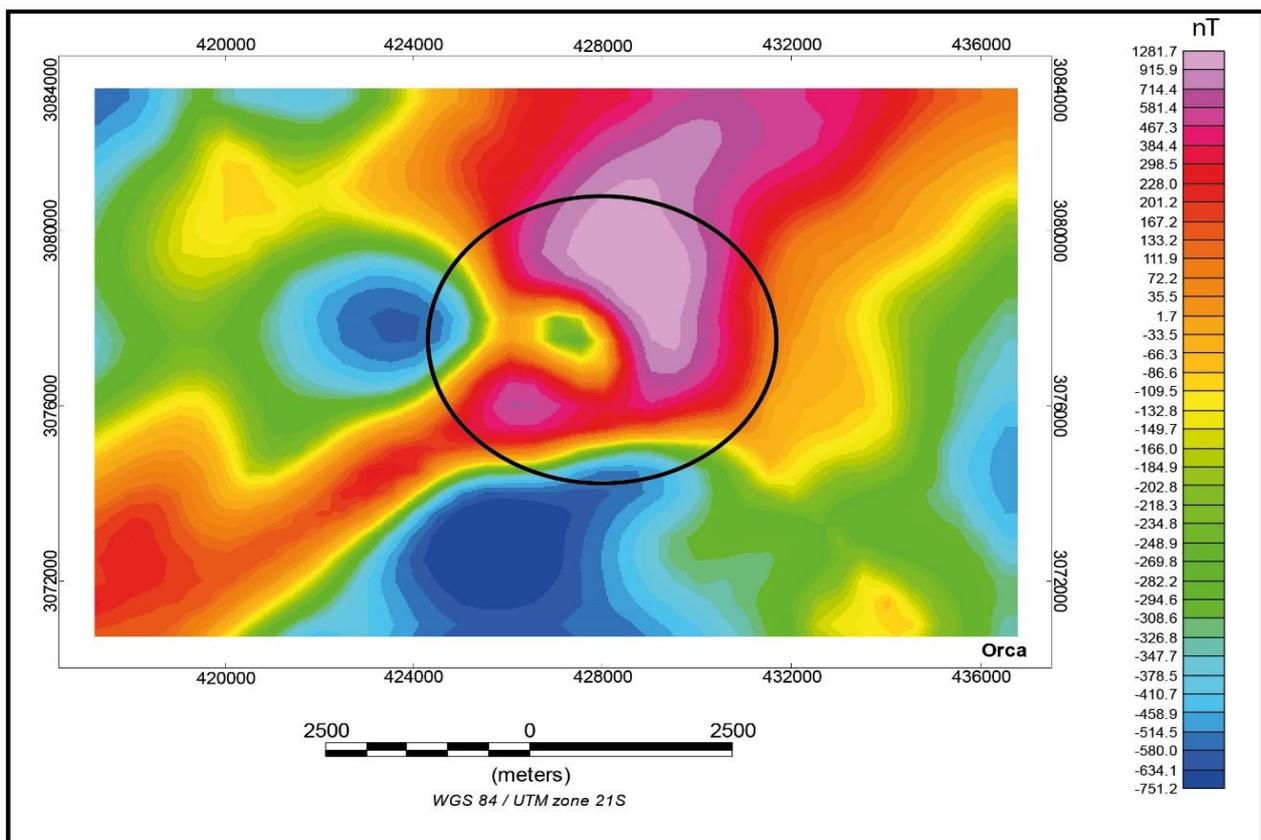


Fig. 11 Mapa magnético del volcán Orca. El círculo representa las coordenadas exactas donde se localiza el edificio volcánico.

Por otro lado, se ha calculado el mapa de magnetización del volcán Orca, para ello se ha empleado la técnica de Parker y Huestis (1974), es una técnica de inversión de Fourier que elimina la distorsión en latitud del campo magnético (Fig. 12). Para realizar la inversión se tomó una capa de espesor constante de 500 m siguiendo la topografía y asumiendo que la magnetización en la vertical se mantiene constante. Se ha aplicado un filtro paso banda de X e Y longitudes de onda. El mapa de magnetización presenta un máximo de 43 A/m y un mínimo de -49 A/m, con una amplitud de 89 A/m.

El mapa presenta una serie de artefactos en los bordes debido a la inversión durante el cálculo de la magnetización, el cual se desarrolla en el dominio de las frecuencias. Sin embargo, los

valores donde se localiza el volcán Orca (círculo en Fig. 12) son correctos y no están afectados por los efectos de borde.

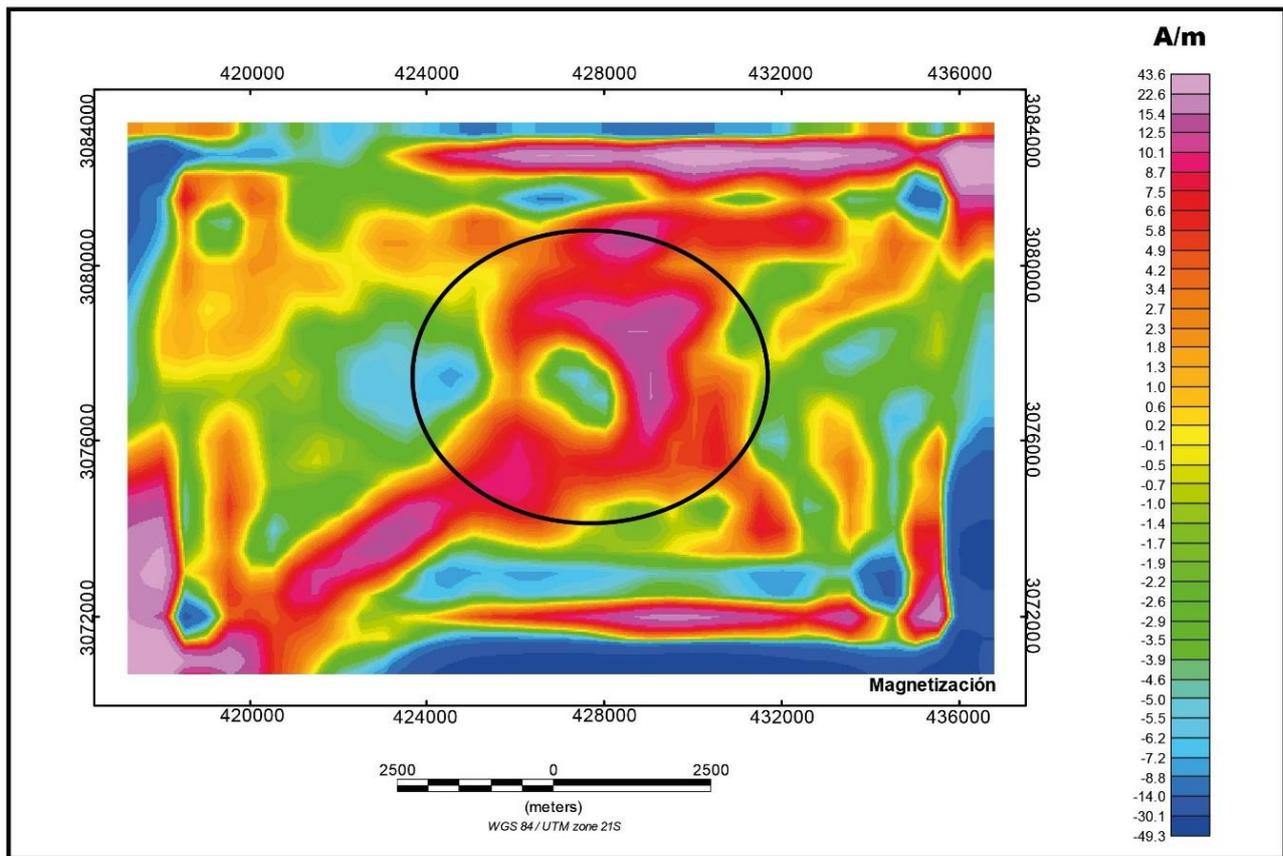


Fig. 12 Mapa de magnetización del volcán Orca. El círculo representa las coordenadas exactas donde se localiza el edificio volcánico.

4.2. MAPA GRAVIMÉTRICO

El mapa gravimétrico (Fig. 13) muestra un máximo de 126 mGal y un mínimo de 84 mGal, presentando una amplitud de 210 mGal. La parte externa del volcán está representada por un mínimo de forma circular, que podría representar la estructura externa de este. En el centro encontramos un pequeño máximo de forma circular. Al este del volcán encontramos un gran máximo. Al oeste del volcán se representa un mínimo circular de menor tamaño.

4.3. MAPA BATIMÉTRICO

Los datos batimétricos del volcán Orca (Fig. 14) presentan un máximo de 695 m y un mínimo de 1865 m. La zona donde se localiza el volcán representa los valores más elevados, indicando la existencia de una estructura que presenta un gran relieve en el fondo oceánico. En el SW del volcán se puede observar otro máximo de menor amplitud que presenta una geometría circular.

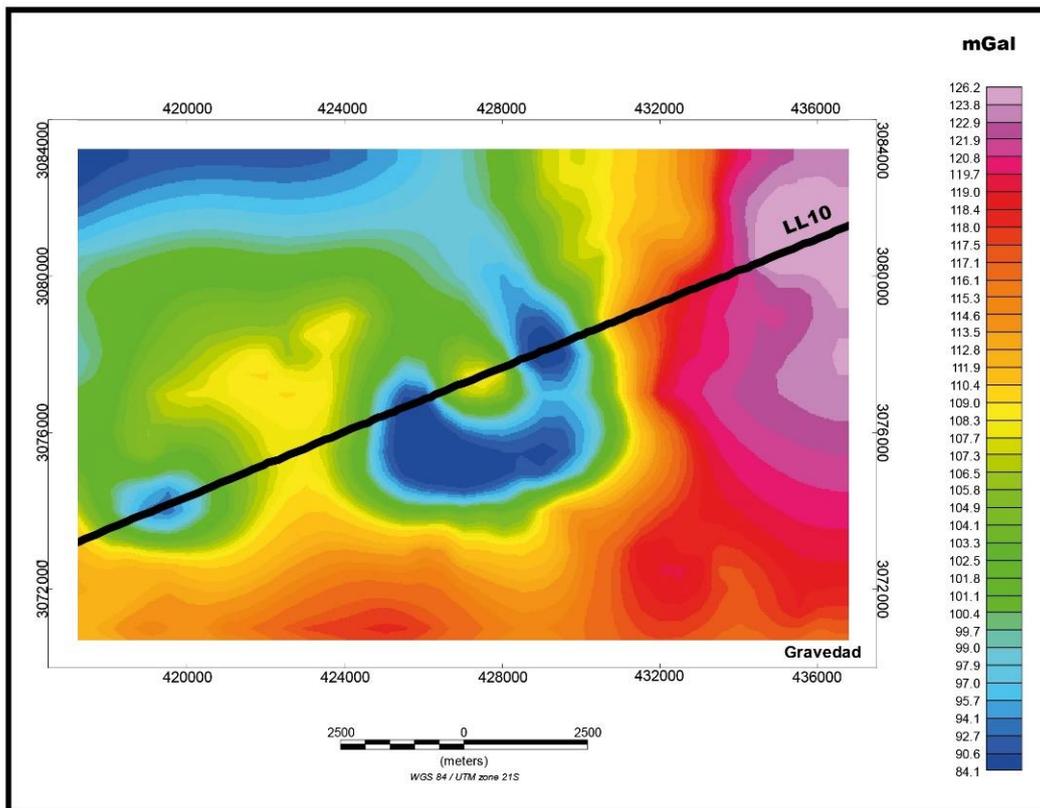


Fig. 13 Mapa gravimétrico del volcán Orca. El círculo representa las coordenadas exactas donde se localiza el edificio volcánico. La línea negra representa la traza de donde se han obtenido los parámetros de la figura 16.

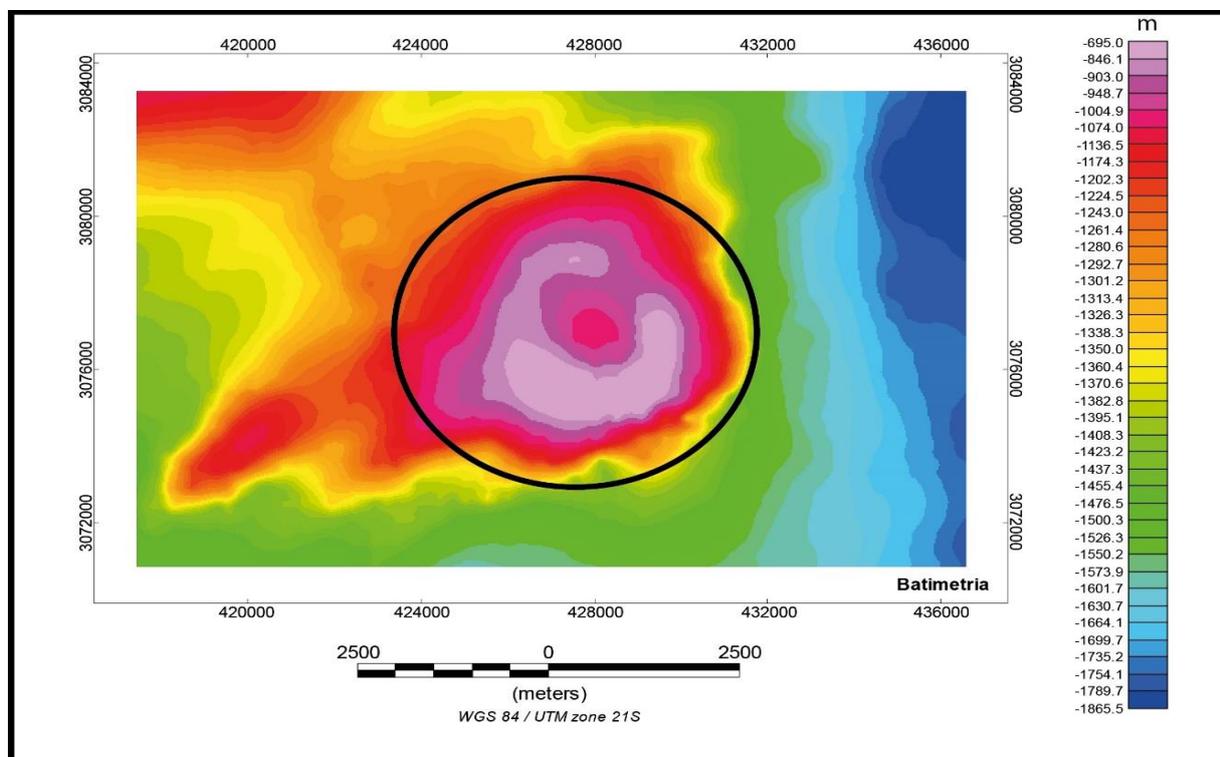


Fig. 14 Mapa batimétrico del volcán Orca. El círculo representa las coordenadas exactas donde se localiza el edificio volcánico.

5. DISCUSION

A partir del estudio de los mapas de anomalías magnéticas, gravimétricas y batimétricas creados a través de los datos obtenidos en la campaña BRAVOSEIS, ha sido posible detectar la estructura del volcán Orca y su relación con la CB.

Como se ha podido observar existe una gran diferencia entre la sub-cuenca central y la oriental del estrecho de Bransfield, la principal diferencia es la línea neo-volcánica que se localiza en la sub-cuenca central, que representan una serie de máximos alineados a lo largo del eje de expansión de la CB (Fig. 15).

Los datos obtenidos por otros autores (Catalán *et al.*, 2013) indican la correlación directa entre las respuestas magnéticas y gravitacionales a lo largo de todo el eje central de la CB con algún mínimo gravimétrico localizado próximo a estructuras volcánicas, coincidiendo con los resultados obtenidos para este trabajo (Figs. 11 y 13). El mínimo gravimétrico que se localiza en el volcán Orca (Fig. 13) puede ser causado por una sobrecompensación de la gravedad por presentar valores inferiores a 2.67 g/cm^3 o tener una relación directa con la transición que tuvo lugar entre el bloque de las ISS y la CB. Christeson *et al.*, 2003 propone una baja velocidad sísmica entre los volcanes Orca y Three Sisters (Fig. 15. Letras C y D) relacionada con los mínimos gravimétricos que se localizan al sur del eje neo-volcánico (Catalán *et al.*, 2013).

A su vez, el volcán Orca también presenta una anomalía de temperatura, causado por los flujos hidrotermales que se encuentran en el edificio volcánico y a lo largo de todo el eje de la CB donde el gradiente geotérmico juega un papel importante. (Lawner *et al.*, 1995, Rodrigo *et al.*, 2018).

La CB muestra características de ruptura apoyadas por diversas investigaciones geofísicas y geodésicas. El rifting implica actividad volcánica y deformación extensional. La deformación extensional es apoyada por técnicas de geodesia y estudios sísmicos que indican una componente extensional con dirección NW entre las ISS y la PA donde podemos encontrar un gran número de fallas extensionales a lo largo de la CB (Gràcia *et al.*, 1996, Taylor *et al.*, 2008)

La formación y morfología de un volcán en un contexto de extensión como es la CB tiene distintas fases (Gràcia *et al.*, 1996). En ambos casos nuestros datos indican que el volcán podría encontrarse en una etapa inicial, ya que presenta una forma circular, indicando que todavía no está afectado por fallas extensionales, por lo que no se ha iniciado la prolongación de su eje axial. Estos datos apoyarían la idea de que la CB se encuentra en una etapa temprana de expansión oceánica.

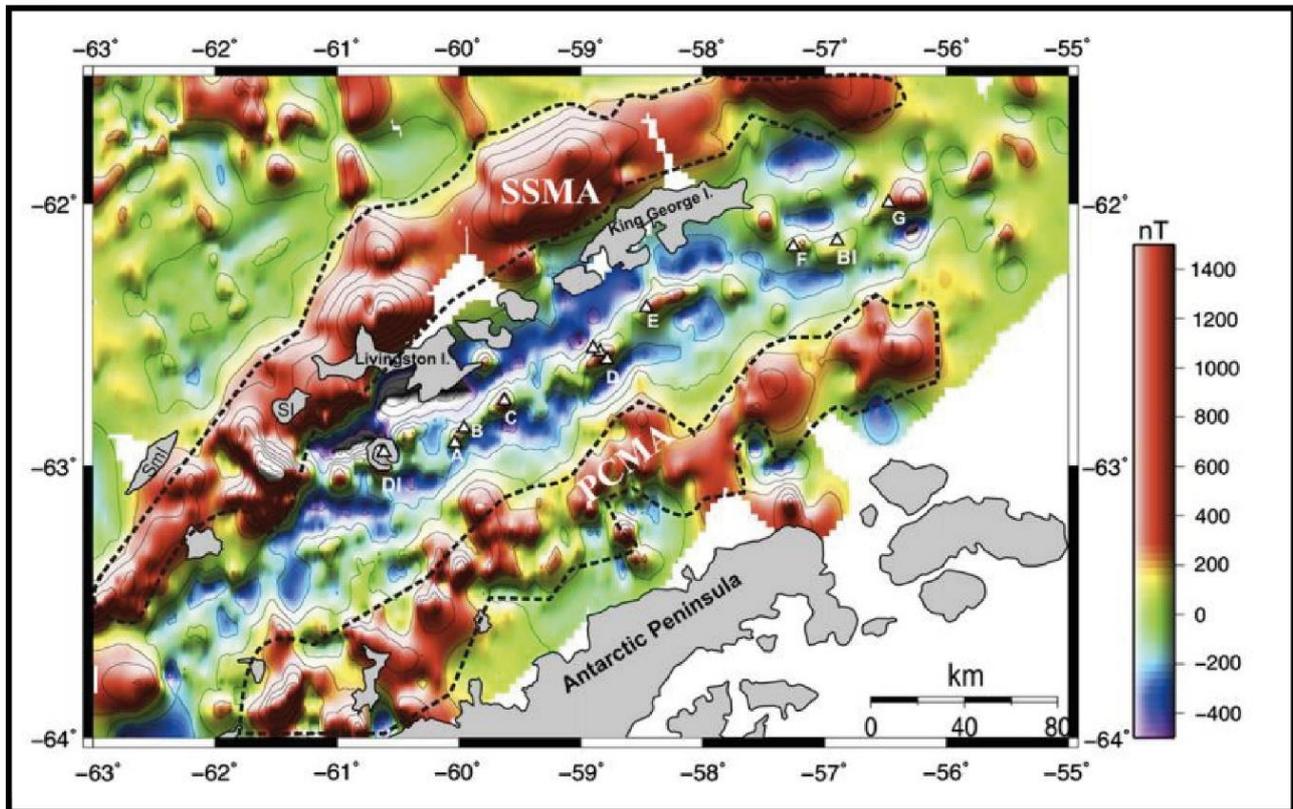


Fig. 15 Mapa de anomalía magnética de la CB. Las letras A-G representan los volcanes que se encuentran en la subcuenca central. La letra 'C' representa el volcán Orca y la letra 'D' el volcán Three Sisters (Catalán et al., 2013).

La magnetización total obtenida en la anomalía magnética del volcán Orca (Fig. 12), presenta una polaridad normal, ya que se trata de un neo-volcán cuya magnetización está afectada por el campo magnético actual. Combinando las tres técnicas (Fig. 16) observamos en la zona del volcán existe una correlación entre los datos batimétricos y magnéticos, donde las zonas topográficas submarinas elevadas dan máximos que coinciden con las zonas con máximos magnéticos, en este caso podría tratarse del edificio volcánico. Por otro lado, vemos que esta zona está representada por un mínimo de la anomalía de Bouguer. El conjunto de estos datos podría explicarse debido a la edad reciente del volcán, a un enfriamiento lento de los materiales, a un incremento de los sedimentos en el fondo marino o a la baja velocidad sísmica localiza en esta región (Gràcia et al., 1996, Christenson et al., 2003).

El flujo de calor geotérmico depende de distintos factores geológicos, como el flujo de calor del manto, la tectónica de la zona de estudio y la producción de calor por desintegración radiactiva (Pollack et al., 1993). El flujo de calor es un factor importante. En la Antártida presenta un rango de valores que van desde 42 a 180 mW/m². Los valores más altos de flujo de calor se localizan en el sistema de rift y en la PA (Martos et al., 2017, Burton-Johnson et al., 2017) coincidiendo con nuestra zona de estudio.

Aprovechando la sensibilidad de las anomalías magnéticas respecto a los perfiles térmicos de la litosfera se pueden realizar estimaciones de la profundidad de Curie. Para nuestra zona de estudio, localizada en el oeste de la Antártida se estima una profundidad de Curie con valores de 8 a 32 km (Martos et al., 2017).

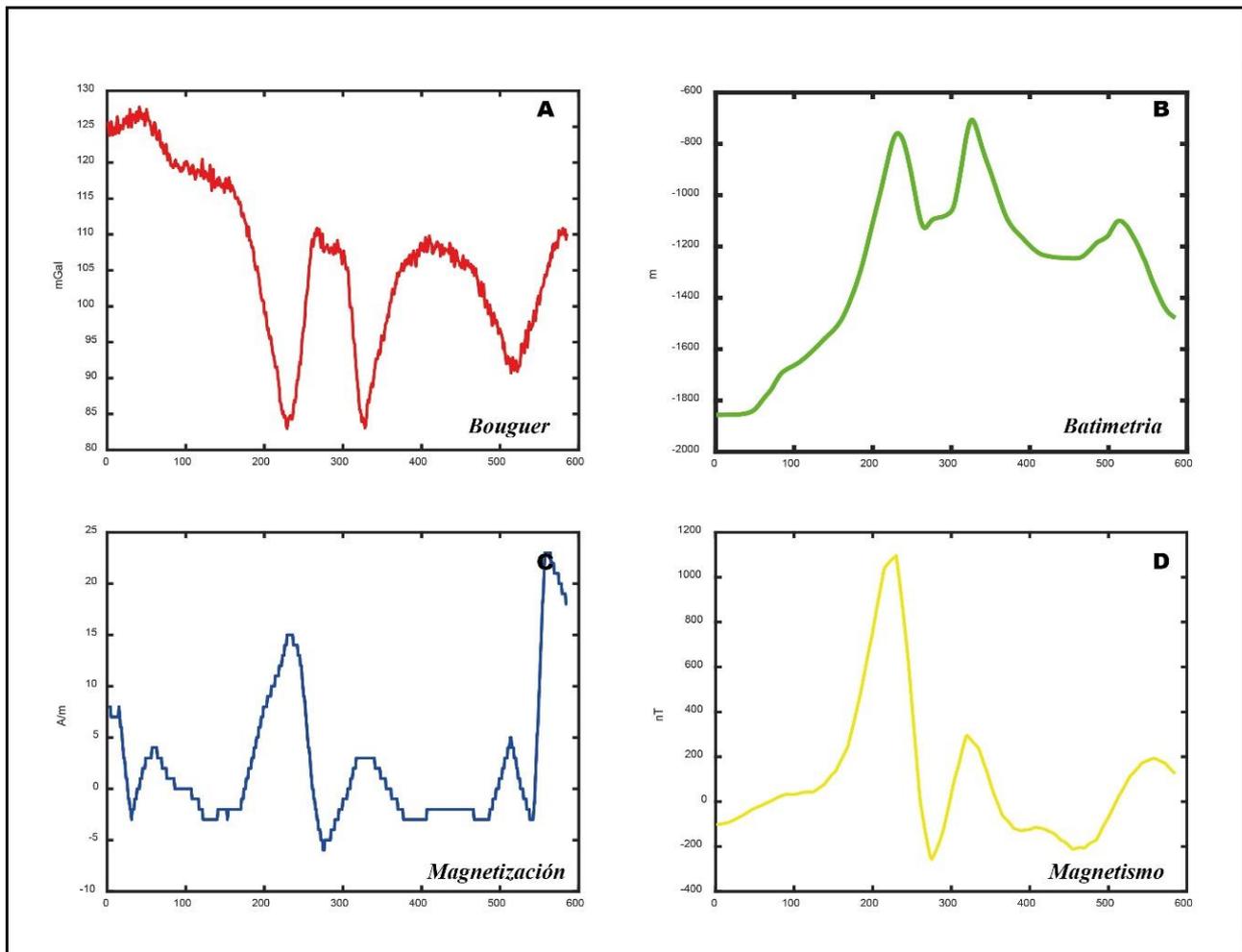


Fig. 16 Representación gráfica de diferentes parámetros obtenidos a lo largo de una traza, representada en la figura 13. A) Perfil de anomalía gravimétrica de Bouguer. B) Perfil de la batimetría. C) Perfil de magnetización. D) Perfil de la anomalía magnética.

6. CONCLUSIONES

El análisis de los datos ha sido desarrollado de manera detallada a lo largo del trabajo, en este apartado se citará únicamente un breve resumen de los mismos.

- A partir del estudio regional de la zona se ha comprobado que el estrecho de Bransfield es una cuenca de tras-arco activa que se formó por la separación de las ISS de la PA debido a la subducción de la placa de Phoenix en la fosa ISS. Las anomalías magnéticas han permitido la localización de dos máximos localizados en la PA y las ISS y un mínimo en el centro de la CB en el cual existe una serie de máximos relativos asociados a los volcanes submarinos existentes en la zona. El mapa de anomalía de Bouguer revela una asimetría en la CB. La integración de la gravedad, batimetría y magnetismo marino han permitido calcular las anomalías magnéticas y de Bouguer del volcán Orca de forma detallada.
- Los mapas de anomalías obtenidos en la estructura del volcán Orca respaldan la presencia de actividad volcánica a lo largo del eje central de la CB, pues los datos magnéticos y batimétricos se encuentran correlacionados, existiendo una relación entre la topografía submarina y unos valores de magnetismo que coinciden con los mínimos obtenidos de la anomalía de Bouguer lo que podría sugerir la existencia de la cámara magmática del volcán.

- El volcán Orca se localiza en el eje de la CB alineado con una serie de volcanes con una dirección preferente NE-SW. Presenta una magnetización de polaridad normal relacionada con la tectónica de expansión actual que existe en la CB. Debido a su forma y morfología circular podría tratarse de un volcán en etapas iniciales.

BIBLIOGRAFIA

Ashcroft, W.A., 1972. Crustal structure of the South Shetland Islands and Bransfield Strait. Scientific Reports-British Antarctic Survey 66, 1-43

Barker, D.H.N. y Austin, J.A. (1998): Rift propagation, detachment faulting, and associated magmatism in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. *Journal of geophysical Research*, 103:24.017-24.043.

Barker, D.H.N., Christeson, G.L., Austin, J.A., Dalziel, I.W.D. (2003). Backarc basin evolution and cordilleran orogenesis: Insights from new ocean-bottom seismograph refraction profiling in Bransfield Strait, Antarctica. *Geology*, 31(2):107-110.

Burton-Johnson, A., Halpin, J.A., Whittaker, F.S., Graham, S.J., Watson (2017). A new heat flux model for the Antarctic Peninsula incorporating spatially variable upper crustal radiogenic heat production. *Geophys Res*, 44, pp 5436-5446.

Catalán., Galindo-Zaldivar, J., Davila, J.M., Martos, Y.M., Maldonado, A., Gamboa, L., & Schreider, A. A. (2013). Initial stages of oceanic spreading in the Bransfield Rift from magnetic and gravity data analysis. *Tectonophysics*, 585, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.016>

Christeson, G.L., Barker, D.H.N., Austin, J.A., Dalziel, I.W.D., 2003. Deep crustal structure of Bransfield Strait: initiation of a back arc basin by rift reactivation and propagation. *Journal of Geophysical Research* 108 (B10), 2492 <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002468>.

Dietrich, R., R. Dach, G. Engelhardt, J. Ihde, W. Korth, y H.-J. Kutterer (2001), ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica-an analysis based on different individual solutions, *J. Geodesy*, 74, 756-766

Dobrin, B.M. and Savit, C.H. (1988) *Introduction to Geophysical Prospecting*. 4th Edition, McGraw-Hill

Finn, C. A, Ravat, D., (2004). *Magnetic Depth Estimates and Their Potential for Constraining Crustal Composition and Heat Flow in Antarctica*. American Geophysical Union

Galindo-Zaldivar, J., Gamboa, L., Maldonado, A., Nakao, S., Bochu, Y., (2004). Tectonic development of the Bransfield Basin and its prolongation to the South Scotia Ridge, northern Antarctic Peninsula. *Marine Geology* 206, 267-282.

Garrett, S. W., (1990) Interpretation of Reconnaissance Gravity and Aeromagnetic Surveys of the Antarctic Peninsula, *J. Geophys. Res.* 95, 6759-6777.

Giner-Robles, J.L., González- Casado, J.M., Gumiel, P., Martín, S. y García, C. (2003). A kinematic model of the Scotia plate (SW Atlantic Ocean). *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 179-191

Gràcia, E., Canals, M., Li Farrán, M., Prieto, M.J., Sorribas, J., Team, G., Baraza, J., Bart, P., Calafat, A.M., Casamor, M., De Bastist, M., Ercilla, G., Ramos, E., Sanz, J.L., Tassone, A., (1996). Morphostructure and evolution of the Central and Eastern Bransfield Basins (NW Antarctic Peninsula). *Marine Geophysical Researches* 18, 429-448.

Grad, M., Guterch, A. and Sroda, E, (1992). Upper Crustal Structure of Deception Island Area, Bransfield Strait, West Antarctica, *Ant. Sci.* 4, 469-476.

Guterch, A., Grad, M., Janik, T. and Perchuc, E., (1991). Tectonophysical Models of the Crust Between the Antarctic Peninsula and the South Shetland Trench, in Thomson, R. A., Crame, J. A. and Thomson, J. W. (eds.), *Geological evolution of Antarctica*, Cambridge, Cambridge University Press, 499-504.

Lawver, L.A., Keller, R.A., Fisk, M.R., y Strelin, J.A. (1995). Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: active extension behind a dead arc, (Taylor, B. Ed.). *Back arc basins: tectonic and magmatism*. Amsterdam, Plenum Press: 315- 342.

Lawver, L.A., Sloan, B.J., Barker, D.H.N., Ghidella, M., Von Herzen, R.P., Keller, R.A., Klinkhammer, G.P. y Chin, C.S. (1996). Distributed, active extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: evidence from multibeam bathymetry. *Geol. Soc. Amer. Today*, 6-11:1-6.

Maldonado, A., Larter-R.D. y Aldaya, F. (1994). Forearc tectonic evolution of the South Shetland margin, Antarctic Peninsula. *Tectonics*, 13,6:1345-1370.

Martos, Y. M., 2010. Estudio geofísico y geodinámico de la Isla Decepción (Antártida) y su entorno próximo. *Boletín ROA 2/2010*, Nipo 076-10-146-9. ISSN: 1131-5040, Dep leg CA 469-78.

Martos, Y.M., Catalán, M., Jordan, T.A., Golynsky, A., Golynsky, D., Eagles, G. & Vaughan, D.G. 2017 Heat flux distribution of Antarctica unveiled. *Geophys. Res. Lett.* 44 (22), 11417–11426..

Nagihara, S. and Lawyer, L. A., (1989). Heat Flow Measurements in the King George Basin, Bransfield Basin, *Ant. J. Sci.* 23, 123 125.

Pelayo, A. M. and Wiens, D. A., (1989). Seismotectonics and Relative Plate Motions in the Scotia Sea Region, *J. Geophys. Res.* 94, 7293-7320.

Roach, R J., (1978). The Nature of Back-Arc Extension in Bransfield Strait, *Geophys. J Res. Astron. Soc.* 53, 165.

Rodrigo, Cristian, Blamey, Jenny M., Huhn, Oliver, & Provost, Christine. (2018). Is there an active hydrothermal flux from the Orca seamount in the Bransfield Strait, Antarctica?. *Andean geology*, 45(3), 344-356. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeov45n3-3086>

Sabaka, T. J., N. Olsen, y M. E. Purucker, (2004). Extending comprehensive models of the Earth's magnetic field with Oersted and Champ data: *Geophysical Journal International*, 159, 521–547.

Tanaka, Y. (1993). Eruption mechanism as inferred from geomagnetic changes with special attention to the 1989-1990 activity of Aso Volcano. *J. Volcanology and Geothermal Research*, 56: 319-338

Ha sido utiliza la siguiente página web para la obtención de alguna figura:

<https://www.seequent.com/>

