

Universidad de

Cádiz

**METODOLOGÍA DE LEVANTAMIENTOS
HIDROGRÁFICOS Y GEOFÍSICOS PARA
BÚSQUEDA E IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS
DE INTERÉS EN EL FONDO DEL MAR.
APLICACIÓN AL CARIBE COLOMBIANO.**

TESIS DOCTORAL

Autor:

Karem C. Oviedo Prada

Directores:

***Dr. Bismarck Jigena Antelo
Dr. Juan José Muñoz Pérez***

Junio de 2024



TESIS DOCTORAL

Metodología de levantamientos hidrográficos y geofísicos para búsqueda e identificación de elementos de interés en el fondo del mar. Aplicación al Caribe colombiano.

Autora: Karem Cristina Oviedo Prada

Directores de la tesis: Dr. Bismarck Jigena Antelo.

Dr. Juan José Muñoz Pérez

Cádiz, 2024

Dedicatoria

A mi tía Judith, a quien prometí con amor culminar este proceso cuando aún estaba entre nosotros, y a mi abuelito Aldemar, que, aunque ya no nos acompañan en este plano terrenal, pero que dondequiera que esté, estoy segura de que también comparten el orgullo de este logro y este momento especial.

A mi querida Mamá Yolanda y a mi abuela María, les dedico estas palabras llenas de amor, cariño y profundo agradecimiento. Reconozco que este logro también es el fruto de su incansable labor, marcada por el amor incondicional, las valiosas enseñanzas, el tiempo dedicado y las constantes oraciones para que la protección divina siempre me acompañara.

Agradecimientos

Mi familia que, desde los primeros días de mi existencia, ha sido mi sostén incondicional. A cada uno de ustedes, les agradezco por ser mi soporte constante a lo largo de este viaje.

A Andrés Mauricio, por su capacidad para animarme incluso en los momentos más desafiantes, estoy muy agradecida por tener a alguien tan positivo y solidario a mi lado.

Este éxito no solo es mío, sino también de aquellos que han contribuido con su amor y apoyo inquebrantable. Que este logro sea un testimonio del valor de la familia y de la promesa cumplida a quienes ya no están físicamente, pero cuyo legado y amor perduran en cada paso que doy.

Agradezco a todos, (mis tíos, primos) por formar parte de este capítulo en mi vida y por ser la fuente constante de inspiración. ¡Que la gratitud y el amor sigan fortaleciendo nuestros lazos familiares en los días venideros!

A mis profesores y Directores de Tesis, los Doctores Bismarck Jigena Antelo y Juan José Muñoz Pérez, les agradezco mucho por su apoyo continuo.

A mis compañeros y amigos en el CIOH y en Kongsberg México, mi más sincero agradecimiento por el aliento constante y compañía en este camino de navegaciones, viajes y experiencias que han fortalecido mi carácter y conocimientos.

D. BISMARCK JIGENA ANTELO, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y Construcciones Navales y D. JUAN JOSE MUÑOZ PEREZ, Catedrático de Universidad del Departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Cádiz,

HACEN CONSTAR:

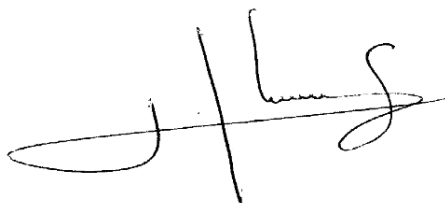
Que el trabajo recogido en la presente Memoria de Tesis Doctoral, titulada *“Metodología de levantamientos hidrográficos y geofísicos para búsqueda e identificación de elementos de interés en el fondo del mar. Aplicación al Caribe colombiano”*, presentada por la Ing. Dña. Karem Cristina Oviedo Prada ha sido realizado bajo nuestra dirección.

Considerando que esta Memoria resume su trabajo de Tesis Doctoral y que reúne todos los requisitos legales, autorizamos su presentación y defensa para optar al grado de Doctor en Ciencias y Tecnologías Marinas por la Universidad de Cádiz.

Para que así conste a los efectos oportunos firmamos la presente en Puerto Real, a 8 de Mayo de 2024.



Fdo. Dr. D. Bismarck Jigena Antelo



Fdo. Dr. D. Juan José Muñoz Pérez

La presente Tesis Doctoral ha sido posible gracias al apoyo y la financiación de las siguientes instituciones y proyectos de investigación:

Proyecto de investigación 'Geomagnetismo Marino', a cargo de la Dirección General Marítima (DIMAR) de Colombia. También agradecemos a la Dirección de la DIMAR y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), por su apoyo en los trabajos de campo y la autorización para el uso de datos hidrográficos y oceanográficos.

Los autores agradecen a la tripulación del Buque de Investigación Oceanográfica ARC Roncador y al personal Hidrográfico del CIOH por su colaboración durante las campañas de prospección y procesado de datos.

Las APC (Article Processing Charge) de las publicaciones de esta Tesis fueron financiadas por la Universidad de Cádiz (UCA) y por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Costas RNM912 de la UCA.

La estancia de investigación de la autora de esta Tesis Doctoral, realizada en Kongsberg Maritime Center (Veracruz, México) fue financiada por la Universidad de Cádiz, a través del Plan Propio de la UCA, de Ayudas para Movilidad del Personal Investigador para Estancias en Centros Extranjeros de Prestigio, que se gestiona a través de la Escuela Internacional de Doctorado en Estudios del Mar (EIDEMAR).

ÍNDICE

TITULO DE LA TESIS DOCTORAL:

Metodología de levantamientos hidrográficos y geofísicos para búsqueda e identificación de elementos de interés en el fondo del mar. Aplicación al Caribe colombiano.

Contenido

Capítulo 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Resumen.....	6
1.3 Planteamiento del problema.....	8
1.4 Objetivos de la Tesis.....	8
1.5 Objetivo general.....	8
1.6 Objetivos específicos.....	9
1.7 Delimitación y Alcance.....	9
1.8 Estructura de la Memoria.....	10
Capítulo 2.....	11
2. MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES.....	11
2.1 Generalidades, Conceptos Fundamentales y Unidades.....	11
2.2 Campo Magnético Total.....	13
2.3 Campo Geomagnético Principal y Modelos.....	15
2.4 Modelos IGRF-12 y WMM2015.0.....	15
2.5 Variaciones Temporales del Campo Magnético.....	16
2.6 Cálculo Teórico de las Anomalías Magnéticas.....	17
2.7 Otros Conceptos Teóricos relacionados con el Magnetismo para tener en cuenta.....	19
Capítulo 3.....	21
3. DATOS Y METODOLOGÍA.....	21
3.1 Zona de estudio.....	21
3.2 FASE 1. Planificación de la campaña de adquisición.....	24
3.2.1.1 Definición líneas de levantamiento.....	26

3.3	FASE 2. Adquisición de datos	27
3.3.1.1	Levantamiento batimétrico.....	28
3.3.1.2	Levantamiento geomagnético.....	28
3.4	Componentes.....	29
3.5	Conexiones.....	32
3.5.1	Configuración tipo Adicional para aguas someras.....	33
3.6	FASE 3. Oficina y procesamiento de datos.....	33
Capítulo 4.....		39
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1	Geoformas Obtenidas del Levantamiento Batimétrico.	39
4.2	Anomalías Magnéticas	42
4.3	Análisis Espectral.....	51
4.4	Deconvolución de Euler (DDE)	52
4.5	Perfiles.....	54
4.6	Datos de baja resolución y libres NOAA.....	56
4.7	GeoMapApp de baja resolución y datos libres	57
4.8	Otros autores	58
4.9	Publicaciones resultado de la Investigación	60
4.9.1	Artículos Científicos.	60
4.9.2	Comunicaciones enviadas a congresos y/o eventos científicos.	62
Capítulo 5.....		65
5.	CONSIDERACIONES PARA FUTURAS PUBLICACIONES	65
5.1	Magnetometría Local (Puntual para Naufragios).....	65
5.2	Buscaminas USS Peacock AM46.....	66
5.3	Salmedina.....	73
5.3.1	Sector 1	76
5.3.2	Sector 2	79
Capítulo 6.....		83
6.	CONCLUSIONES	83
6.1	Conclusiones	83
6.2	Futuras líneas de Investigación	84
Capítulo 7.....		85
7	Referencias Bibliográficas.....	85

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Imagen que muestra las líneas del campo magnético de un imán de barra, producidas por limaduras de hierro sobre papel	12
Figura 2. Representación gráfica del campo magnético de la tierra de forma simplificada como el campo magnético de un imán permanente común, con el polo negativo cercano al polo norte geográfico y con el polo positivo cercano al polo sur geográfico, sus líneas del campo magnético (o el ángulo respecto a la horizontal)	14
Figura 3. A: Localización de la zona de estudio. Se muestra un mapa en relieve que muestra la ubicación del área de estudio y las principales características tectónicas del Caribe. B: Área de estudio ampliada, ubicada en el noroeste de Colombia, el polígono rojo muestra el área específica donde se realizó el levantamiento.	22
Figura 4. Instalación de la estación base RBS Geométrica G-862.	25
Figura 5. Planificación de las líneas para el levantamiento geomagnético en el área de estudio.	26
Figura 6. Ajuste geométrico de las líneas de levantamiento para la adquisición de datos geomagnéticos en el área de estudio.	29
Figura 7. Configuración del equipamiento para la adquisición de datos magnéticos.....	30
Figura 8. Visualización de información geomagnética en el software MagLog en tiempo real.....	31
Figura 9. Sistema de remolque por popa del equipo de magnetometría.	32
Figura 10. Diagrama de Sistema de remolque por popa del equipo de magnetometría.....	33
Figura 11. Identificación de geoformas del relieve en la zona de estudio en el Mar Caribe occidental. El área es ilustrada por la batimetría en color y muestra las principales características geomorfológicas señaladas con una línea de color blanco que representan la máxima profundidad para cada geoforma. (para la Depresión San Andrés 1800 metros, para el Espolón Albuquerque y el Espolón Wayuu 600 metros, para la Depresión Albuquerque 1100 metros y para la Depresión Nutibara 1700 metros, las líneas negras representan los perfiles batimétricos que se observan en la figura 7.	39
Figura 12. Perfiles batimétricos donde se ilustran las principales geoformas de la zona de estudio A) Depresión Providencia, B) Depresión Albuquerque, C) Depresión Nutibara, D) Espolón Albuquerque, E) Espolón Wayuu. Ver Figura 2 para la localización del perfil.....	40
Figura 13. Superficie geomagnética del campo total con correcciones.	42
Figura 14. Gráfico de líneas de seguimiento de cruceros oceanográficos que adquirieron datos geomagnéticos en 1970 y 1971.....	43
Figura 15. Superficie geomagnética del campo total, correspondiente a datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).	45
Figura 16. Superficies geomagnéticas del campo total. (A) Campo magnético examinado. (B) Campo magnético de datos descargados de la NOAA.....	46
Figura 17. Mapa de reducción de polos magnéticos de la zona de estudio. Superficie magnética que refleja el procesamiento de la corrección de posicionamiento por efectos latitudinales.	48

Figura 18. Mapa magnético de la señal analítica del campo residual. El mapa refleja el procesamiento de centralización y definición de bordes de anomalía residual.	49
Figura 19. Superficie magnética que refleja el procesamiento de la derivada z parcial del campo magnético total. Se muestran la batimetría (gris), las fallas superficiales (negro) y la malla resultante de las derivadas del campo residual.	50
Figura 20. Mapa que muestra la separación regional de las fuentes más profundas. El Perfil 1 y el Perfil 2 se muestran en la Figura 24, que sirven para comparar el comportamiento del relieve submarino con el campo regional mostrado en esta figura.	51
Figura 21. Visualización de la longitud de onda de corte ($K=0,14$). Ventana que muestra el cambio de pendiente. Se interpreta como segmentos con rangos de longitud de onda que representan la profundidad de las fuentes. Arriba: Muestra la intensidad de potencia generando un espectro de potencia promediado radialmente a partir de una imagen obtenida por Transformada Rápida de Fourier (superficie de separación residual). Abajo: Estimación de la profundidad de la fuente en kilómetros a partir del espectro de potencia promediado radialmente de las anomalías.	52
Figura 22. Visualización del mapa de Señal Analítica de la Deconvolución de Euler	53
Figura 23. Visualización de la estimación de profundidad de fuentes generadoras de anomalías, realizado por el método de Deconvolución de Euler (DdE), sobre el mapa de Señal Analítica de la figura 5 en escala de grises.	54
Figura 24. Correlaciones de los perfiles 1 y 2 entre los datos batimétricos y magnéticos obtenidos a partir de la superficie del campo residual y la batimetría.....	55
Figura 25. Perfil de comparación de batimetría y magnetometría 3. Perfiles de correlación entre los datos batimétricos y magnéticos obtenidos a partir de los datos libres en GeomapApp.	58
Figura 26. Líneas planeadas de adquisición geomagnética sobre el USS Paacock AM46.	67
Figura 27. Imagen batimétrica del USS Peacock AM-46.....	68
Figura 28. A: Embarcación tipo Pilot en donde se llevó a cabo el levantamiento geomagnético. B: Magnetómetro marino G-882 utilizado para el levantamiento de datos magnéticos en la Bahía de Cartagena de Indias.	69
Figura 29. Mapa de anomalías magnética de datos brutos del USS Pacock AM-46	70
Figura 30. Línea 8 del levantamiento geomagnético del USS Pacock AM-46.	71
Figura 31. Línea 9 del levantamiento geomagnético del USS Pacock AM-46.	72
Figura 32. Mapa de anomalías magnética de señal analítica sobrepuesto a la batimetría de fondo del USS Paccok AM-46.....	73
Figura 33. Ubicación del levantamiento geomagnético local.....	74
Figura 34. La lancha utilizada, tipo soundermax. Winche portátil de 300m.....	75
Figura 35. Líneas del levantamiento geomagnético local.	75
Figura 36. Levantamiento magnetométrico sobre bajo Salmedina.	76
Figura 37. Anomalía magnética de línea 5 de levantamiento.	77
Figura 38. Anomalía magnética de línea 3 de levantamiento.	77

Figura 39. Anomalía magnética de línea 5 de levantamiento correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.	78
Figura 40. Imágenes del sector 1, correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.	79
Figura 41. Anomalía magnética de línea 18 de levantamiento.	80
Figura 42. Anomalía magnética de línea 18 de levantamiento.	80
Figura 43. Imágenes del sector 2, correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.	81

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas que delimitan el área	22
Tabla 2. Estimación de la duración del estudio en días a partir de millas náuticas (NM) lineales.....	27
Tabla 3. Tabla de coordenadas de polígono de levantamiento en USS Paacock AM46	67

TESIS DOCTORAL

Doctorando: Karem Cristina Oviedo Prada

Directores: Dr. Bismarck Jigena Antelo

Dr. Juan José Muñoz

Puerto Real, 2024

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En el método magnético, la magnitud medida es el Campo Geomagnético, el cual está estrechamente relacionado con la magnetización del entorno. Esta magnetización surge en la mayoría de los materiales cuando se les aplica un campo magnético. Como mencionan Telford et al. (1990), este campo geomagnético es fundamental para el método geomagnético, que busca investigar la geología del subsuelo a partir de las variaciones en este campo magnético. El objetivo del método geomagnético es precisamente estudiar las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes para inferir la geología del subsuelo. Como señala Ariffin (1879), estas variaciones en el campo magnético resultan de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Aunque no todos los minerales presentes en las rocas son magnéticos, ciertos tipos de rocas contienen suficientes minerales magnéticos, como el hierro y la magnetita, para generar anomalías magnéticas significativas.

En resumen, el método geomagnético se basa en la detección de estas anomalías magnéticas para inferir la presencia y características de estructuras geológicas subyacentes, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la exploración de minerales y la prospección geofísica. La influencia del campo magnético total puede medirse en cualquier lugar de la tierra, con una dirección e intensidad determinadas, sujeto a variaciones periódicas y perturbaciones, cuya magnitud en la superficie del planeta puede variar de un punto a otro de 25.000 a 65.000 nT (Ramírez, 2014).

Cuando un material magnético se coloca en un campo magnético, el material se magnetiza, y el campo

externo de magnetización se refuerza con el campo magnético inducido en el material. Esto se conoce como magnetización inducida, y se basa en la susceptibilidad magnética de los materiales (entendida como el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético), y la magnitud y dirección del campo magnético (Hinze et al., 2013).

Los principales campos potenciales de la Tierra, aplicados en Geofísica, son los campos gravitatorio y magnético. El objetivo de su interpretación es optimizar el conocimiento de la configuración y composición de los cuerpos rocosos del subsuelo, que dan lugar a contrastes en propiedades físicas como la densidad y la susceptibilidad magnética. El conocimiento de la distribución de cualquiera de estas propiedades en la superficie puede proporcionar información valiosa sobre la geología del subsuelo (Graterol, 2005).

Los métodos magnéticos en aplicaciones geológicas comenzaron a desarrollarse en 1630 en Suecia, centrados en la prospección de mineral de hierro (Hanna, 1990). En la industria petrolera se ha utilizado como método de reconocimiento para estudios regionales desde principios del siglo pasado (López-Loera et al., 2013). Las anomalías magnéticas marinas son observaciones utilizadas para investigar la extensión del fondo marino y la transición entre la corteza continental en márgenes pasivos y zonas con alto contenido en hierro (Granot & Dymment, 2019).

Los métodos de teoría del potencial (por ejemplo, (Blakely et al., 2002; Telford W.M et al., 1990) utilizados en la interpretación de estudios geofísicos aplicados han permitido que la magnetometría sea una fuente de información para estudiar zonas de fallas y sus posibles reactivaciones (Blakely et al., 2002). También se ha utilizado para evaluar las propiedades magnéticas de los volcanes antes y después de las erupciones (Finn & Williams, 1987) para establecer la existencia de cinturones volcánico-magnéticos (Honkura et al., 1991), e incluso para estudiar la relación con la geodesia y la topografía (Honkura et al., 1991; Flanagan & Williams, 1982; Jigena et al., 2016)

Los métodos magnéticos aerotransportados han permitido delinear la extensión lateral de estructuras como grietas, cimas de calderas y bocas de cráteres (Urrutia & Del Castillo, 1977) También se han utilizado para localizar cuerpos intrusivos en el subsuelo que no tienen manifestaciones en superficie (Finn & Williams, 1987), procesos de serpentinización fuerte en el manto superior en el sur de México (Hildenbrand et al., 1993) o para delimitar cráteres de impacto (Manea & Manea, 2008)

Además, el geomagnetismo es un método de prospección geofísica, aplicable a la industria petrolera, así

como a la exploración minera y de artefactos arqueológicos (Schmidt et al., 2007). La magnetometría es una herramienta ampliamente utilizada en la exploración de minerales debido a su eficiencia y costo relativamente bajo. Este método se destaca por su capacidad para detectar minerales magnéticos, como la magnetita y otros minerales ferromagnéticos, lo que lo convierte en una técnica invaluable para la prospección directa de depósitos minerales.

La principal ventaja de la magnetometría radica en su capacidad para detectar variaciones en el campo magnético terrestre, que son causadas por la presencia de cuerpos rocosos magnetizados en la superficie o en el subsuelo cercano. Estas variaciones pueden indicar la presencia de depósitos minerales y proporcionar pistas valiosas para su ubicación y caracterización.

Este método se utiliza a escalas local y regional en prospecciones geofísicas, lo que significa que puede aplicarse tanto a estudios detallados de áreas específicas como a evaluaciones más amplias de regiones geográficas enteras. Su rapidez y relativo bajo costo lo hacen particularmente atractivo para empresas mineras y exploradores que buscan identificar y evaluar depósitos minerales con eficiencia.

Las referencias citadas, como los trabajos de Orrego (2017) y Tchernychev (2009), respaldan la importancia y la eficacia de la magnetometría en la exploración de minerales, proporcionando evidencia adicional de su utilidad y aplicación en este campo. El aumento de la actividad geofísica marina en los últimos años ha proporcionado datos esenciales para evaluar las teorías sobre el origen de los océanos y los continentes. datos esenciales para evaluar las teorías sobre el origen de océanos y continentes. De los distintos métodos utilizados para explorar el fondo marino y el manto subyacente, el campo magnético y sus mediciones han demostrado ser una de las herramientas más poderosas para descubrir y delinear patrones estructurales y geológicos.

Según Ewing et al. (1960), antes de la Segunda Guerra Mundial, casi todas las observaciones magnéticas marinas habían sido realizadas por el buque de investigación "Carnegie" (1909-1929), construido especialmente para trabajar a lo largo de líneas muy espaciadas en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. Después de la guerra el magnetómetro fluxgate, desarrollado originalmente como instrumento aéreo para detectar submarinos, fue adaptado para aplicaciones marinas por el Geological Research Lamont. Estas fueron las primeras mediciones realizadas con un magnetómetro remolcado por un barco. Más tarde, para trabajos en el ámbito marítimo, el magnetómetro fluxgate fue sustituido por el magnetómetro de protones, que tiene las ventajas de medir el campo absoluto y no orientación de la cabeza (Campbell, 2003).

Varias teorías y estudios magnéticos del Mar Caribe con diferentes hipótesis, como Driscoll & Diebold (Neal W. Driscoll & John B. Diebold, 1998) denotan la presencia de una fractura en la placa que podría ser evidencia de dos placas en lugar de una. Catalán & Martos (2022), sugieren la presencia de cuerpos anómalos locales que podrían correlacionarse con estructuras volcánicas, lo que genera cierta inquietud sobre zonas más concretas.

Los primeros datos geomagnéticos en la zona de estudio se obtuvieron a principios de la década de 1970. En aquella época se realizaron dos cruceros de investigación, liderados por la National Oceanic and Atmospheric Administration, (NOAA) cuyo objetivo era obtener los primeros datos geomagnéticos marinos en la zona. En las dos líneas de prospección se obtuvieron datos geofísicos que contenían información sísmica, de sonar de barrido lateral y magnetométrica (Oviedo et al., 2020). En el occidente del Mar Caribe colombiano se han realizado descripciones geológicas por muchos autores (Geister, 1992; Geister & Díaz, 2002) quienes describen el área como una provincia volcánica con formaciones coralinas, islas, bancos y atolones. Entre estas formaciones se encuentran la Isla de San Andrés, las Islas de los Cayos Albuquerque y la Isla de los Cayos Este-Sureste.

La Dirección General Marítima (DIMAR) es la entidad encargada del manejo y control del espacio marítimo. El proyecto "Geomagnetismo Marino" de la DIMAR, iniciado en 2015 en Cartagena de Indias, Mar Caribe colombiano, tenía como objetivo principal recuperar la capacidad de investigación en esta área utilizando el magnetómetro marino G-882. Una de las actividades clave para lograr este objetivo fue la capacitación en el manejo del sensor magnético y la adquisición de datos. Para ello, se desarrolló un documento en el año 2015 por parte de la DIMAR y otros colaboradores, que recopiló una amplia base de datos y manuales relevantes.

Este documento proporcionó la base necesaria para la elaboración de la metodología de trabajo geofísico que se implementaría en el proyecto. La metodología elaborada probablemente incluyó pasos detallados sobre cómo operar el magnetómetro marino, cómo recolectar datos de manera efectiva y precisa, así como posiblemente pautas sobre el análisis de los datos obtenidos.

El hecho de que se haya desarrollado una metodología específica indica un enfoque estructurado y planificado para llevar a cabo las investigaciones en geomagnetismo marino, lo que sugiere un compromiso serio por parte de la DIMAR para recuperar y fortalecer esta capacidad de investigación.

Asimismo, los datos magnetométricos y batimétricos multihaz permiten construir una historia del

movimiento de las placas durante los últimos millones de años (Armijo Mella, 2019). En este trabajo se presenta la modelización de anomalías potenciales de campo en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (ASPSC), a partir de los resultados de los sondeos magnéticos obtenidos por DIMAR para realizar interpretaciones regionales de la estructura del basamento de la zona de estudio.

La necesidad de proponer una metodología de trabajo era apremiante, ya que no se tenía registro en Colombia de otra entidad pública o privada que realizara este tipo de investigaciones científicas. Por lo tanto, los esfuerzos del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) se orientaron a la estandarización de los lineamientos y los parámetros requeridos para la optimización del método geomagnético marino.

El logro de una metodología que ofrece alta calidad en la recolección y procesamiento de datos geomagnéticos marinos en el Caribe Colombiano es un hito significativo resultado de los esfuerzos y pruebas de campo realizados. Este desarrollo no solo representa un avance en la capacidad de investigación en geomagnetismo marino, sino que también tiene implicaciones importantes para la Armada de la República de Colombia (ARC) y para la investigación oceanográfica en general.

La metodología desarrollada proporciona una guía secuencial para la planificación y adquisición de información geomagnética en ambientes marinos, tanto profundos como someros, en el territorio colombiano. Es especialmente notable que esta metodología pueda ser implementada en cualquier tipo de embarcación, lo que amplía su accesibilidad y utilidad en diversos contextos de investigación.

El hecho de que esta metodología haya sido diseñada específicamente para los buques de investigación oceanográfica de la ARC destaca el compromiso y la colaboración entre diferentes instituciones para avanzar en la investigación científica y la gestión marina en Colombia. Además, al ser una herramienta eficaz y eficiente, esta guía proporciona un recurso valioso para la investigación geofísica al servicio de la nación, promoviendo un mejor entendimiento del ambiente marino y sus procesos asociados. Para este trabajo se realizó una recopilación bibliográfica teniendo en cuenta aspectos como la verificación de sensores magnéticos y operadores que pueden ser potentes fuentes de ruido magnético. (Milsom, 2013). Un aspecto fundamental en el desarrollo del método fue determinar la distancia a la que debe remolcarse el sensor magnetométrico para reducir los efectos magnéticos del buque. Por último, también se consideró el espaciado lateral óptimo entre las líneas que está directamente relacionada con la profundidad del aguay

objetivo de búsqueda (Schmidt et al., 2007)

El objetivo principal de este estudio es probar la implementación del método geomagnético marino desarrollado por el Servicio Hidrográfico Nacional de Colombia. Este método se fundamenta en la falta de información sobre firmas magnéticas del complejo de islas, atolones y arrecifes que puedan complementar las descripciones fisiográficas realizadas por los autores antes mencionados, así mismo se pretende demostrar la utilidad de las prospecciones de alta resolución para detectar anomalías magnéticas, mejorar la información sobre el relieve del fondo marino y las estructuras depositadas en superficie. Para ello, se muestra la metodología diseñada y los resultados de su aplicación a una zona del Caribe colombiano

La primera parte de Este trabajo de manera regional se basa en la suposición de que existe una clara correlación entre las elevaciones del campo magnético del punto de medida para un medio magnético relativamente homogéneo. En el caso de la magnetización directa, los máximos del campo corresponden a las crestas del relieve "magnético", mientras que los mínimos corresponden a los valles (Eppelbaum, 2019)

Nuestro estudio contribuye a proporcionar una comprensión fundamental para la integración de las técnicas de levantamientos hidrográficos y magnéticos en aplicaciones para recopilar datos para la exploración de petróleo y gas y estudios morfológicos y arqueológicos del fondo marino, de acuerdo con otros estudios anteriores (Fujiwara et al., 1995; Nakanishi, 2011; Regi et al., 2022)

1.2 Resumen

En los últimos años, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (dependiente de la Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR) ha realizado importantes esfuerzos para avanzar en la investigación en el campo de la geofísica marina, en particular, las técnicas de geomagnetismo, perfilado del sub fondo y sonar de barrido lateral, siendo el primero el más desarrollado en la actualidad. Se presenta un método para la adquisición de datos geomagnéticos en ambientes marinos, tal como lo utiliza la DIMAR en el territorio marítimo colombiano. El desarrollo del método geomagnético no solo ofrece la oportunidad para avanzar en el conocimiento científico básico, pero también es de gran importancia en el apoyo a cuestiones de soberanía nacional. Entre otras aplicaciones, los usos más representativos del

método geomagnético son la localización de tuberías y placas metálicas, detección de municiones enterradas, identificación de sitios de interés arqueológico, y la identificación y caracterización de estructuras geológicas.

Este trabajo presenta los resultados de un levantamiento hidrográfico y geofísico en el área localizada al sur del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (ASAPSC), Mar Caribe colombiano. Durante 2017 y 2018 Los datos hidrográficos fueron procesados y filtrados con los estándares de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y los datos geomagnéticos fueron procesados, corregidos y filtrados para mejorar las interpretaciones. Los resultados han permitido caracterizar el relieve submarino y analizar las anomalías geomagnéticas de la zona e identificar diferentes formas de relieve que muestran un origen volcánico. En cuanto al trabajo geomagnético, un análisis espectral de las anomalías reveló cuerpos altamente magnéticos en aguas profundas y anomalías magnéticas residuales fuertemente relacionadas con la morfología del fondo marino. Además, también se detectó la presencia de altos magnéticos asociados a altos del basamento y a conos volcánicos. Un análisis espectral complementario mostró que las fuentes magnéticas más superficiales se encuentran en los primeros 500 m, mientras que las más profundas se sitúan entre los 4 y 5 km de profundidad. Los datos geomagnéticos también se validaron mediante un análisis de deconvolución de Euler, en el que se confirmaron estas anomalías magnéticas. En conclusión, se confirmó una relación directa entre las anomalías magnéticas y la batimetría del fondo marino, lo que refuerza la teoría del origen volcánico de estas islas.

Como resultado de las pruebas del método, se comparó con los datos del estudio obtenidos del repositorio de datos magnéticos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y llevado a cabo en la misma área de estudio. A pesar del largo intervalo de tiempo entre ambas encuestas, casi 50 años, no se observaron diferencias significativas en cuanto a las variables analizadas. Finalmente, los resultados muestran diferencias insignificantes entre los datos magnéticos obtenidos para los años 1970 y 2018 para todas las variables medidas, como la inclinación, la declinación y el campo magnético total. Estas diferencias pueden ser atribuibles a un componente geológico o también a los métodos de adquisición y procesamiento utilizados en los años 1970.

1.3 Planteamiento del problema

Colombia, como potencia bioceánica, está comprometida con la defensa y preservación de su territorio marítimo, empleando diversas estrategias para ejercer soberanía. Una de estas estrategias clave es la base científica, que se considera esencial para comprender a fondo y el sub fondo marino del territorio oceánico colombiano. La Armada y la Dirección General Marítima de Colombia están enfocadas en implementar metodologías que impulsen el desarrollo científico y la comprensión del territorio marítimo. Este enfoque no solo contribuye al avance científico, sino que también busca limitar cualquier intento expansionista de países vecinos basándose únicamente en proyectos científicos que permitan el conocimiento y la apropiación del territorio.

En 2019 y 2020, se inscribió un proyecto de la implementación del método geomagnético en las islas colombianas del Caribe. en búsqueda de caracterizar y conocer el sub fondo marino poniendo a prueba la metodología desarrollada y probada en la búsqueda y prospección de naufragios de manera local. Además de identificar y realizar prospecciones de geomorfología y anomalías magnéticas también se busca la basey defensa contra las pretensiones expansionistas, de los países vecinos.

Se asume que la geomorfología del fondo marino y las anomalías subsuperficiales son extensiones integrales del territorio colombiano. Aunque mínimos porcentajes de dichas geomorfologías se reflejen directamente en la superficie, siguen siendo parte de gigantescas extensiones de terreno en profundidad.

1.4 Objetivos de la Tesis

Utilización de sensores remotos para la búsqueda e identificación de anomalías magnéticas en ambientes subacuáticos en el Caribe colombiano.

1.5 Objetivo general

Caracterizar la naturaleza magnética de los sitios de interés local y regional para aplicaciones científicas, culturales y de ingeniería en el caribe colombiano, con base en el análisis e interpretaciones derivadas de

la obtención de datos hidrográficos y geofísicos adquiridos mediante sensores remotos como el magnetómetro, y ecosonda multihaz; con la finalidad de establecer protocolos de búsqueda y prospección subacuática.

1.6 Objetivos específicos

1. Proponer un protocolo de búsqueda y prospección por medio del método geofísico de magnetometría, a través del establecimiento del análisis de anomalías magnéticas que permitan la identificación de fuentes en profundidad y objetos náufragos en superficie, en el mar caribe colombiano.
2. Integrar fuentes de información hidrográfica y geofísica, que permitan identificar áreas con alto potencial geomorfológico y arqueológico, por medio de la espacialización y cartografía de sitios de interés.
3. Aplicación de la metodología en la Bahía de Cartagena de Indias de manera local y validación de las respuestas obtenidas mediante inspección directa (Buzos) o filmación subacuática de alta resolución.

1.7 Delimitación y Alcance

Este trabajo busca estandarizar la metodología de adquisición, procesamiento e interpretación de los datos magnéticos marinos aplicados a la búsqueda prospección e identificación de anomalías alojadas en el fondo y sub fondo marino. Para realizar la validación de la metodología se realiza una un levantamiento de tipo regional en búsqueda de anomalías de dimensiones geológicas y otro de tipo local en búsqueda de anomalías locales de carácter arqueológico.

El alcance temporal de la tesis está definido por la fecha de la toma de datos para muestras de verificaciones preliminares desde 2018 hasta 2022, posteriormente también se establecen los tiempos de trabajo de procesamiento de datos en oficinas desde 2019 has 2023.

1.8 Estructura de la Memoria.

En este apartado, se realiza una breve presentación de la Tesis Doctoral, con la finalidad de brindar una visión general de la organización de la memoria de investigación.

En el Capítulo 1 se presenta un resumen de este proyecto, a continuación, se hace una síntesis de la parte metodológica, explicando el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y la delimitación y alcance del trabajo de investigación, finalizando con una breve descripción de cada capítulo.

En el Capítulo 2, se exponen los antecedentes del trabajo y se hace una descripción teórica utilizada en función de los datos levantados y procesados que posteriormente se presentan.

El Capítulo 3, se presentan las características locales del campo Magnético en Colombia, específicamente en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (SAPSC). El estudio utiliza un método geomagnético marino desarrollado por el Servicio Hidrográfico Nacional de Colombia e identifica varias estructuras principales, incluyendo la isla de San Andrés, el Cayos Alburquerque y el Cayo Este-Sureste. El estudio también explora el potencial para el desarrollo de un nuevo método geomagnético para el estudio del campo magnético.

En el Capítulo 4, muestra los resultados obtenidos al aplicar la metodología de levantamiento y procesamiento de información geomagnética, obteniendo interesantes resultados en donde se presentan estimaciones de ubicación y profundidades de anomalías presentes en la zona, corroborados por varios métodos de procesamiento.

En el Capítulo 5, se muestran los resultados de la aplicación del método para entornos locales correspondientes a sitios arqueológicos submarinos, que pueden ser parte del patrimonio cultural sumergido de la nación colombiana.

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES

2.1 Generalidades, Conceptos Fundamentales y Unidades

El magnetismo pertenece a las fuerzas que poseen un potencial (campos de potencial), donde en cada punto se tiene un valor finito y determinado, en función de la posición de cada punto dentro de dicho campo magnético.

Las unidades del campo magnético en el sistema internacional son las Teslas (T), en ocasiones en algunos estudios también se usa el Gauss (G) y en el pasado las investigaciones usaban el gamma (γ). Donde las equivalencias entre estas unidades que se pueden encontrar en la literatura son las siguientes:

$$1 \text{ T} = 10.000 \text{ G.}$$

$$1 \text{ nT} = 0,00001 \text{ o } 1 \cdot 10^{-5} \text{ G o } 1 \text{ gamma } (\gamma).$$

$$1 \mu\text{T} = 0,01 \text{ G.}$$

$$1 \text{ G} = 100,000 \text{ nT.}$$

Es importante tener en cuenta que en la actualidad en la mayoría de los estudios magnetométricos se usan los nano Teslas (nT), para denotar las unidades magnéticas.

El campo magnético más común, que todos conocemos y que nos es familiar es el campo magnético generado por un imán permanente común. Dado que el campo magnético de la tierra se puede

representar de forma simplificada como el campo magnético de un imán permanente común Figura 1, tal como lo explicaremos más adelante, primero es necesario comprender que el campo magnético generado por un imán permanente común es el espacio en el que actúa su fuerza atractiva o repulsiva.

Los imanes permanentes comunes (imanes de hierro), generan campos magnéticos que, a cortas distancias, son alrededor de mil veces más intensos que el campo magnético terrestre. Pero ya al igual que muchas otros fenómenos físicos, la magnitud de la intensidad del campo magnético se reduce con el cuadrado inverso de la distancia ($I_1/I_2 = D_2^2/D_1^2 \rightarrow I = 1 / D^2$, donde I es la magnitud de la intensidad del campo magnético y D es la distancia desde la fuente del campo magnético), lo que significa que a distancias relativamente cortas las fuerzas atractivas o repulsivas de un imán prácticamente desaparecen, en otras palabras significa que la magnitud de la intensidad el campo magnético de los imanes permanentes comunes se reduce muy rápidamente con la distancia hasta llegar a muy cortas distancias a valores muy pequeños que serán menores a los valores del el campo magnético terrestre.

Es importante tener en cuenta que la ley del cuadrado inverso de la distancia se debe tener presente en todos los momentos por todas las personas que participan en todo tipo de estudios magnetométricos.

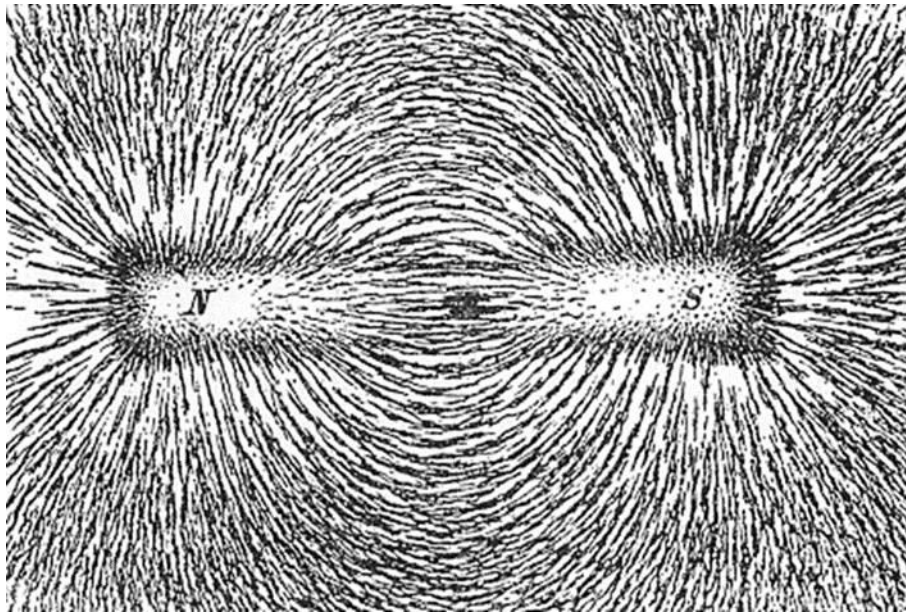


Figura 1. Imagen que muestra las líneas del campo magnético de un imán de barra, producidas por limaduras de hierro sobre papel

2.2 Campo Magnético Total.

Si entendemos al campo magnético total, como el campo magnético medido por un sensor magnético sobre cualquier punto de la tierra. La magnitud de la intensidad total del campo magnético terrestre total en la superficie de la Tierra puede variar de un punto a otro de 25.000 a 65.000 nT. En cualquier lugar de la tierra se puede comprobar la influencia del campo magnético total, con una dirección e intensidad determinadas, sujeta a variaciones periódicas y a perturbaciones no periódicas.

Las variaciones tanto espaciales como temporales del campo magnético y/o de las de los campos magnéticos que lo componen hay que tenerlas en cuenta en todos los trabajos de investigación, por lo que su conocimiento es indispensable.

Los campos magnéticos pueden ser representados Figura 2 en cualquier punto del espacio por un vector tridimensional con origen en las coordenadas del punto donde se desee ubicar. En el caso del campo magnético terrestre total se tiene que:

La intensidad (F) del campo magnético es la magnitud del vector. El ángulo de las líneas de campo magnético respecto al norte geográfico es la declinación. El ángulo de las líneas de campo magnético respecto a la horizontal es la inclinación. Cerca del polo sur geográfico (polo positivo magnético, la inclinación es de $+90^\circ$, al ir aumentando la latitud, la inclinación va progresivamente rotando hasta la horizontal 0° en el ecuador magnético, y continúa rotando hasta llegar a -90 cerca del polo norte geográfico (polo negativo magnético) (Telford W.M et al., 1990).

El campo magnético total, es en realidad la suma de muchos campos magnéticos, generados por una variedad de fuentes, estos campos están superpuestos e interactúan entre sí.

Campo magnético total está compuesto por las siguientes fuentes:

Campo geomagnético principal (aproximadamente el 95% del campo magnético total) se genera en el núcleo externo fluido y conductor (varía tanto en el tiempo como en el espacio). El campo geomagnético principal se extiende desde el interior de la tierra, hasta el límite superior de la magnetosfera, donde se encuentra con el viento solar, actuando como una barrera protectora contra el viento solar, que lo

deforma. El campo geomagnético principal se puede considerar aproximadamente como el campo creado por un dipolo magnético inclinado, cuyos polos magnéticos se encuentran en las proximidades de los polos geográficos, pero con el polo magnético negativo cerca al polo norte geográfico y el polo magnético positivo cerca al polo sur geográfico.

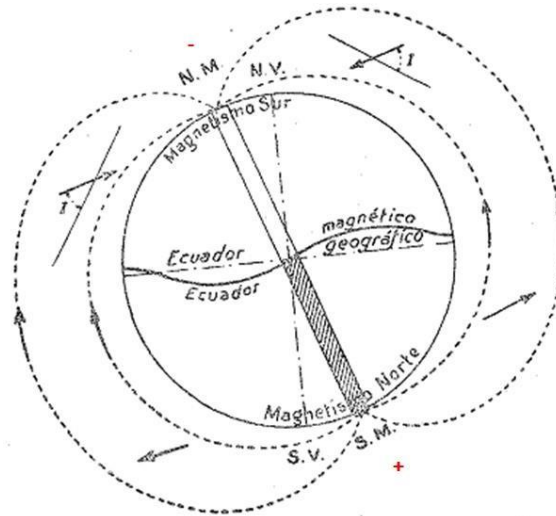


Figura 2. Representación gráfica del campo magnético de la tierra de forma simplificada como el campo magnético de un imán permanente común, con el polo negativo cercano al polo norte geográfico y con el polo positivo cercano al polo sur geográfico, sus líneas del campo magnético (o el ángulo respecto a la horizontal)

El campo geomagnético de la corteza y/o litosfera (varía lentamente y es prácticamente constantemente en el tiempo a escala humana).

Hacen parte de este, las anomalías magnéticas geológicas de interés y está compuesto por el campo magnético geológico regional y el campo magnético geológico local.

Las perturbaciones o variaciones del campo magnético en la atmósfera superior y en la magnetosfera, causadas por el campo magnético externo principalmente solar (variaciones diurnas).

Campo magnético antrópico (generado por actividades humanas), también es uno de los campos de interés por ejemplo el campo magnético generado por los componentes metálicos principalmente de hierro de una embarcación sumergida.

2.3 Campo Geomagnético Principal y Modelos.

El Campo geomagnético principal se puede representar mediante distintos modelos matemáticos, estos modelos geomagnéticos solo están enfocados a modelar el campo geomagnético principal, los modelos más usados son el IGRF (International Geomagnetic Reference Field) y el WMM (World Magnetic Model). Debido a que el campo geomagnético principal está cambiando constantemente tanto en el espacio como en el tiempo, para poder generar estos modelos matemáticos es necesario medir constantemente el campo magnético en todas sus componentes en observatorios magnéticos permanentes situados alrededor de todo el planeta tierra. Los datos de los observatorios geomagnéticos permiten determinar cómo están cambiando cada una de las componentes del campo geomagnético principal con los años, y esta información se usa como datos de entrada para generar y actualizar los modelos matemáticos que representan el campo geomagnético principal de la tierra. Teniendo en cuenta que es imposible predecir la forma en que cambia el campo magnético o sus componentes es necesario continuar obteniendo datos en los observatorios geomagnéticos que permitan actualizar los modelos.

2.4 Modelos IGRF-12 y WMM2015.0.

Debido a la naturaleza cambiante del campo magnético, los modelos se deben usar por periodos de máximo 5 años, a los cuales debe salir una actualización. Actualmente el IGRF-12 y el WMM2015.0 son los modelos del campo geomagnético principal más usados y son válidos hasta el 2020, pero se recomienda usarlos hasta el 2019, hasta el momento en que sean lanzados los nuevos modelos. Ambos modelos IGRF-12 y el WMM2015.0 son estimados a partir de los datos más recientes, y son de calidad comparable.

El WMM es un modelo predictivo y solo es válido para su época, mientras que el IGRF se actualiza de forma retroactiva o sea que es válido desde el 1590 (aceptado por la comunidad científica desde 1900) hasta el final de cada época.

El WMM es producido por las agencias de defensa de USA y UK, la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y la Administración Federal de Aviación (FAA), mientras que el IGRF es producido por la comunidad científica reunida dentro de la Asociación

Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA). En la siguiente página web consultadas el 19/Oct/2023, se encuentran las referencias al IGRF <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> (Alken et al., 2021a)

En la siguiente página web se consultada el 19/Oct/2023, se encuentra la referencia del WMM <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/?model=igrf#igrfwmm> (Jackson et al., 2000)

2.5 Variaciones Temporales del Campo Magnético.

Las variaciones temporales del campo magnético se pueden dividir en variaciones seculares, periódicas y perturbaciones. Las variaciones seculares, son los cambios del campo magnético terrestre en escalas temporales de un año o superiores. Un ejemplo de variación secular es el desplazamiento del polo norte magnético con el tiempo, otro ejemplo de variación secular es la inversión de polaridad del campo geomagnético principal, estas se conocen como inversiones paleomagnéticas y estas son unas variaciones seculares fácilmente identificables en las rocas de la corteza oceánica donde se almacenan dichas inversiones geomagnéticas donde el polo norte geomagnético y el polo sur geomagnético se han intercambiado. Es necesario tener en cuenta que todas las componentes del campo geomagnético principal cambian de manera secular.

La evidencia de las inversiones paleomagnéticas se encuentra en basaltos, testigos de sedimentos obtenidos del lecho oceánico, y en las anomalías magnéticas del fondo marino. Las inversiones paleomagnéticas ocurren aparentemente a intervalos aleatorios de tiempo que varían entre menos de 100000 años hasta 50 millones de años. El evento más reciente, denominado la inversión Brunhes-Matuyama, ocurrió hace 780000 años.

Las variaciones causadas principalmente por la actividad solar son conocidas como variaciones diarias o diurnas y es sumamente importante registrarlas con un magnetómetro base, ya que la magnitud de estas puede enmascarar las anomalías magnéticas de interés o pueden agregar ruido que afecta los procesos y análisis que se realizarán sobre ellos. Adicionalmente se debe tener en cuenta que, si se presentan tormentas magnéticas, estas también se registran en la estación base y nos permite tomar la decisión de suspender la adquisición magnetométrica marina ya que no es adecuado adquirir datos durante el tiempo que duran las tormentas magnéticas. Para calcular las variaciones diurnas es necesario

instalar al menos una estación magnética base, se recomienda comenzar a registrar datos desde antes al inicio de la investigación magnética para verificar las condiciones magnéticas del sitio y que no se tenga tormenta magnética en esos momentos. Igualmente, durante todo el periodo de tiempo de duración de la investigación magnética, y hasta un poco después.

2.6 Cálculo Teórico de las Anomalías Magnéticas.

El campo magnético medido por el magnetómetro marino comprende los valores del campo magnético total, el cual está principalmente compuesto por la componente magnética bipolar de la Tierra y el magnetismo remanente. Además, registra las variaciones diurnas (también captadas por el magnetómetro base) y las influencias generadas por la dirección del movimiento de la embarcación.

El magnetismo remanente representa las anomalías magnéticas de interés. Por lo tanto, es crucial eliminar o reducir los efectos de las variaciones magnéticas diurnas, los efectos causados por el movimiento de la embarcación y el campo magnético teórico de la zona, con el fin de aislar y analizar con precisión las anomalías magnéticas remanentes. Teóricamente esto implica las siguientes ecuaciones sencillas.

En la ecuación 1, se expresa que la anomalía magnética de interés está en función de los datos magnéticos marinos observados y corregidos para cada posición y tiempo, después de ser reducidos en función del IGRF para la misma posición y tiempo.

$$\Delta Fm(\varphi, \lambda, t) = Fm_{obs_{corr}}(\varphi, \lambda, t) - Fm_{IGRF}(\varphi, \lambda, t) \quad (1)$$

Donde:

$Fm_{obs_{corr}}(\varphi, \lambda, t)$ son valores magnéticos observados y corregidos.

$Fm_{IGRF}(\varphi, \lambda, t)$ son los valores teóricos del IGRF.

Para las coordenadas latitud y longitud (φ, λ) , de las posiciones del magnetómetro a lo largo del levantamiento marino en un tiempo dado (t)

El IGRF, tal como se mencionó anteriormente, es uno de los modelos del campo geomagnético principal,

producido por la comunidad científica reunida dentro de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA). La información al respecto de este modelo se puede consultar en la siguiente página web, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>

En la ecuación 2, se define el primer término de la ecuación 1 y se expresa que los datos magnéticos marinos corregidos, simplemente son los datos magnéticos marinos observados para cada posición y tiempo, menos las variaciones diurnas en los mismos tiempos (extraídas de la estación base), menos el efecto del rumbo de la embarcación (o sensor), respecto al norte geográfico.

$$Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t) = Fm_{obs}(\varphi, \lambda, t) - \Delta F_{diurna}(t) - \Delta F_{rumbo}(\theta) \quad (2)$$

Donde para un tiempo dado (t):

$Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores magnéticos marinos observados – corregidos

$Fm_{obs}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores magnéticos observados

$\Delta F_{diurna}(t)$ Son los valores de las variaciones diurnas y

$\Delta F_{rumbo}(\theta)$ es el efecto por el rumbo del buque respecto al norte geográfico

Para resolver la ecuación 2, es necesario tener colectados los datos magnéticos marinos, adicionalmente se requiere conocer los valores de las variaciones diurnas para el mismo periodo de tiempo en que se colectaron los datos magnéticos marinos, y también es necesario determinar los efectos del rumbo de la embarcación (o sensor).

Para determinar los valores de las variaciones diurnas, se debe resolver la ecuación 3, donde se expresa que la variación diurna para cada instante de tiempo, está en función de los valores del campo magnético total registrados en la localización de la estación base en el mismo periodo de tiempo en que se colectaron los datos magnetométricos marinos, de la corrección del IGRF para la estación base y del valor de la serie de tiempo que representa las zonas de menor influencia de los días típicos.

$$\Delta F_{diurna}(t) = F_{base}(\varphi_b, \lambda_b, t) - F_{IGRF_{base}}(\varphi_b, \lambda_b, t) - F_{base_1min}(\varphi_b, \lambda_b, t) \quad (3)$$

Donde:

$F_{base}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ Son valores observados en la base

$F_{IGRF_{base}}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ es el valor teórico en la base

$F_{base_1\ min}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ es el valor que representa la influencia mínima y

(φ_b, λ_b) son las coordenadas fijas de la ubicación de la estación base temporal.

Es importante tener en cuenta que todo lo expresado anteriormente, es de orden conceptual, ya que los procedimientos para calcular las anomalías magnéticas y realizar todas las correcciones, se ejecutarán mediante el software Oasis Montaj de Geosoft, tal como se mencionara más adelante.

2.7 Otros Conceptos Teóricos relacionados con el Magnetismo para tener en cuenta.

Las anomalías magnéticas de interés están constituidas por el campo magnético geológico regional, el campo magnético geológico local y los objetos magnéticos fabricados por el hombre.

La magnitud de las anomalías magnéticas de interés está en función de la magnitud y dirección del campo geomagnético principal y de 2 propiedades de los elementos, moléculas, sustancias que componen las rocas del subsuelo y los materiales, estas 2 propiedades son la permeabilidad y susceptibilidad magnética que determinan el tipo magnetismo de las rocas del subsuelo y los materiales.

La susceptibilidad magnética: es un valor adimensional que indica que tan susceptible es a la influencia generada por un campo magnético externo.

La permeabilidad magnética: es el grado de magnetización del material de un cuerpo en respuesta a un campo magnético exterior.

Todos los elementos, moléculas y materiales responden a un campo magnético aplicado con diferentes tipos de magnetismo (ya sea en forma diamagnética, paramagnética o ferromagnética) en función de los niveles de permeabilidad y susceptibilidad magnética.

Los **materiales paramagnéticos**, en general, tienen una permeabilidad relativa cercana a 1 y una susceptibilidad magnética positiva. Su respuesta ante los campos magnéticos es mínima y apenas perceptible, pero el campo magnético externo tiende a fortalecerse en su presencia. El paramagnetismo se refiere a la tendencia de los átomos o moléculas que poseen momentos magnéticos libres (es decir, espines de electrones desapareados en los orbitales atómicos o moleculares) a alinearse paralelamente a un campo magnético externo. Cuando no hay un campo magnético externo, estos momentos magnéticos están dispuestos al azar. La mayoría de los materiales que encontramos en la naturaleza son paramagnéticos.

Cuando materiales paramagnéticos se encuentran a temperaturas superiores a la temperatura de Curie (e.g. magma) y se van enfriando progresivamente en presencia del campo geomagnético de la tierra, al pasar por debajo de la temperatura de Curie, adquieren una magnetización (termo-remanente) espontánea natural, que será proporcional y en la misma dirección del campo magnético externo de ese momento.

Materiales diamagnéticos: en general tienen permeabilidad magnética relativa inferior a 1, una susceptibilidad negativa, repelen el campo magnético muy débilmente, y el campo magnético externo se debilita. Ejemplo: cobre.

El diamagnetismo y el paramagnetismo son tipos de magnetismo que existen solo con la presencia de campos magnéticos externos y se pierden cuando se suprimen dichos campos.

Materiales ferromagnéticos: en general tienen una permeabilidad magnética relativa muy superior a 1, una susceptibilidad positiva y mantienen su estado de magnetización después de que el campo externo ya no está presente. Son los materiales que "se adhieren a los imanes". Ejemplo: hierro.

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a un campo magnético externo, adquieren una magnetización proporcional al campo magnético aplicado.

Se debe tener en cuenta que los valores de susceptibilidad magnética, en el software Oasis Montaj de Geosoft están y se deben introducir en el Sistema Cegesimal (SGC), ya que este es el sistema de unidades que utiliza este software.

Capítulo 3

3. DATOS Y METODOLOGÍA.

3.1 Zona de estudio

Un estudio magnético mide las características del campo magnético local de una región determinada. Este tipo de tecnología sólo detecta minerales y/o materiales que responden a campos magnéticos, por este motivo, sus aplicaciones se dirigen principalmente a la exploración minera, pero también puede ser útiles para la exploración de carbón, petróleo y gas y en la detección de naufragios. (Ewing et al., 1960; Gallego et al., 2015; Fernández-Montblanc et al., 2018)

En este estudio de investigación, se emplea el método geomagnético marino desarrollado por el Servicio Hidrográfico Nacional de Colombia (DIMAR et al., 2015). Esta elección se motiva por la escasez de información sobre las firmas magnéticas del complejo insular, lo que podría complementar las descripciones fisiográficas realizadas por otros autores (Rey et al., 2021; Zou et al., 2021). A pesar de que el área de estudio es relativamente pequeña, abarcando 1050 km², destaca por su gran riqueza geológica, geomorfológica y oceanográfica, como lo han señalado otros estudios previos (Rey et al., 2021; Payo et al., 2018; Jigena-Antelo et al., 2023).

El área de estudio se encuentra en el Mar Caribe colombiano, específicamente al sur del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (ASPSC). El estudio batimétrico y geofísico se llevó a cabo en la región comprendida entre la Isla de San Andrés, los Cayos de Albuquerque e los Cayos Este-Sureste, dentro del polígono delimitado en rojo, como se muestra en la Figura 3.

La ASPSC está situada en la región occidental del mar Caribe colombiano. Se extiende desde los 12° de latitud norte y desde la frontera con Panamá en el suroeste (SO) a 79° de longitud oeste hasta la Península de la Guajira en el noreste (NE) a 81° de longitud oeste. La zona de estudio está delimitada por la isla de

San Andrés y un grupo de cayos menores, representados por atolones y arrecifes de coral (Geister, 1992).

Tabla 1. Coordenadas que delimitan el área

vértice	Latitud (N)	Longitud (W)
1	12°31'50.91"N	81°55'44.07"W
2	12°20'15.26"N	81°25'37.20"W
3	12°11'23.59"N	81°31'28.24"W
4	12°10'35.44"N	81°38'51.98"W
5	12°12'23.75"N	81°50'12.05"W
6	12°14'16.47"N	81°57'8.33"W

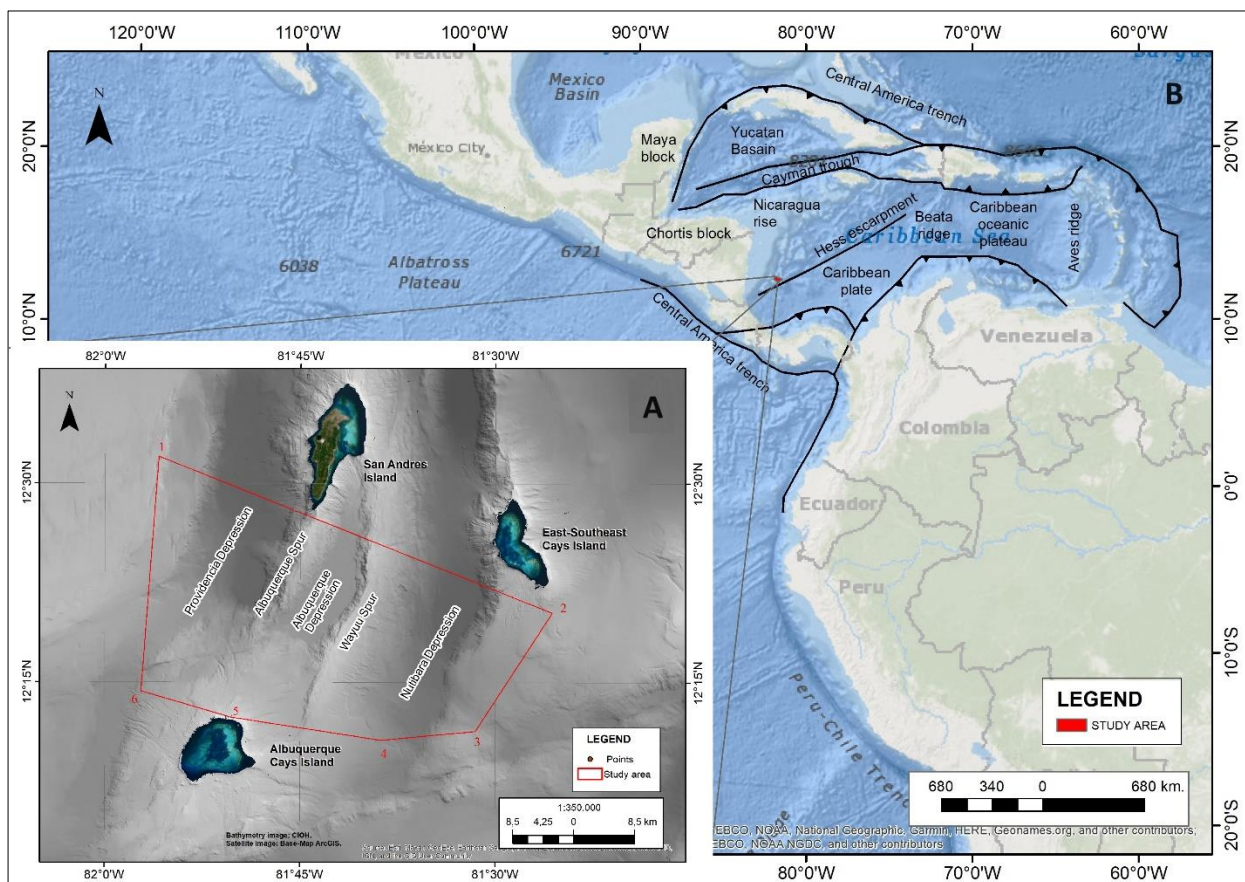


Figura 3. A: Localización de la zona de estudio. Se muestra un mapa en relieve muestra la ubicación del área de estudio y las principales características tectónicas del Caribe. B: Área de estudio ampliada, ubicada en el noroeste de Colombia, el polígono rojo muestra el área específica donde se realizó el levantamiento.

Geológicamente, la ASPSC se encuentra en la parte occidental de la Placa del Caribe. Esta placa está situada en medio de las placas de Cocos, Panamá, Andes del Norte, Sudamérica y Norteamérica. La evolución de la Placa del Caribe a lo largo del Cenozoico ha estado controlada por la acumulación de sedimentos, la deformación estructural de la corteza preexistente y el vulcanismo.

El área de estudio forma parte de la provincia geológica conocida como Promontorio Inferior de Nicaragua (LNR, por sus siglas en inglés Lower Nicaragua Rise), que se considera un bloque de corteza limitado al noroeste por el Escarpe de Pedro y al sureste por el Escarpe de Hess; una zona de carácter distensivo desde el Mioceno Medio al Holoceno. (Holcombe et al., 1990; Mauffret & Leroy, 1997). Case et al. (1990), basándose en la gravimetría, la modelización magnética y la integración con datos sísmicos, concluyó que el LNR está compuesto por corteza oceánica. Recientemente los estudios realizados por Carvajal Arenas (2017) y por Osorio-Granada et al. (2022), han confirmado esta teoría.

Se ha propuesto que la evolución tectónica de la región parte de dos conos volcánicos erosionados cuya historia geológica está estrechamente relacionada con la evolución del Alto de Nicaragua y parte de la Placa del Caribe (Case et al., 1990; Pindell et al., 2006). Se concluyó que los atolones, islas y bancos de coral pueden haberse originado a partir de la actividad volcánica de principios del Cenozoico (Geister & Díaz, 2002). En la zona de estudio, las principales estructuras consideradas como:

Isla de San Andrés: La edad se estima probablemente Paleógena, lo cual es compatible con la historia geológica de la corteza del Caribe occidental. Simultáneamente la subsidencia y producción de carbonatos en un mar poco profundo del Mioceno dieron lugar a la formación de un grueso banco de caliza tipo atolón sobre la cima de la estructura volcánica (Geister, 1992)

La **Isla de los Cayos Alburquerque** presenta un contorno casi circular y es el único atolón en la zona con esta característica. Se ha determinado que el atolón tiene un basamento volcánico según datos paleomagnéticos obtenidos de una muestra de lava basáltica de su vertiente noroeste, a una profundidad de aproximadamente 700 metros (Milliman, 1969).

En cuanto a **la Isla de los Cayos Este-Sureste**, su mitad sur muestra una orientación SE-NW, mientras que la mitad norte exhibe una clara dirección NNE-SSW. Este patrón podría indicar la presencia de una importante intersección triple entre dos zonas de falla con diferentes direcciones de deslizamiento, las cuales subyacen al presunto cono volcánico que parece formar el zócalo de la isla (Geister & Díaz, 2002).

La metodología de investigación se divide en fases para mejorar su comprensión, fases que se trabajarana continuación.

3.2 FASE 1. Planificación de la campaña de adquisición

En esta fase se establece el objetivo de investigación que a su vez dará lugar a la forma del estudio geofísico y ayudará en la determinación los tiempos de trabajo en campo, adicionalmente se consideran tiempos para posibles imprevistos que puedan surgir en el mar. Antes de planificar la adquisición de datos, el objetivo del estudio y la escala del trabajo (local o regional) es fundamental para la configuración y longitud de las líneas a adquirir ya que la generación de la malla de adquisición se realiza en función de los objetivos buscados. Es importante considerar si se requiere determinar el campo magnético regional (por ejemplo, cambios de polaridad magnética reflejados en las anomalías magnéticas marinas, directrices regionales, etc.), o para determinar las anomalías geológicas locales (por ejemplo, cuerpos y estructuras geológicas), o para identificar las anomalías debidas a objetos producidos por el hombre (Introcaso et al., 2008). Esto está relacionado con el hecho de que la disposición geométrica de la adquisición debe tener en cuenta la resolución espacial del cuerpo a caracterizar, es decir, cuanto más pequeño sea el objeto, más densa y menos espaciada debe ser la cuadrícula de adquisición.

También es importante tener en cuenta la sensibilidad de los sensores, ya que, para reconocer una anomalía, ésta debe ser varias veces superior a la sensibilidad (resolución) del magnetómetro y el nivel de ruido externo. Es importante definir este parámetro para saber si el objeto es detectable en la superficie y, en tal caso, en qué medida las lecturas en el perfil, y la distancia entre perfiles adyacentes, tendrían que espaciarse (espaciado de la cuadrícula). Lo ideal sería que la cuadrícula tuviera una forma que cubriera toda la zona de manera que la anomalía pueda detectarse siempre mediante un perfil. Esto significa que debe haber cierto solapamiento entre perfiles (DIMAR et al., 2015).

Es imprescindible disponer de información magnética adicional, proveniente de observatorios magnéticos o de una Estación Base ubicada cerca de la zona de levantamiento, con el propósito de mejorar la calidad de los datos. Esta información adicional ayuda a realizar correcciones y ajustes precisos, lo que contribuye significativamente a obtener resultados más fiables y precisos en el estudio geomagnético. En este caso, se utilizó una Estación Base Geometrics G-862 RBS Figura 4, adquirida por la Dirección General Marítima

en 2015. Esta se posicionó a un radio mínimo de 60 m fuera de cualquier fuente de interferencia electromagnética. De esta forma se reducen los errores que pueden producirse en los datos, debido a casos fortuitos, como la interferencia electromagnética del campo solar.



Figura 4. Instalación de la estación base RBS Geométrica G-862.

Durante la planificación, es esencial disponer de datos batimétricos de alta resolución, con el fin de apoyar la identificación de la estructura geológica que se requiere registrar con magnetometría (Plets et al., 2013). Como el objetivo del proyecto era determinar las anomalías magnéticas, generadas por los cuerpos volcánicos y las estructuras geológicas (fallas) localizadas al sur del ASPSC, en las inmediaciones de la Isla San Andrés San Andrés, Cayos de Alburquerque y Cayos de Estesudeste Figura 3. Las líneas de prospección se realizaron teniendo en cuenta las geoformas mostradas en la batimetría. Por esta razón, las líneas se planean perpendiculares a las líneas de tendencia de las fallas u otras estructuras, en mallas regulares, en las que se garantiza que la separación entre líneas sea igual a la distancia mínima estimada entre el sensory el objeto magnético u objetivo. Por ello se recomienda tener en cuenta las profundidades a las que se realizará la prospección (Barrows & Rocchio, 1990).

3.2.1.1 Definición líneas de levantamiento.

En el área incluida en el polígono de investigación geofísica, se realizaron cuatro líneas principales para adquisición de datos magnéticos, con dirección NO-SE (acimut de 300°), con longitudes comprendidas entre 70 y 57 km, y una separación de 7 km (Líneas 1, 2, 3 y 4). Las cuatro líneas de control (5C, 6C, 7C y 8C), están orientadas perpendicularmente a las líneas principales, con una separación de 23,50 km entre ellas, y tienen una longitud media de 31 km (ver Figura 5). Para calcular los días necesarios para el levantamiento, se consideró la longitud total de las líneas a la velocidad óptima de levantamiento en millas náuticas lineales suponiendo 24 horas de trabajo al día (DIMAR et al., 2015).

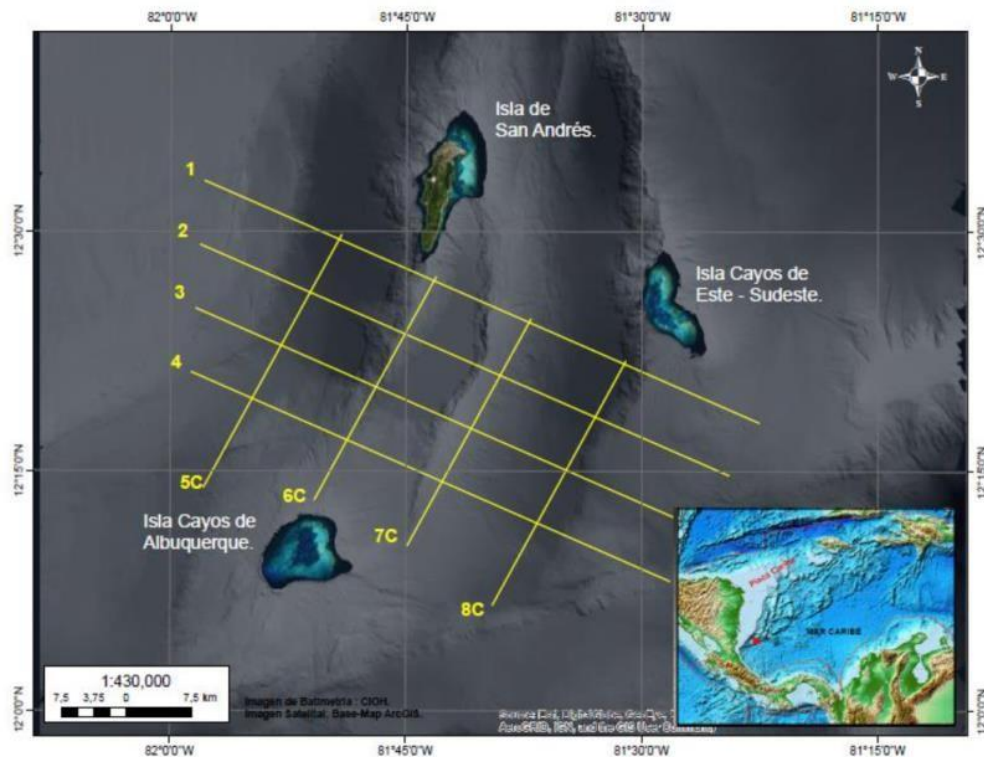


Figura 5. Planificación de las líneas para el levantamiento geomagnético en el área de estudio.

Una vez establecida la configuración del arreglo geométrico, se estimaron los tiempos de los viajes y duración de la adquisición. Como ya se ha mencionado, es importante mantener una buena densidad de datos que pueda representar adecuadamente el objetivo; es decir, la velocidad óptima de prospección fue

de 5 nudos, asegurando que la intensidad de la señal fuera estable, y se obtuvieron 10 muestras por segundo.

Tabla 2. Estimación de la duración del estudio en días a partir de millas náuticas (NM) lineales.

Levantamiento	Número de líneas	Metros	NM	Tiempo en días
Líneas Principales	4	317.087	171,213	2
Líneas de control	4	92.784	92,784	1
TOTAL				
120 MN = 24 h				
263,997 NM = 3 días de levantamiento				

Por último, se realizó un control meticuloso para garantizar que la adquisición de los datos se llevó a cabo con éxito. En el caso de equipos consumibles, como los convertidores RS232-USB lo ideal es disponer de piezas de repuesto, en caso de imprevistos.

3.3 FASE 2. Adquisición de datos

Los buques de investigación oceanográfica, ARC Malpelo, ARC Providencia y ARC Roncador, fueron equipados para operar con el magnetómetro marino modelo G-882 (Geometrics, 2005), propiedad de la DIMAR. Este equipo cuenta con un amplio rango de detección para materiales ferrosos de diversos tamaños y una sensibilidad de $<0,004 \text{ nT}/\pi\text{Hz rms}$, lo que aumenta significativamente la probabilidad de detección. Tiene un diseño hidrodinámico que ayuda a reducir la probabilidad de incrustación de rocas, y funciona a una profundidad de aproximadamente 2750 m, y a temperaturas de $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. El sensor de vapor de cesio está en la parte trasera del "pez" del cilindro que forma una T con el eje más largo, donde se puede modificar la dirección del sensor; ésta era vertical, ya que el trabajo debía realizarse en latitudes ecuatoriales (Oviedo et al., 2020). Por último, el intervalo de muestreo variaba a veinte muestras por

segundo, con una precisión absoluta de $<2nT$. La adquisición de datos de campo se llevó a cabo con el software MagLog de Geometrics Inc

3.3.1.1 Levantamiento batimétrico.

Para realizar el levantamiento hidrográfico se tuvo en cuenta la regulación internacional de OHI para las profundidades del área de estudio, implicó un levantamiento de Orden 2, este nivel de orden involucra una representación menos detallada del fondo marino en comparación al orden 1b y 1a. La orden 2 es adecuada para áreas con profundidades superiores a 200 metros. En estas áreas más profundas, es menos probable que existan elementos grandes que afecten la navegación superficial, y que no hayan sido detectados por un levantamiento de Orden 2. Se sugiere que al menos el 5% del área se cubra con datos batimétricos distribuidos regularmente. (IHO, 2020)

La adquisición de los datos batimétricos se realizó durante los meses de agosto a septiembre de 2017. A bordo del Buque de Investigación Oceanográfica de la Armada Nacional de Colombia “ARC Providencia”. Se utilizó un sistema Multihaz Kongsberg modelo EM302 con frecuencia de funcionamiento de 30 kHz (Introcaso et al., 2008).

El software utilizado para la recolección de datos hidrográficos es Sea Information System (SIS) configurado con un ángulo de apertura de 70° , realizando un solape del 30% buscando asegurar un 100% de cobertura de fondo (Barrows & Rocchio, 1990). Adicionalmente, se utilizó posicionamiento diferencial con el sistema Seapaht lo cual garantiza una precisión centimétrica en el levantamiento batimétrico.

3.3.1.2 Levantamiento geomagnético.

Los datos geomagnéticos fueron adquiridos a bordo del ARC Roncador durante el período comprendido entre el 20 de junio y el 1 de julio de 2018. El magnetómetro utilizado es un modelo G-882 de la casa Geometrics y con una tasa de muestreo de 20 Hz (Plets et al, 2013). Fue remolcado a una distancia de 150 metros de la embarcación y con una velocidad promedio de 5 nudos. El sistema de posicionamiento utilizado para el sensor fue un R7 Trimble con corrección en tiempo real. Las coordenadas fueron referidas

al Sistema de Referencia WGS84 (Telford et al., 1990; Jigena et al., 2016). El arreglo geométrico implementado contempla una separación de líneas de 12 km, permitiendo una resolución espacial de 500 metros por píxel.

La recolección de la información se llevó a cabo con el software MagLog. Se utilizó la unidad de medida del Campo magnético total en nT, con una sensibilidad típica 0.02nT a intervalos de muestra de 0.1 segundos, que trabaja en un rango de operación de 20,000nT hasta 100,000nT. (Barrows & Rocchio, 1990)

El estudio geofísico comprende cuatro líneas perpendiculares a la dirección general de las estructuras geológicas NNE (líneas 1, 2, 3 y 4) con una longitud máxima de 70,67 km, y cuatro líneas de control paralelas a las formaciones (líneas 5C, 6C, 7C y 8C) que tienen una longitud máxima de 32 km (Telford et al., 1990), ver Figura 6

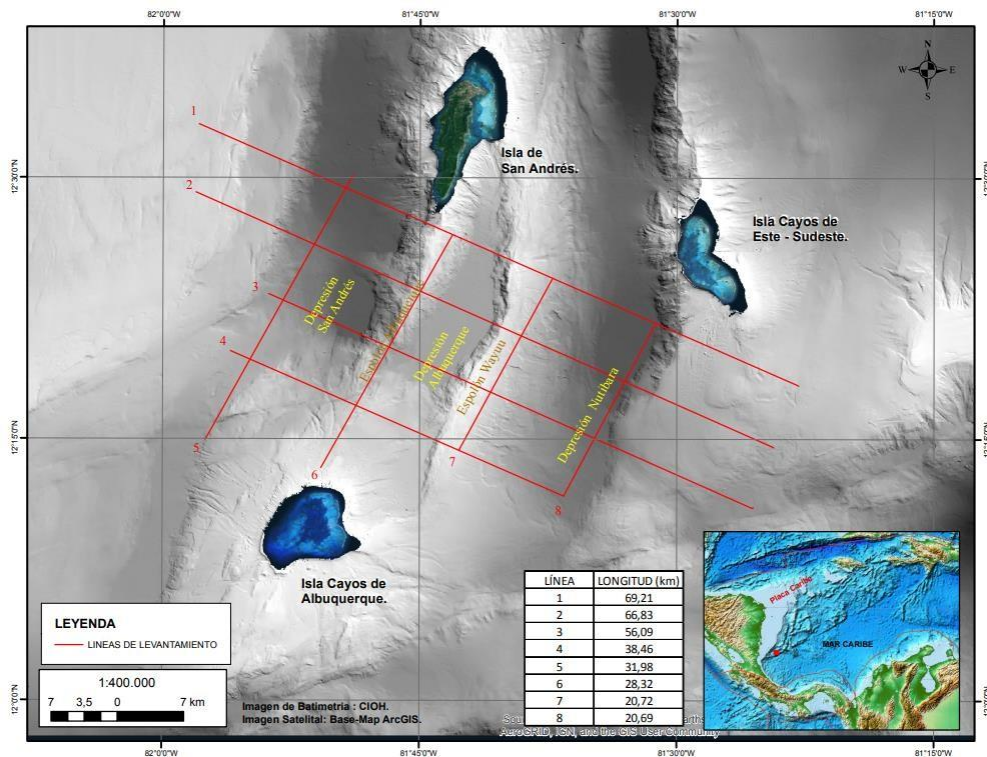


Figura 6. Ajuste geométrico de las líneas de levantamiento para la adquisición de datos geomagnéticos en el área de estudio.

3.4 Componentes

Entrando en materia, hay que tener en cuenta algunos elementos indispensables para realizar una

adquisición óptima. Por ejemplo, el sensor de magnetometría y el cabrestante portátil con 300 m de cable de telemetría se adaptaron específicamente para adquirir la información geofísica.

El montaje utilizado en los buques se muestra en la figura 7. Los datos magnéticos se transmiten desde el sensor que se encuentra sumergido en el agua, a través del cable de a bordo, pasando por el cabrestante. Finalmente, llegan a una "caja de conexiones" donde los datos magnéticos se relacionan con los del posicionamiento obtenidos por el Sistema Global de Posicionamiento por Satélite, GPS (Jigena et al., 2016; Geometrics, 2012).

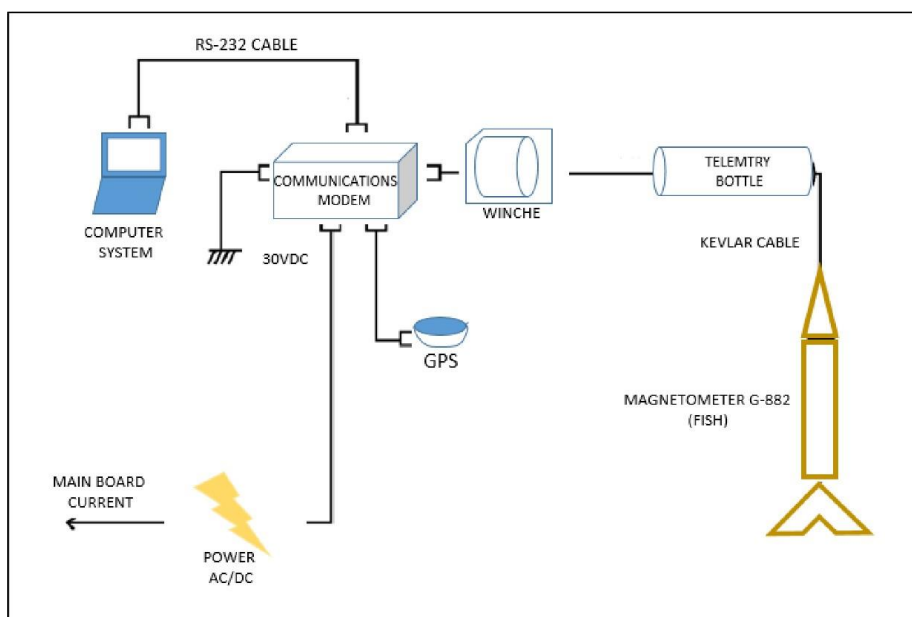


Figura 7. Configuración del equipamiento para la adquisición de datos magnéticos.

La Figura 8 muestra una visualización de los datos en tiempo real utilizando el software Maglog. El recuadro rojo de la izquierda es la ventanade navegación, donde se muestran la posición del buque y su rumbo. Además, las líneas que debe seguir el timonel según las instrucciones de planificación que se indican en esta ventana (Geometrics, 2015). El recuadro azul, a la derecha, muestra las curvas de los datos esperados, o calculados, por el modelo del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) en esa posición geográfica precisa y los datos adquiridos en tiempo real se presentan en línea roja. Los pequeños indicadores verdes muestran la intensidad de la señal, los datos magnéticos y el posicionamiento. Todos estos indicadores deben ser verdes, para que los datos se adquieran correctamente con la mayor calidad.

El rectángulo rojo, en el extremo inferior derecho, indica que no está grabando, y debe pulsarse para comenzar a grabar los datos durante la adquisición (Tchernychev, 2009).

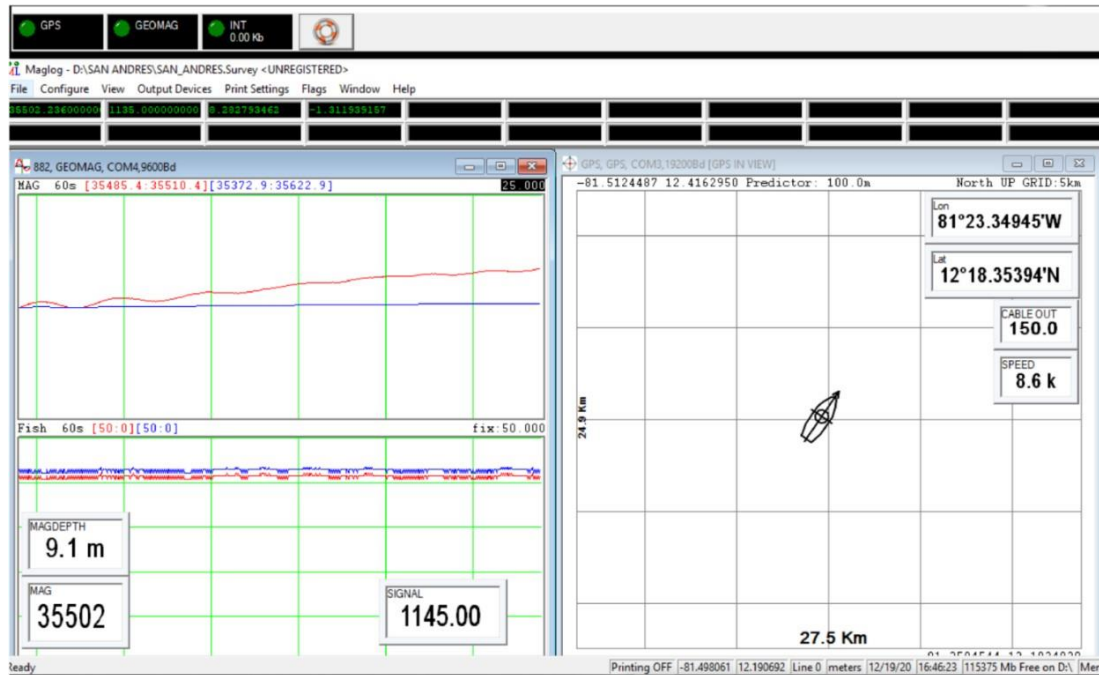
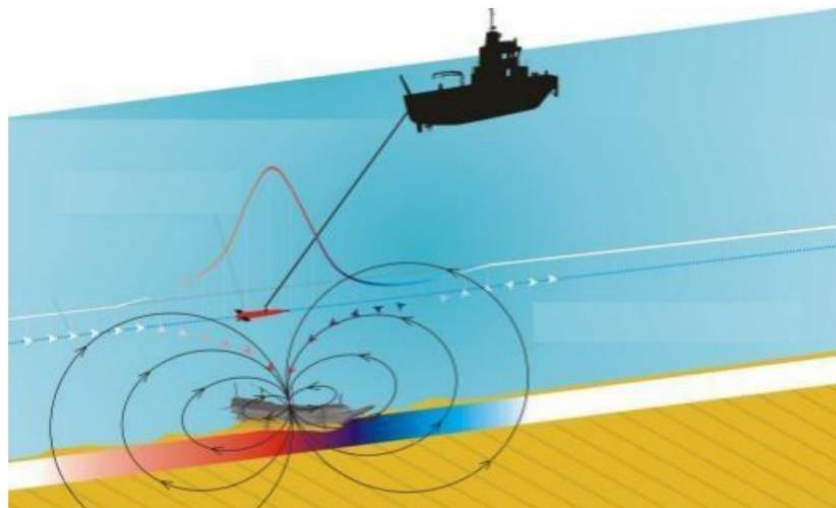


Figura 8. Visualización de información geomagnética en el software MagLog en tiempo real.

La adquisición de datos se lleva a cabo con la colaboración del personal del buque, siguiendo directrices específicas, como una velocidad máxima de 5 nudos y manteniendo una separación del sensor de al menos tres veces la eslora



del buque, que en este caso fue de 150 m. Es crucial que el "pez" sea remolcado desde la popa, tal como se ilustra en la figura 9.

Figura 9. Sistema de remolque por popa del equipo de magnetometría.

El registro magnético sólo es útil en transectos rectos, mientras que los datos de los giros entre perfil y perfil no se tienen en cuenta, ya que los valores registrados se ven afectados por el campo magnético inducido por la aproximación del barco cada vez que se realiza un giro (Calcina, 2009).

La adquisición de datos geomagnéticos marinos implica una serie de decisiones cruciales que pueden tener un impacto significativo en los resultados finales de la investigación (Geotem, 2024). A lo largo de este proceso, es común cometer varios errores que pueden clasificarse según la fase de desarrollo del estudio. Por ejemplo, durante la planificación, es frecuente cometer errores relacionados con el diseño inadecuado de las líneas para el levantamiento de datos, lo que podría dificultar la discriminación precisa de la forma y el tamaño de la anomalía. Es importante tener en cuenta que una medición solo es relevante si se conoce el margen de error asociado a esa medición. La interpretación de los datos se basa en la colección total de datos, por lo que el muestreo debe estar alineado con las dimensiones del objetivo que se busca alcanzar. Otros tipos de errores están asociados al equipo de medición, que pueden dar lugar a lecturas erróneas y afectar a la calidad de los datos, como ser: errores del operador, errores de muestreo y errores relacionados con el ruido ambiental, entre otros. Algunos ejemplos de tratamiento de errores en el procesamiento de datos geofísicos y gravimétricos se muestran en (Jigena et al., 2016; Jigena et al., 2018)

3.5 Conexiones.

Las conexiones dependen de la longitud del cable que se pretenda usar, y este tal como se ha indicado anteriormente depende del tipo de embarcación y de su eslora. La seguridad del sensor (pescado o fish) depende de longitud del cable. Esta longitud se define en función de la profundidad, la velocidad de arrastre y las maniobras requeridas durante el proceso de adquisición de datos. Es importante que durante la adquisición de datos no haya mucha influencia de los ruidos o interferencias magnéticas provenientes de la embarcación. Para los propósitos de esta Guía Metodológica explicaremos tres tipos de conexiones diferentes, que denominaremos configuraciones. Estas conexiones o configuraciones están en función de la longitud de cable utilizado, y cubren las posibles conexiones con los equipos y materiales utilizados

durante el presente trabajo.

3.5.1 Configuración tipo Adicional para aguas someras

Si los datos van a ser adquiridos en aguas muy someras y en embarcaciones pequeñas no metálicas, donde la principal fuente magnética sea el motor fuera de borda, se debe realizar la configuración tipo 1, tal como la que se muestra en la Figura 10, donde se tiene los siguientes componentes: el “pescado”, se puede usar como cable de arrastre y telemetría, el cable de interconexión, el cable de abordaje, la “JunctionBox”, el cable de alimentación a la “Junction Box”, el cable de comunicación serial y el adaptador serial a USB hacia un portátil, antena GPS con cable, receptor GPS con cable de comunicación serial y adaptador serial a USB.

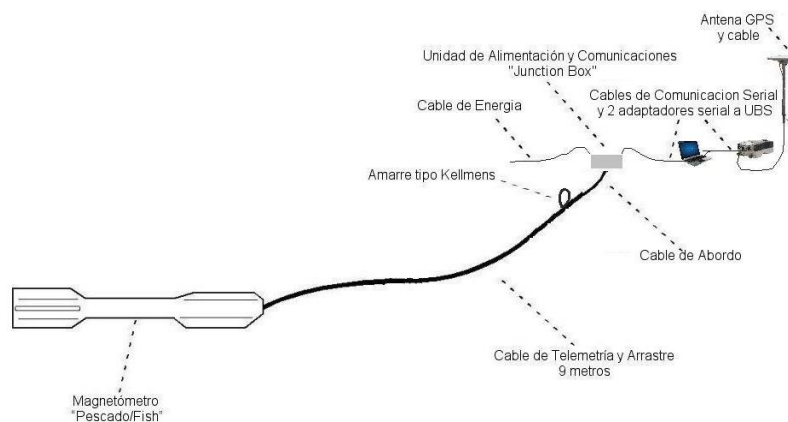


Figura 10. Diagrama de Sistema de remolque por popa del equipo de magnetometría.

3.6 FASE 3. Oficina y procesamiento de datos

En esta fase de oficina se analizaron, filtraron y procesaron los datos geomagnéticos utilizando el software OasisMontaj versión 8.5 de Geosoft, Los datos fueron corregidos por: variación diurna, corrección por retraso, corrección por orientación en grados y finalmente el Campo de referencia geomagnético internacional IGRF. y para la cartografía y la representación geográfica se utilizó el software ArcGIS.

Corrección por variación diurna, se registran lecturas magnetométrica de manera simultánea a la adquisición marina, usando el magnetómetro base RBS G-862, instalado en la ciudad de Cartagena de Indias (Colombia) en coordenadas: latitud 10°23'24.62"N y longitud 75°31'54.97"O. En este procedimiento se restaron los datos adquiridos del magnetómetro base RBS G-862 a los tomados por el

magnetómetro móvil G-882 (Seequent inc., 2021; Pérez Carrillo de Albornoz, 2002). En el proceso de corrección, se considera la diferencia longitudinal de 6°; lamentablemente, debido a aspectos logísticos, fue imposible instalarlo más cerca de la zona de estudio para que se respetara la distancia ideal de 1°. Además, es fundamental resaltar que se aplicaron los datos de corrección de la variación diurna después de verificar que no había tormentas solares o variaciones significativas que pudieran afectar el resultado del proceso de corrección. Para la corrección del retardo, se excluyeron los cinco primeros datos de cada línea para eliminar los datos capturados cuando el sensor aún no estaba alineado con la línea de prospección prevista, con el fin de reducir la incertidumbre debido a las maniobras de giro del buque durante la adquisición (Grandis & Dahrin, 2017).

En cuanto a la corrección de la orientación en grados, se consideraron los cambios en la orientación del sensor durante la adquisición y se calcularon las incertidumbres generadas en estas direcciones. Esta corrección se realizó siguiendo la metodología presentada en el Manual de Usuario (DIMAR et al., 2015; Oviedo et al., 2020).

Para la **corrección del IGRF**, se restaron los valores del modelo (Alken et al., 2021b) para cada punto del levantamiento, teniendo en cuenta la inclinación y la declinación magnética. Se asignó un valor en función de la posición latitudinal en la zona de estudio, y este valor se restó a la base de datos.

Finalmente, una vez realizadas las correcciones, se generó el **mapa de anomalías de campo total** que sirvió como base para la elaboración de los filtros de visualización. Todos los mapas se generaron utilizando el método de interpolación de mínima curvatura. Se aplicaron los siguientes filtros:

La **reducción al polo** se implementó en la malla de anomalías de campo total para eliminar el efecto de la inclinación de las anomalías magnéticas, transformando la anomalía como si la fuente se hubiera leído en el polo magnético, con una inclinación de 90° (Bajgain, 2011). La reducción al polo se puede calcular en el dominio de la frecuencia utilizando el siguiente operador (MacLeod et al., 1993):

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2} \quad (4)$$

donde:

θ es la dirección del número de onda

I es la inclinación magnética

D es la declinación magnética.

Para las variaciones del campo magnético medidas en estudios geofísicos, en el SI se utilizan en nano teslas.

La **primera derivada vertical** se aplica a la malla resultante del campo de anomalía total para destacar los rasgos lineales, acentuando los rasgos pronunciados en la batimetría. Este procedimiento está relacionado con fuentes más profundas (Jacobs, 1994), cartografía de estructuras profundas del subsuelo y objetivos de explotación de minerales (Geosoft, 2014).

El filtro de **señal analítica** se aplica para generar el realce de una anomalía de campo potencial. Se utiliza para definir los límites de distribuciones de densidad o magnetización geológicamente anómalas (Alatorre-Zamora et al., 2012). El filtro se define por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados derivados en las direcciones x, y y z. Es útil para localizar los bordes de cuerpos fuente magnéticos (Narváz Medina, 2012). La aplicación de la señal analítica nos muestra la forma de los cuerpos y su posible localización, pero no la dirección de magnetización. La siguiente fórmula lo describe matemáticamente (Galván Pineda, 2016):

$$|B(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

Para filtrar, visualizar, y analizar posibles características de la geomorfología o identificar fuentes de anomalías del fondo marino, utilizamos la componente residual con los métodos de análisis espectral y de inversión por deconvolución de Euler (DoE).

La **componente residual**, busca la separación de las anomalías regionales y residuales. Este método utiliza un logaritmo en función del número de onda k, que se denomina filtrado interactivo en el software. Se resaltan las características profundas que generan variaciones en el campo observado en superficie, a escala regional, y que presentan una longitud de onda larga, con gradientes horizontales suaves y graduales (DIMAR et al., 2015).

Normalmente, la anomalía regional se atribuye a causas profundas en la corteza terrestre, son de gran longitud de onda, y generalmente influyen en toda la zona estudiada, aproximadamente de la misma manera. Las anomalías residuales, en cambio, son de longitud de onda pequeña y se producen cerca del punto de medición

El filtro gaussiano con una frecuencia de corte k_0 se define como

$$L(\mathbf{k}) = 1 - e^{-k^2/2k_0^2} \quad (6)$$

donde:

$$\mathbf{k} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (7)$$

el valor absoluto del número de onda.

Este filtro deja pasar entonces pequeñas longitudes de onda correspondientes a lo que sería una señal de tipo residual (Galván Pineda, 2016).

Para el **análisis espectral**, el espectro logarítmico de estos datos puede interpretarse como la profundidad de un "conjunto" de fuentes que se determina fácilmente midiendo la pendiente de la energía (potencia) y dividiéndola por 4π (Whitehead & Musselman, 2007).

La **deconvolución de Euler** trabaja con el concepto de que los campos magnéticos son funciones homogéneas de las coordenadas de la fuente, y, por tanto, satisfacen la ecuación de Euler. Esta ecuación puede resolver paramétricamente las localizaciones de las fuentes (Narvárez Medina, 2012), y empleando índices estructurales, evaluar los resultados de solución apropiados (Geometrics, 2015)

Para este trabajo comparativo se utilizaron como referencia los datos obtenidos del repositorio NOAA de levantamientos magnéticos efectuado en la zona de estudio entre 1970 y 1971. Se realizó un levantamiento hidrográfico de acuerdo con las especificaciones técnicas de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI), publicación S-44 para los requisitos de la Orden 2 (Pérez Carrillo de Albornoz, 2002; IHO, 2020). Estas normas garantizan la calidad y estandarización de los resultados.

El presente método de trabajo geofísico es aplicable en todas las aguas profundas del territorio marino colombiano, o de cualquier parte del mundo, donde se consideran isóbatas de 100 m, hasta la profundidad máxima registrada, en este caso para los mares colombianos de 4600 m. Esta especificación también es recogida por la Norma S44 de la OHI, que indica que los levantamientos de Orden 2 se limiten a zonas de más de 100 m de profundidad (Pérez Carrillo de Albornoz, 2002; Jigena et al., 2016; IHO, 2020). Es importante hacer notar que los datos de referencia de la NOAA tienen 50 años de antigüedad, pero no se

disponía de datos geomagnéticos más nuevos para comparar los resultados obtenidos en la zona de estudio con los datos actuales. Sin embargo, las cartas náuticas 1624 y 004 editadas por el CIOH en 1998 y 2018, respectivamente (DIMAR, 2021), presentaban variación temporal y local del campo geomagnético en la zona.

La declinación debida al efecto de variación anual fue corregida con un valor de $4^{\circ}18'$ (W) en 2020. Igualmente, se comparó la declinación magnética con los datos publicados en el AIP COLOMBIA (Publicación de Información Aeronáutica), Informe del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de la Isla de San Andrés, para el 16/jul/2020 (AIP, 2020), la cual fue de $02^{\circ}48'$ W. La diferencia en las declinaciones se debe a la separación entre el Aeropuerto de San Andrés (norte de la isla) y la zona donde se define la declinación magnética en la carta náutica 004, que se encuentra a unos 90 km al NE del aeropuerto. Para el análisis de la declinación magnética, se siguió el procedimiento especificado por Udías y Mezcua (Udías et al., 1997).

Para la presentación de las grillas de las imágenes se utilizó el método de Mínima Curvatura y el sistema de coordenadas WGS84. El método se refiere al proceso de interpolar datos en una cuadrícula de "celdas" igualmente espaciadas en un sistema de coordenadas específico. Este método de interpolación estima los valores mediante una función matemática que minimiza la curvatura de la superficie, dando como resultado una superficie lisa que pasa exactamente por los puntos de entrada (Tchernychev, 2009; Fernández-Coppel, 2001)

Capítulo 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Geformas Obtenidas del Levantamiento Batimétrico.

En búsqueda de afianzar y corroborar los hallazgos realizados con magnetometría, se busca tener un contexto general de la zona, por lo cual se realiza una caracterización geomorfológica con datos hidrográficos de alta resolución adquiridos por el CIOH. Utilizando el software hidrográfico CARIS HIPS & SIPS (Teledyne, 2021) se procesó la información y se exportó a formato Geotiff (Figura 6) con una resolución espacial de 35m. Los datos GeoTIFF fueron exportados al software ArcGIS, en el cual se generó un modelo digital de elevación delineando curvas de nivel cada 100m para escanear los perfiles batimétricos, los cuales se muestran en la Figura 7.

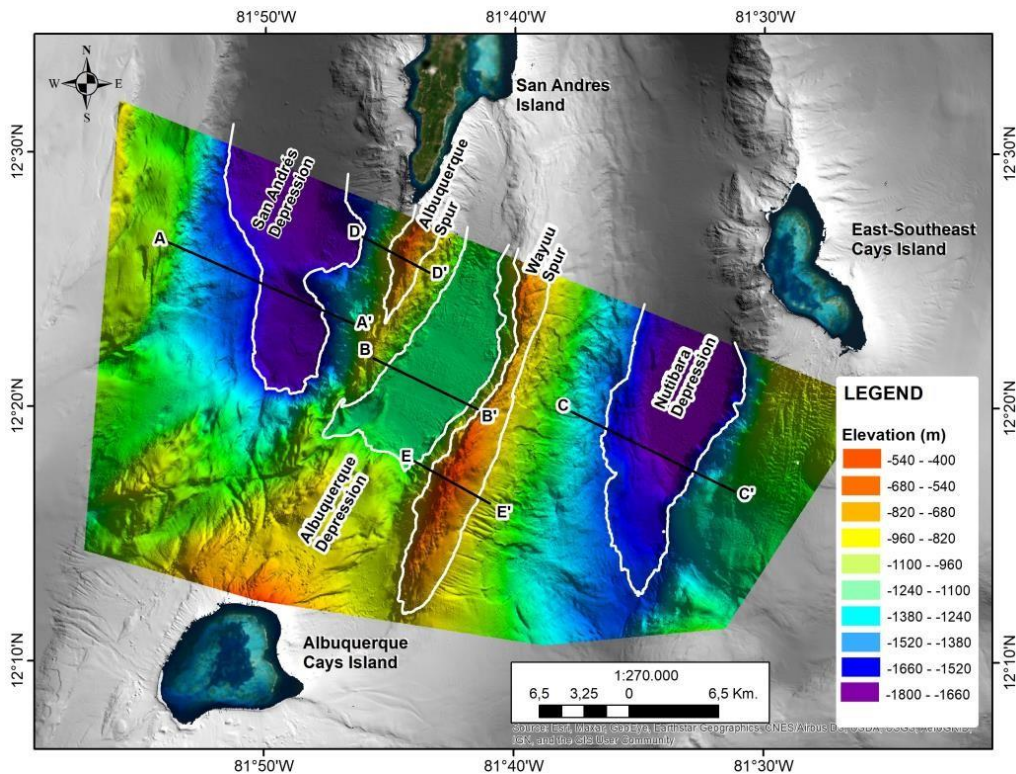


Figura 11. Identificación de geformas del relieve en la zona de estudio en el Mar Caribe occidental. El área es

ilustrada por la batimetría en color y muestra las principales características geomorfológicas señaladas con una línea de color blanco que representan la máxima profundidad para cada geoforma. (para la Depresión San Andrés 1800metros, para el Espolón Albuquerque y el Espolón Wayuu 600metros, para la Depresión Albuquerque 1100metros y para la Depresión Nutibara 1700metros, las líneas negras representan los perfiles batimétricos que se observan en la figura 7.

Como resultado del levantamiento batimétrico, se obtuvieron superficies que van desde los 400metros hasta los 1800metros de profundidad. A continuación, en la figura 7 se presentan perfiles que ayudan en la caracterización del relieve submarino.

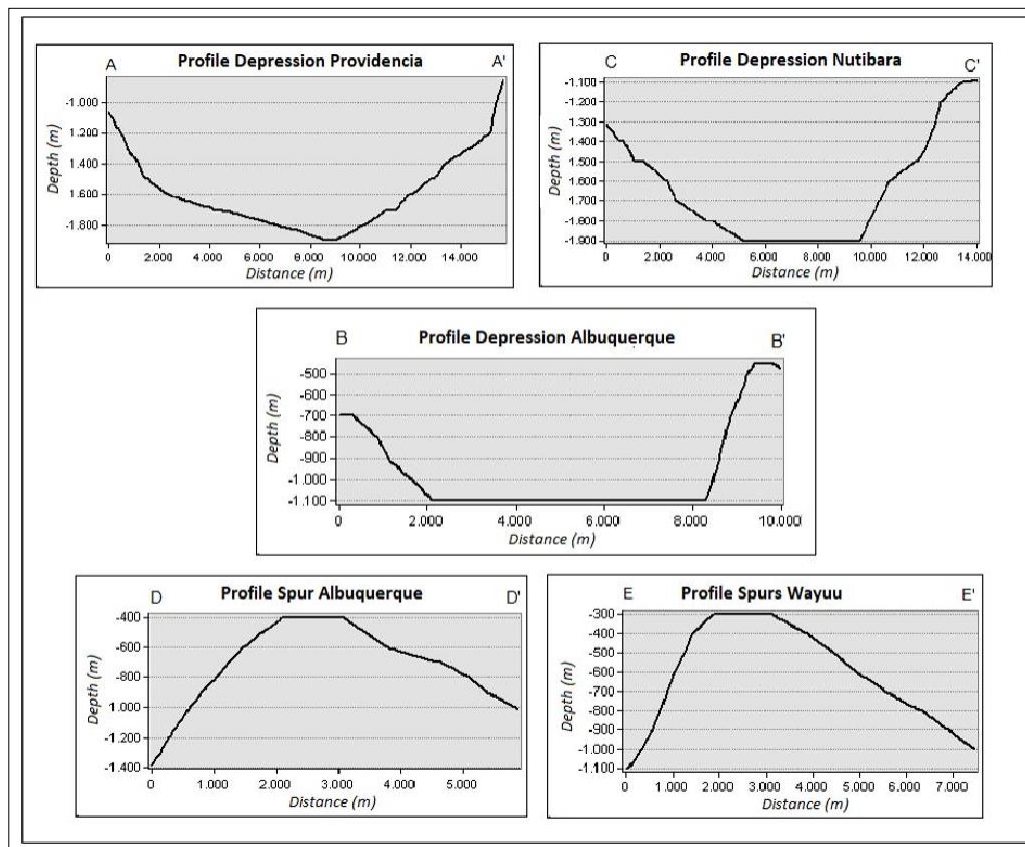


Figura 12. Perfiles batimétricos donde se ilustran las principales geoformas de la zona de estudio A) Depresión Providencia, B) Depresión Albuquerque, C) Depresión Nutibara, D) Espolón Albuquerque, E) Espolón Wayuu. Ver Figura 2 para la localización del perfil

De occidente a oriente la geomorfología de la zona de estudio se encuentra representada por:

Depresión Providencia: Al oeste de la Isla de San Andrés, presenta una tendencia general NNE-SSW y alcanza una amplitud de aproximadamente 10 km. Se identifica un rango de profundidades entre los -1900 metros en la zona más profunda hasta los -850 metros en su parte más somera ubicada hacia la parte sur occidental de la Isla de San Andrés. (Figura 7).

Espolón Albuquerque: Conecta el monte submarino Isla Cayos de Albuquerque con el monte submarino que conforma la Isla de San Andrés. El espolón tiene una morfología alargada. Su tendencia general es NNE-SSW y alcanza una longitud aproximada de 18 km, se eleva unos 1000 m desde el lecho marino. Las profundidades comprenden desde los -300 metros hasta los -1100 metros en la zona más profunda como se observa en la Figura 7.

Depresión Albuquerque: Ubicada entre los espolones Albuquerque y Wayuu, es una pequeña depresión con una profundidad promedio de -1180 metros. Se extiende desde el sector noreste del monte submarino de Albuquerque hasta el extremo sureste de la isla de San Andrés (Figura 2). Tiene una amplitud de 6 km, un ancho que varía de 3.46 km en su parte más angosta y llega hasta 7.24 km en la zona más extendida. En el perfil observado en la Figura 7 se presenta una variación en profundidad que va desde los -500 metros hasta los -1100 metros.

Espolón Wayuu: Ubicado hacia el sureste de la Isla de San Andrés. Conecta el monte submarino de Isla Cayos de Albuquerque con el monte submarino que configura la Isla de San Andrés. Cuenta con 37,18 km de longitud y promedio de 2.90 km de amplitud. Las profundidades van desde los -300 m en su parte más somera, hasta los -1400 m en la zona más profunda (Figura 7).

Depresión Nutibara: Se encuentra al suroeste de la Isla Cayos Este Sudeste. Se extiende por aproximadamente 55 km desde el sector noreste de Albuquerque hasta el sector noreste de la isla de San Andrés, alcanzando una profundidad máxima de -2180 metros. Su ancho máximo es de unos 7 km. Presenta una profundidad máxima de -1900 metros aproximadamente y un ancho promedio de 8.31 km, en la zona más somera su profundidad es de -1100 metros (Figura 7).

4.2 Anomalías Magnéticas

El estudio geofísico comprende los datos recolectados entre el 20/jun/2018 de junio y el 1/jul/2018, en un área al sur de la Isla de San Andrés, comprendiendo cuatro líneas perpendiculares a la dirección general de las estructuras geológicas, con una longitud máxima de 70,67 km, y cuatro líneas paralelas a estas formaciones, con una longitud máxima de 31 km. Se conservó una disposición geométrica en forma de cuadrícula para proporcionar una buena resolución para un estudio geológico regional. La dirección de las estructuras geológicas y geformas presentan una orientación noreste (Idárraga-García & León, 2019)

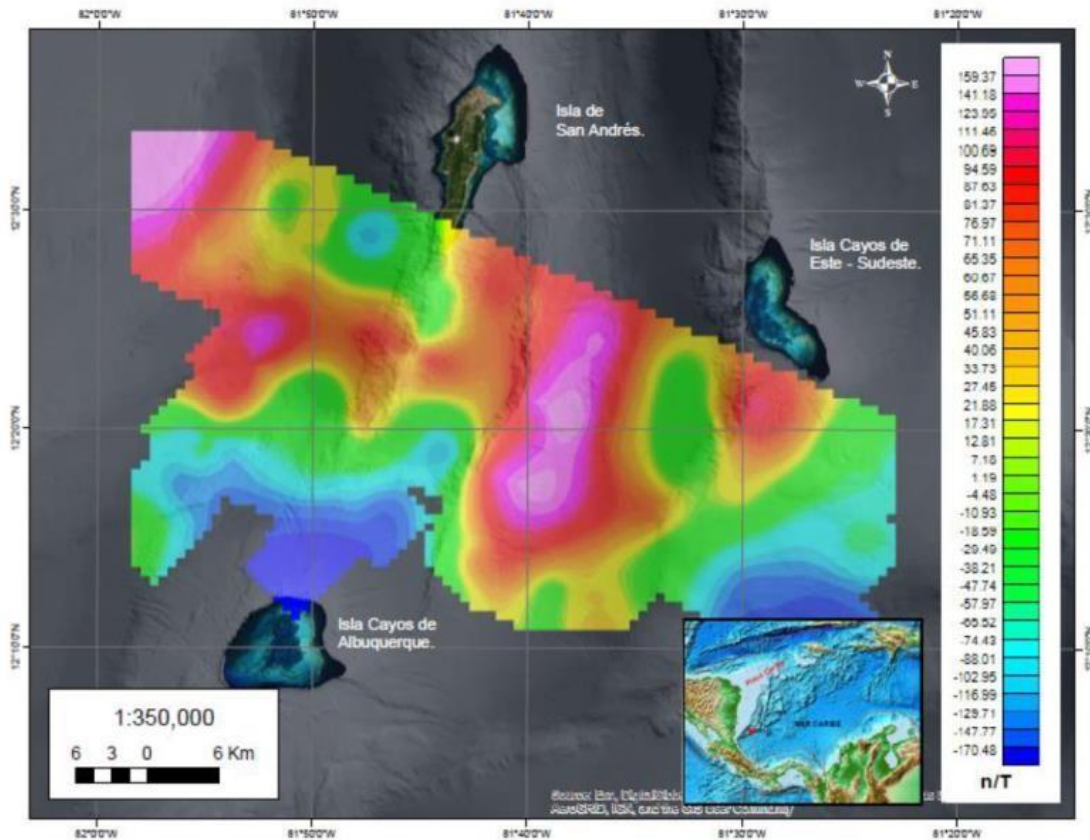


Figura 13. Superficie geomagnética del campo total con correcciones.

Para comparar los datos obtenidos con los datos preexistentes, se realizó una revisión del material bibliográfico y de los datos disponibles de posibles estudios geomagnéticos realizados en la zona. Como resultado, se identificaron dos cruceros de investigación que brindan acceso gratuito a datos

geomagnéticos marinos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA-NCEI, 2024) que están representados en dos líneas de estudio relacionadas con datos geofísicos que contienen sísmica, sonar de barrido lateral y magnetometría. información. El primer archivo descargado de la zona, identificado con el código CH100L12, fue recopilado por el Instituto Oceanográfico Woods Hole de los Estados Unidos (WHOI) en 1971. El segundo archivo de la zona, identificado con el código V2808, fue recopilado por Lamont– Observatorio Terrestre Doherty de Estados Unidos entre 1970 y 1971. Las dos líneas de datos compilados aparecen en la Figura 12.

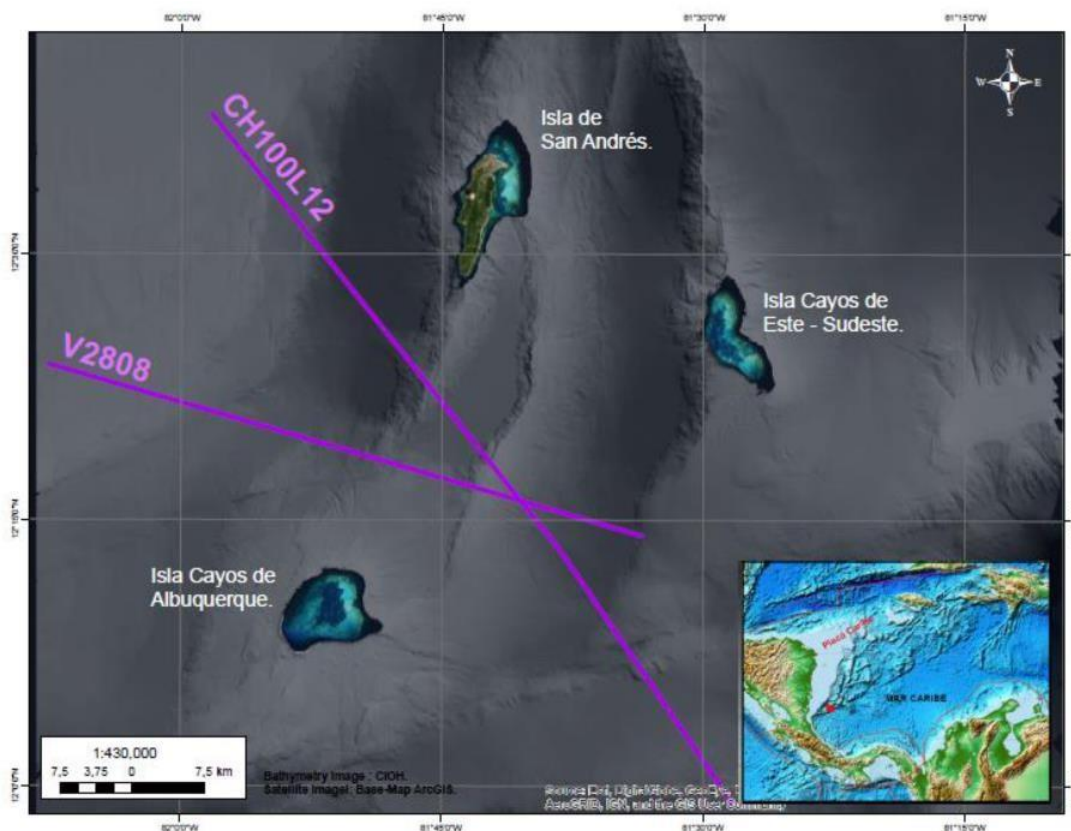


Figura 14. Gráfico de líneas de seguimiento de cruceros oceanográficos que adquirieron datos geomagnéticos en 1970 y 1971.

Teniendo en cuenta que el campo magnético es dinámico y presenta variaciones anuales importantes, se intentó buscar información geomagnética para la zona, encontrando que los únicos datos de libre acceso fueron los descritos anteriormente, con la posible fuente de error de un tiempo transcurrido de alrededor de 50 años entre ambas encuestas. Se han encontrado datos geomagnéticos más actuales sobre el área de

estudio; sin embargo, estos son datos globales obtenidos a través del proyecto Aero magnético global del NCEI (Centro Nacional de Información Ambiental) perteneciente a la NOAA. Son datos Aero magnéticos obtenidos para el estudio y modelización del campo magnético terrestre y tienen una escala de resolución mucho mayor. Además, sus procesos de corrección son diferentes a los datos obtenidos in situ, y concretamente a los obtenidos en los estudios geomagnéticos presentados en este trabajo. Por esas razones, estos datos Aero magnéticos se descartaron para comparar, ya que eran incompatibles en términos de resolución y procesamiento (NOAA-NCEI, 2024). Por otro lado, en este trabajo también se han tenido en cuenta las variaciones que han presentado los datos magnéticos durante el medio siglo transcurrido entre ambos levantamientos. Estas variaciones tienen un componente importante de anomalías debidas a fuentes geológicas que han persistido en el área de estudio durante ese tiempo.

La información magnética descargada de NOAA (NOAA-NCEI, 2024), tiene una extensión MGD77T y contiene las posiciones de la línea de seguimiento y los datos con correcciones para la variación diurna y el IGRF. Para ser vistas en una superficie común, las dos geodatabases se unieron y cartografiaron en WGS 1984 UTM Zona 17N, correspondiente a la proyección del área de estudio (Fernández-Coppel, 2001). Con los datos posicionales y de intensidad magnética se generó una superficie magnética (Figura 10) que muestra anomalías positivas y negativas que varían de $-328,99$ a $+40,48$ nT.

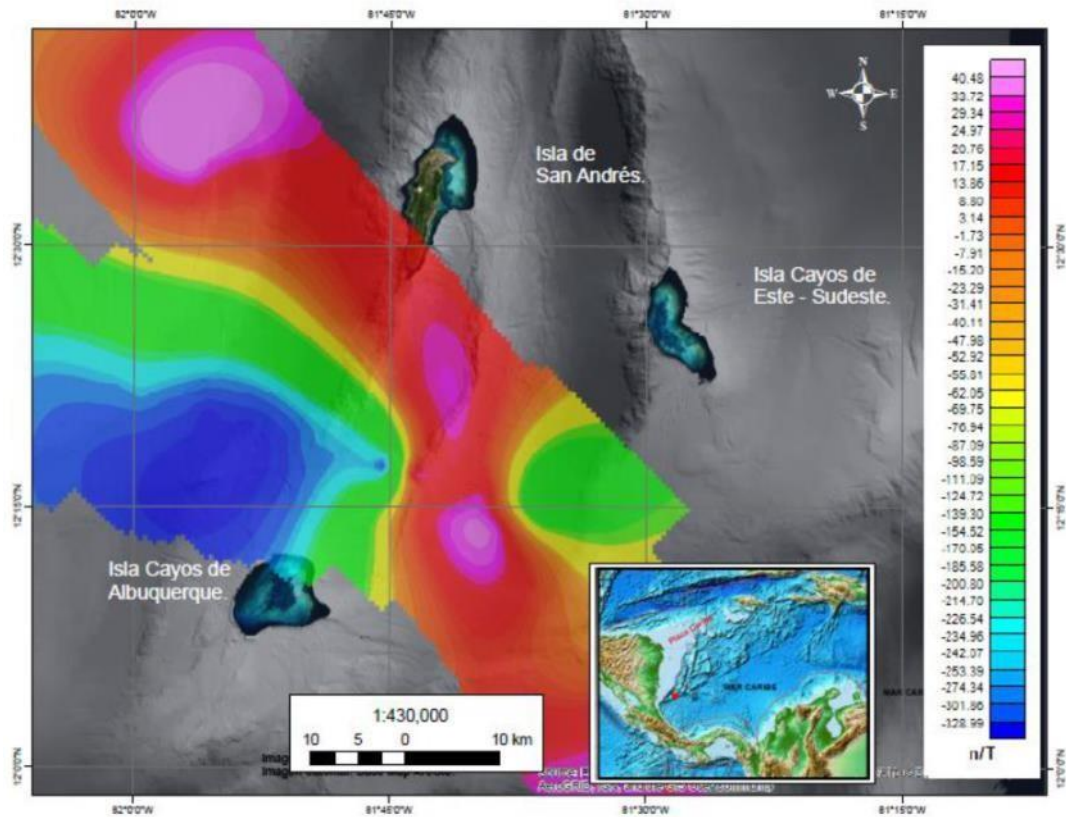


Figura 15. Superficie geomagnética del campo total, correspondiente a datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

Para visualizar la superficie de la Figura 15, se generó una rejilla magnética por el Método de Curvatura Mínima (Seequent inc., 2021), con un tamaño de celda correspondiente a 1000 m en terreno. En esta imagen se observan colores magenta que están asociados con picos magnéticos positivos, los cuales son ubicados hacia el noroeste y sobre la Depresión de Nutibara y el Espolón Wayuu; las geformas se mencionan en la Figura 11.

Los diseños de las dos grillas magnéticas se muestran en la Figura 16, donde las anomalías positivas se identifican de manera similar en el estímulo Wayuu y la depresión de Nutibara, al este y noroeste, en el Promontorio Inferior de Nicaragua. En cuanto a las anomalías negativas destaca la baja magnética localizada en las zonas cercanas a la isla de Cayos de Albuquerque.

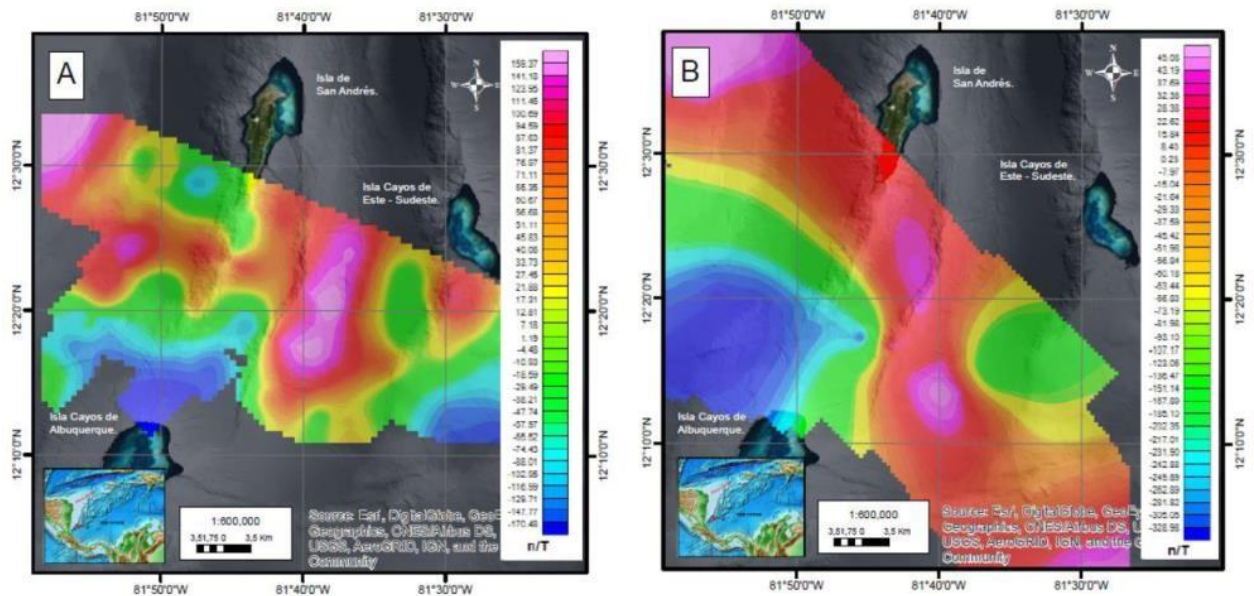


Figura 16. Superficies geomagnéticas del campo total. (A) Campo magnético examinado. (B) Campo magnético de datos descargados de la NOAA.

Es importante mencionar que las escalas de color no están asociadas exactamente con los mismos rangos en las dos superficies, pero sí muy cercanas, recordemos que el color azul siempre está asociado con un magnético bajo y el rosa con un magnético alto (Narváez Medina, 2012). Estas diferencias se deben al factor principal de que se trata de una diferencia temporal entre ambos levantamientos de alrededor de 50 años, y del cual se pueden derivar otros factores que influyen en los datos adquiridos, como la precisión del sensor magnético, la disposición del modelo de campo magnético en 1970, el cual presenta variaciones respecto al de 2018. Esto debido al desplazamiento del campo y al arreglo geométrico utilizado para cada caso.

Comparativamente, en la Figura 16 A, los picos magnéticos están dentro del rango de $-170,48$ nT a $159,37$ nT, mientras que en la Figura 16 B, los mínimos y máximos magnéticos oscilan entre $-328,98$ nT y $45,08$ nT, lo que indica una variación de $329,85$ nT en la Figura 16. A y $374,06$ nT en la Figura 16 B.

Utilizando la calculadora magnética NOAA (NOAA-NCEI, 2024) y trabajando con los datos magnéticos observados para los años 1970 y 2018, se identifican pequeñas pero significativas diferencias en todas las variables de medición, como la inclinación con $1^{\circ}46'47''$, la declinación con $5^{\circ}2'41''$, y el campo magnético representado por $4415,7$ nT. Estos resultados muestran una variación del campo magnético a lo largo de la línea de tiempo. Es importante resaltar que estas anomalías identificadas en el área de estudio son de

naturaleza geológica, lo que infiere que estarán presentes como fuentes de anomalías magnéticas por un período de tiempo muy largo.

Las anomalías magnéticas significativas, que se pueden ver en la Figura 13, marcadas en fucsia/magenta, corresponden a un máximo magnético. En la Figura 10 se puede observar que esta anomalía corresponde a la geomorfología de la depresión de Nutibara, y que podría generarse por algún tipo de deposición mineral que se pueda encontrar, asociada a materiales ferrosos, o también a material volcánico de alta contenido de hierro en comparación con su entorno geológico. Por otro lado, se observan bajas magnéticas al norte de la isla Cayos de Alburquerque, lo que parecería una contradicción, ya que su morfología es propia de un monte submarino, y, por tanto, su respuesta magnética debería ser alta (Idárraga-García & León, 2019; Milliman, 1969; Geister & Díaz, 2007)

Los resultados de este trabajo son muy importantes para la comunidad científica, ya que se trata de un área donde existe una inmensa falta de datos. Los datos obtenidos en la prospección, realizada en 2017 por el CIOH, 50 años después de los primeros datos obtenidos por la NOAA. Estos son datos muy importantes tomados in situ, con una alta resolución que los hace muy fiables y precisos, y son únicos en la zona del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Hemos realizado una búsqueda exhaustiva de datos y estudios geomagnéticos en el área de estudio y, aunque no se han encontrado nuevos trabajos, se han realizado trabajos similares o relacionados en el entorno del área de estudio: mapeo magnético de la región del Caribe norte utilizando datos magnéticos marinos de GEODAS (Catalán & Martos, 2022), trabajos sobre gravedad y campo magnético referidos a prospectos de hidrocarburos en la Cuenca de Tobago, descripción e interpretación geológica en las Islas Providencia y Santa Catalina, y muchos otros relacionados con tectónica y vulcanismo.

El mapa de campo magnético total en el área de estudio, se observan las intensidades magnéticas que oscilan entre -292 nT y 205 nT. La grilla de información de la Figura 13, muestra un máximo magnético en color magenta, localizado en los límites del Espolón Wayuu y la Depresión Nutibara. Por el contrario, la zona cercana a la Isla de los Cayos Alburquerque está representada por un mínimo magnético, mostrado en color azul.

La reducción de polos reafirma el valor máximo de las anomalías positivas con alineación noreste, entre el Espolón Wayuu y la Depresión de Nutibara, este valor se expresa en un valor de 343,30 nT (ver Figura 17).

Los bajos magnéticos de color azul están representados por valores de hasta -361,61 nT localizados hacia la Isla de los Cayos Alburquerque. Se observa que los bajos magnéticos tienden a aumentar con la disminución de la profundidad, al igual que la geomorfología de la isla Cayo Alburquerque.

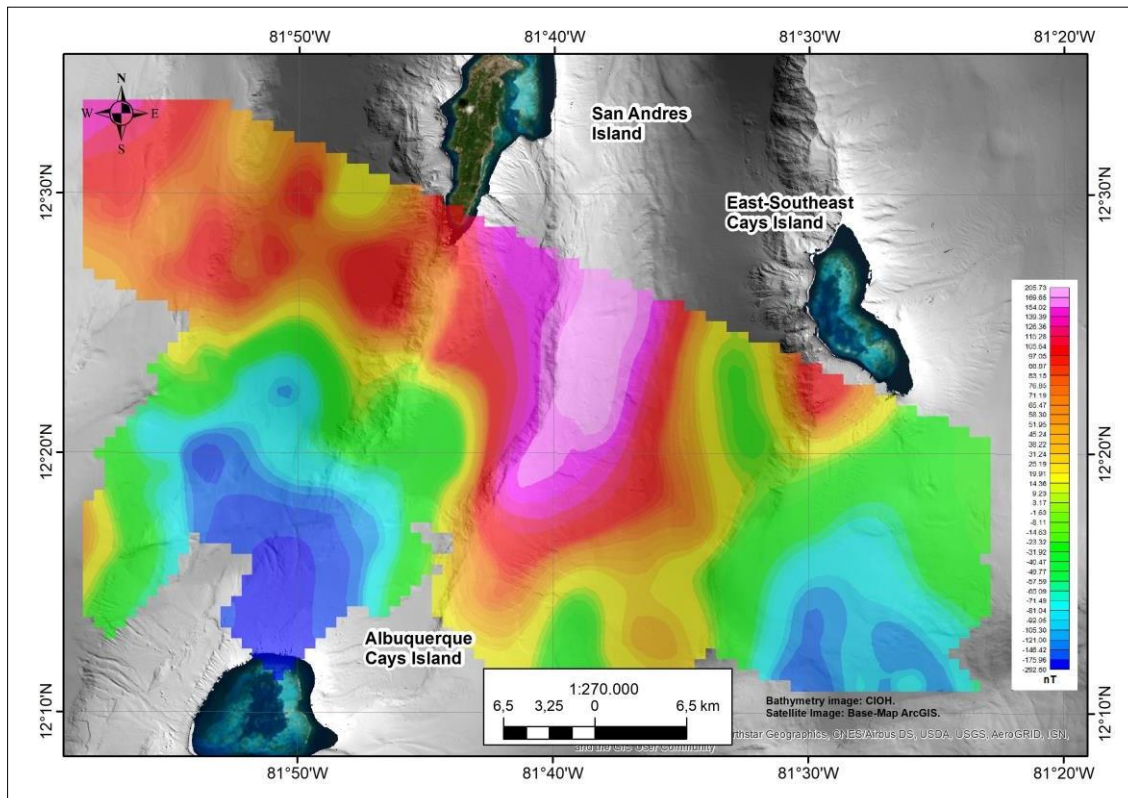


Figura 17. Mapa de reducción de polos magnéticos de la zona de estudio. Superficie magnética que refleja el procesamiento de la corrección de posicionamiento por efectos latitudinales.

El filtro analítico de señal mostrado en la Figura 18 preserva los máximos magnéticos en el lineamiento noreste sobre la Depresión de Nutibara, pero más pronunciados hacia la parte sur de la Depresión de Nutibara. Se visualizan nuevos máximos magnéticos hacia la parte occidental de la cuadrícula de forma muy puntual y centralizada. Los valores magnéticos superficiales oscilan entre 0,00118 nT/m y 0,0869 nT/m, como se observa en la Figura 18.

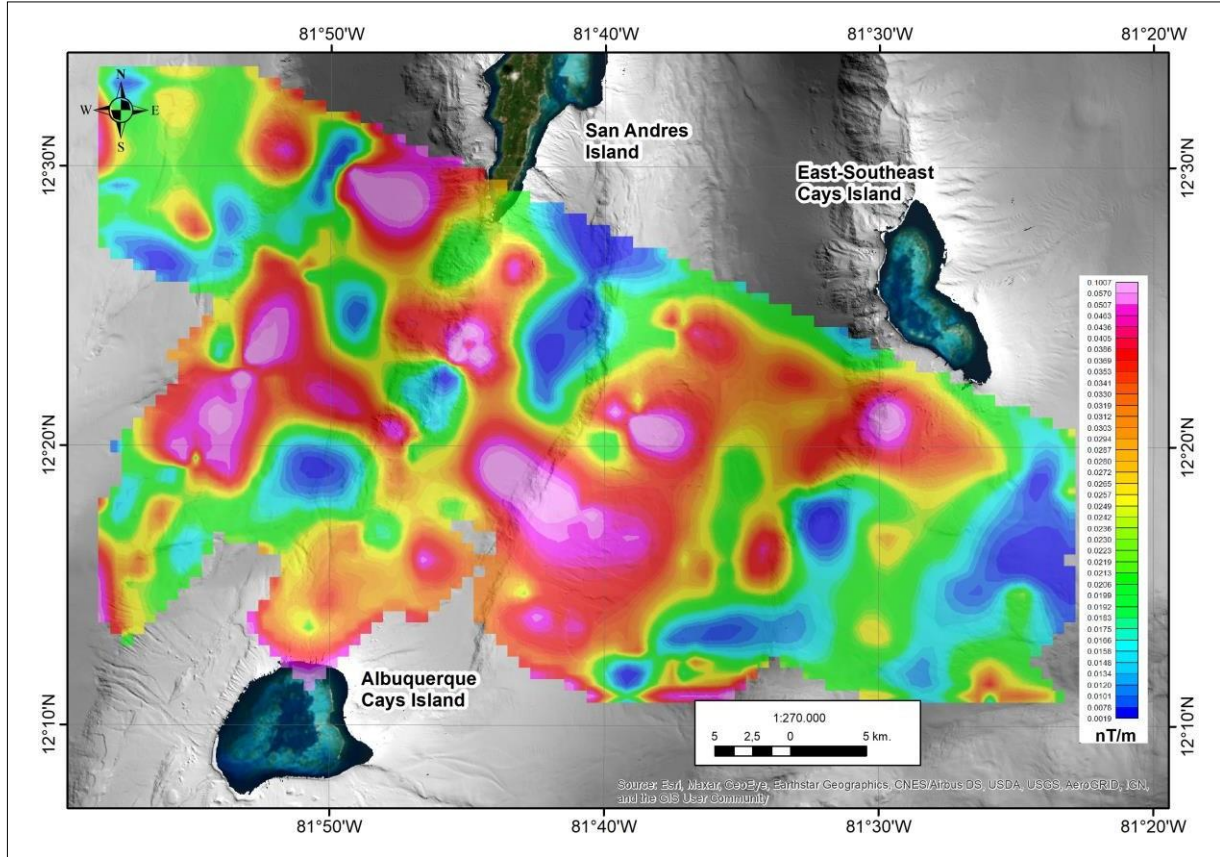


Figura 18. Mapa magnético de la señal analítica del campo residual. El mapa refleja el procesamiento de centralización y definición de bordes de anomalía residual.

El filtro de la primera derivada vertical de la inclinación del campo magnético residual muestra una línea de cuatro máximos magnéticos en amarillo sobre el Espolón Wayuu en dirección noreste con valores de hasta 0.095 nT/m y uno al sur de la Isla de los Cayos Este-Sureste representado por un valor de 0.062 nT/m. Se observa un mínimo magnético de -0,0360 nT/m sobre la depresión de Nutibara, que coincide con la zona deposicional más gruesa de la cuenca. Por tanto, se puede observar cómo los focos de anomalías magnéticas en profundidad se representan en superficie a través de la batimetría, evidenciada por la diversidad geomorfológica (Figura 12).

Una vez obtenida la malla de separación de componentes residuales, se procedió al filtrado de derivadas verticales (Geometrics, 2005). La Figura 19 muestra las tendencias de los máximos magnéticos más marcadas en dirección noreste sobre la zona de la Depresión de Nutibara, así como sobre la Depresión de Providencia y el Espolón de Alburquerque, zonas con fallas visibles en la batimetría.

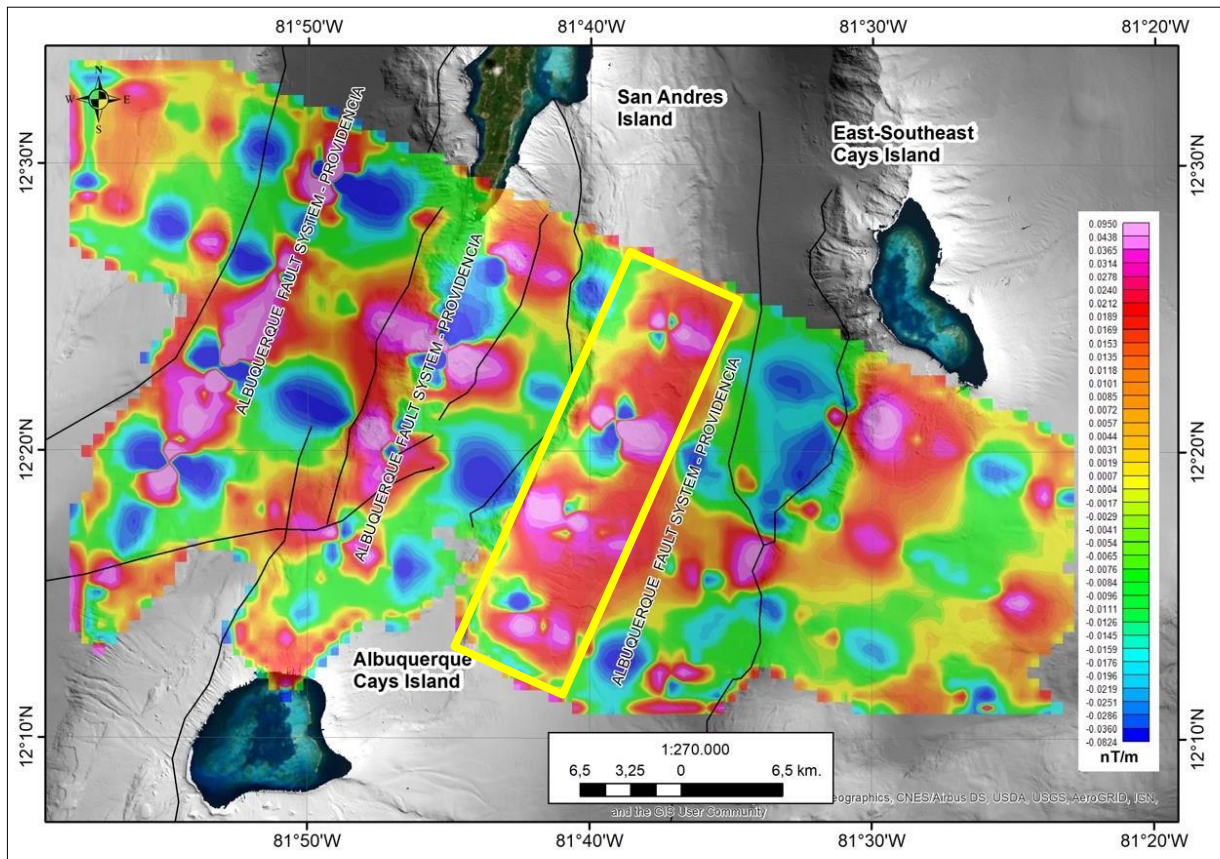


Figura 19. Superficie magnética que refleja el procesamiento de la derivada z parcial del campo magnético total. Se muestran la batimetría (gris), las fallas superficiales (negro) y la malla resultante de las derivadas del campo residual.

A la grilla generada a partir de la reducción de polos, se aplicó la separación de la componente regional mediante filtrado interactivo, para resaltar las anomalías magnéticas generadas por fuentes más alejadas de la superficie. Esto indicó la tendencia de los máximos magnéticos con valores de 226,21 nT sobre la Depresión de Nutibara. La anomalía positiva está ligeramente centralizada, pero sigue manteniendo un lineamiento hacia el noreste. Por otro lado, los bajos magnéticos aún se conservan hacia la isla Cayo Albuquerque. (Figura 20).

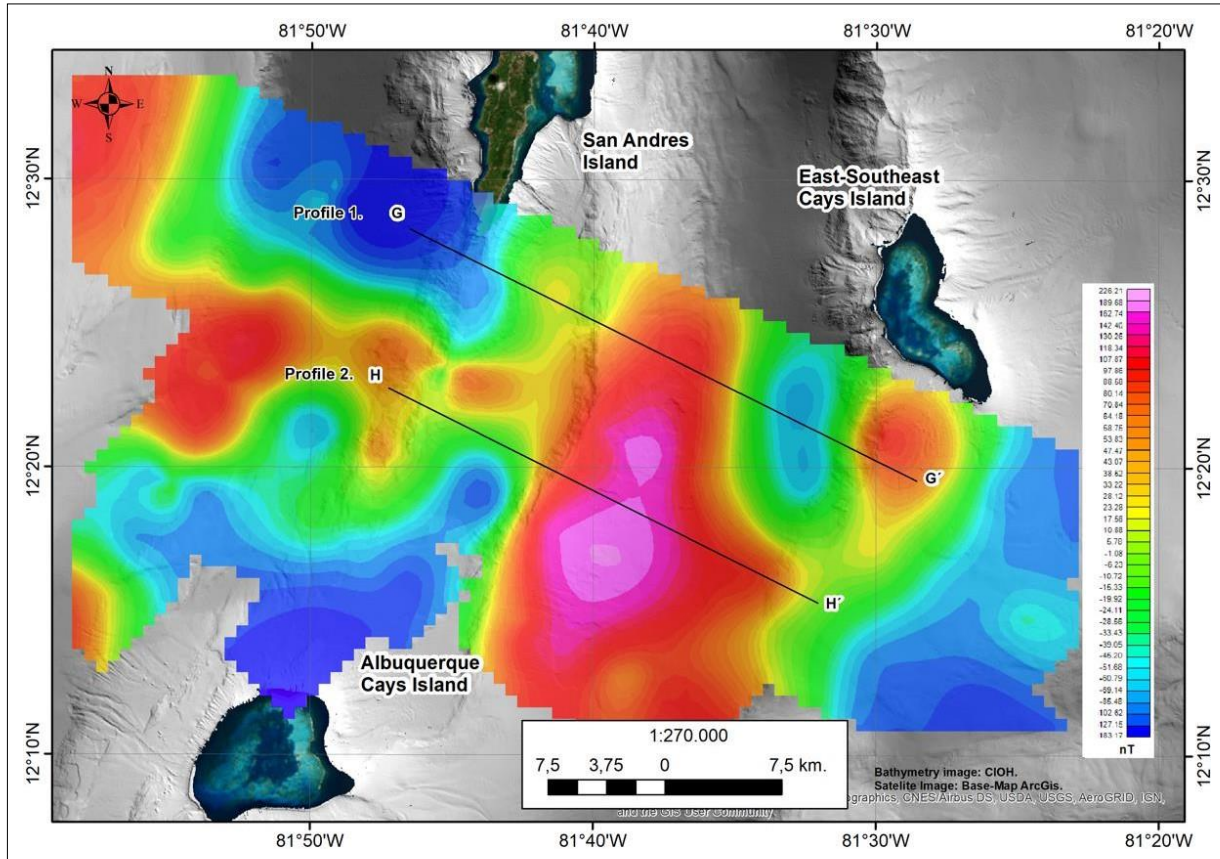


Figura 20. Mapa que muestra la separación regional de las fuentes más profundas. El Perfil 1 y el Perfil 2 se muestran en la Figura 24, que sirven para comparar el comportamiento del relieve submarino con el campo regional mostrado en esta figura.

4.3 Análisis Espectral

Se realizó un análisis espectral del mapa correspondiente a la separación residual (Figura 20): El primer segmento (rojo), corresponde al aporte de la fuente profunda, o regional, con frecuencias menores a $0,12 \text{ km}^{-1}$, y que por lo tanto genera anomalías de longitud de onda mayores a 4 km hasta 5 km. El segundo segmento (azul) corresponde a la fuente intermedia, con valores de frecuencia entre $0,12 \text{ km}^{-1}$ y $0,26 \text{ km}^{-1}$, correspondientes a anomalías de longitud de onda entre 4 km y 2,5 km respectivamente. El tercer segmento (verde), asociado a las fuentes más someras, para frecuencias entre $0,26 \text{ km}^{-1}$ y superiores a $0,56 \text{ km}^{-1}$, generando anomalías de longitud de onda entre 2,5 km y longitudes de onda inferiores a 0,5 km (Figura 21).

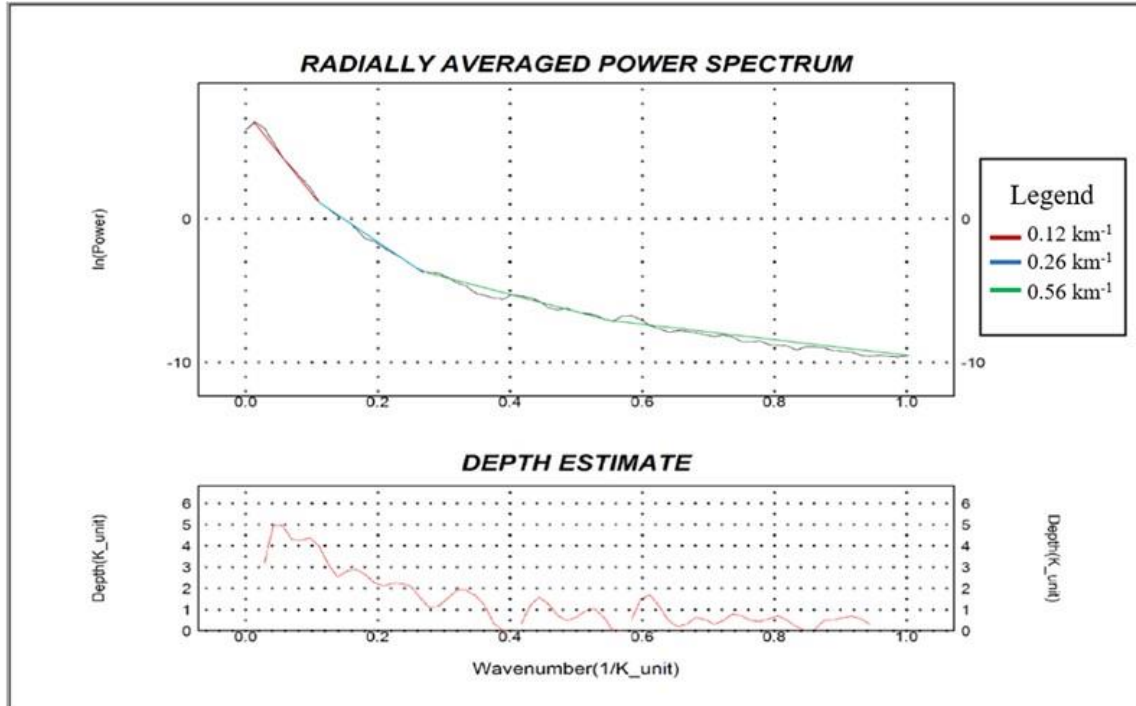


Figura 21. Visualización de la longitud de onda de corte ($K=0,14$). Ventana que muestra el cambio de pendiente. Se interpreta como segmentos con rangos de longitud de onda que representan la profundidad de las fuentes. Arriba: Muestra la intensidad de potencia generando un espectro de potencia promediado radialmente a partir de una imagen obtenida por Transformada Rápida de Fourier (superficie de separación residual). Abajo: Estimación de la profundidad de la fuente en kilómetros a partir del espectro de potencia promediado radialmente de las anomalías.

4.4 Deconvolución de Euler (DDE)

Parte de la superficie de datos obtenida mediante la DdE muestra anomalías alargadas ligadas a los lineamientos de sentido noreste observados en la figura 16, formas asociadas a cuerpos alargados magnetizados. Suponiendo que estos son posibles cuerpos magnéticos, se especifica un índice estructural de "1.0". El método de DdE localizado comienza calculando la señal analítica (Geometrics, 2015) (figura 5), encontrando sus picos y luego usando estas ubicaciones para proceder con la estimación de las profundidades (Pérez Carrillo de Albornoz, 2002). La superficie estimada se presenta en paleta de colores en la figura 18.

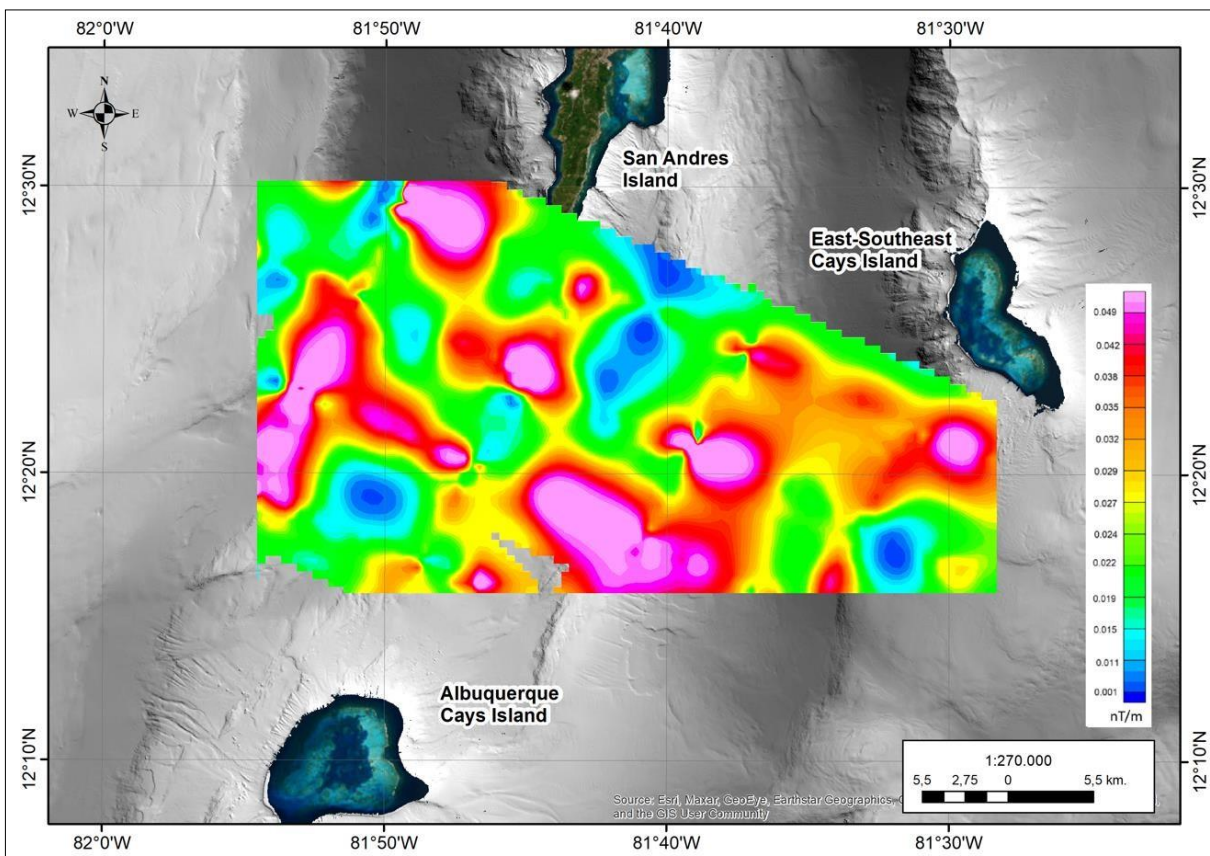


Figura 22. Visualización del mapa de Señal Analítica de la Deconvolución de Euler

Posteriormente se obtuvo el mapa de la figura 23, en donde se trazaron soluciones representadas sobre la superficie de la señal analítica de la DdE en escala de grises con símbolos para presentar los siguientes resultados: de color azul las fuentes de anomalías más someras ubicadas en profundidades que van hasta los 1000 metros. De color verde las fuentes ubicadas en las profundidades que van desde los 1000 hasta 2000 metros. En amarillo los cuerpos que están un poco más profundos, entre los 2000 y 3000 metros de profundidad, y finalmente en un tamaño de simbología más grande de color rojo, las fuentes que están a profundidades mayores de los 3000 metros.

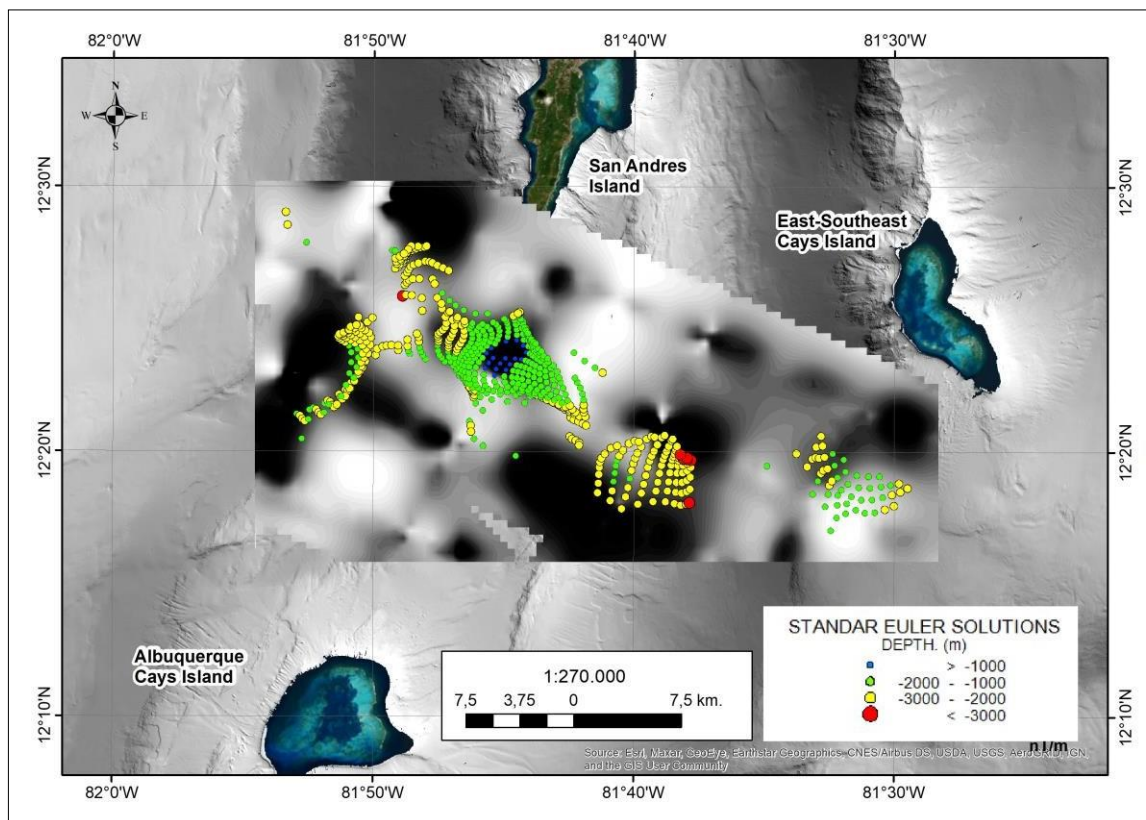


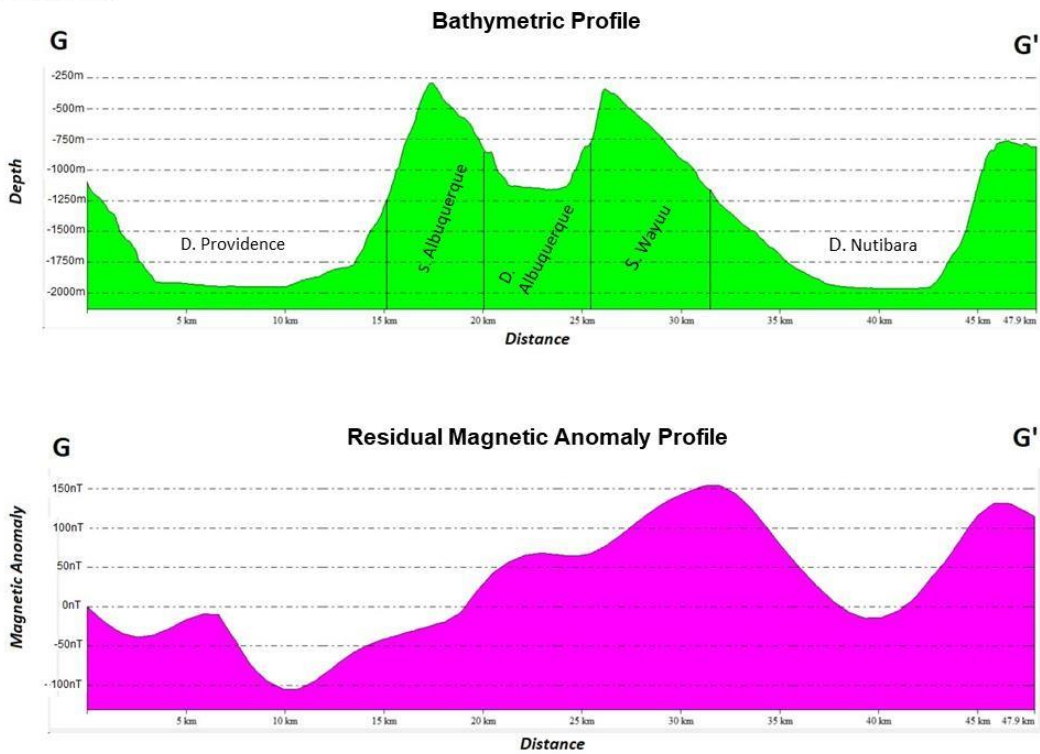
Figura 23. Visualización de la estimación de profundidad de fuentes generadoras de anomalías, realizado por el método de Deconvolución de Euler (DdE), sobre el mapa de Señal Analítica de la figura 5 en escala de grises.

4.5 Perfiles

Con el fin de establecer relaciones entre la batimetría y el magnetismo, se realizan dos perfiles (ver Figura 20) perpendiculares a las características del fondo marino, el cual presenta características lineales de tendencia noreste.

Al realizar el perfil 1 de la Figura 24, sobre las dos superficies, se observa una relación entre la forma del relieve y la curva de anomalía magnética residual, donde el límite entre la Depresión Nutibara y el Espolón Wayuu presenta el alto magnético más representativo del área de estudio (106.3 nT), también existe relación en los dos bajos magnéticos que se localizan sobre las dos depresiones (San Andrés -145.6 nT y Nutibara con -62.2 nT).

Profile 1.



Profile 2.

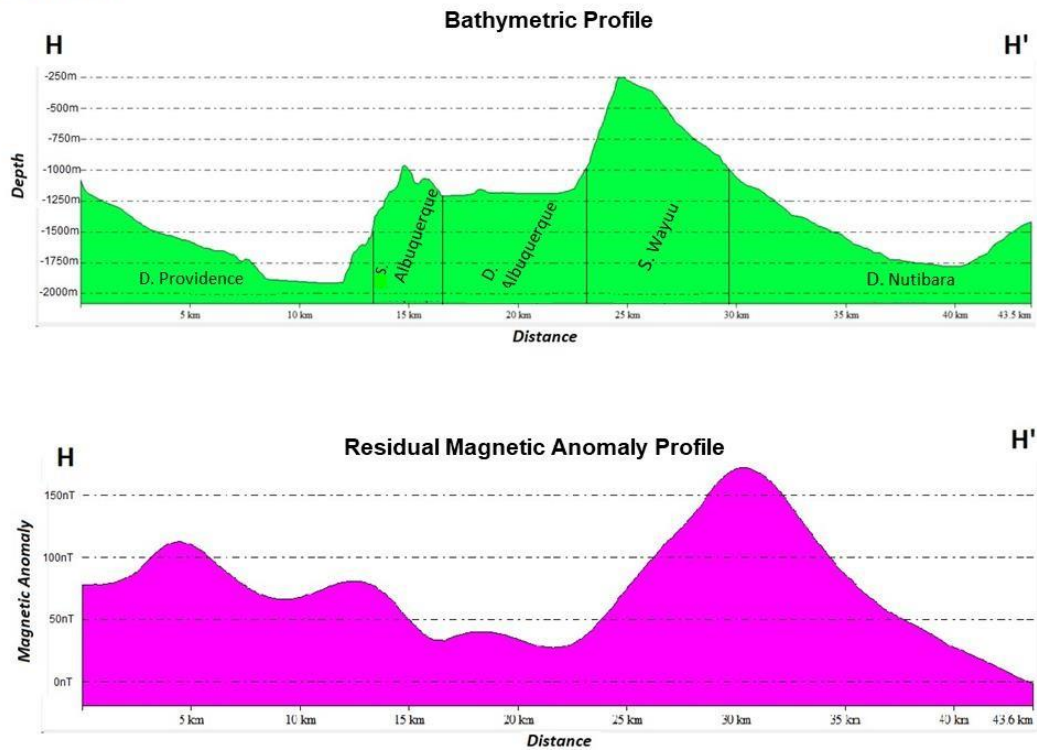


Figura 24. Correlaciones de los perfiles 1 y 2 entre los datos batimétricos y magnéticos obtenidos a partir de la superficie del campo residual y la batimetría.

En el perfil 2 de la Figura 24, se observa una relación entre la batimetría y la curva descrita por la señal magnética, evidencia que permite concluir que al menos los atolones, islas y bancos coralinos del sur del archipiélago pueden haberse originado como volcanes o geofomas con alto contenido ferroso (Geister & Díaz, 2002), los mínimos magnéticos son fuertemente pronunciados sobre las depresiones de la Isla de San Andrés y Cayos Alburquerque con valores de -62.03 nT y -77.30 nT respectivamente. La subsidencia y el recubrimiento simultáneo con carbonatos en las zonas someras sobre las cumbres volcánicas desde el Cenozoico hasta el Cuaternario permitieron la formación de los bancos someros y atolones del archipiélago, lo que puede ser la razón de esta baja respuesta magnética. En la zona del Espolón Wayuu se conserva el máximo magnético más pronunciado con 171,65 nT (Oviedo-Prada et al., 2024). Finalmente, la superposición de la información magnética de la zona con superficies gravitatorias de alta resolución ayudaría en el futuro a comprender de forma más aproximada la conformación de estos cuerpos insulares (Diaz et al., 1996).

4.6 Datos de baja resolución y libres NOAA

En el documento metodológico del trabajo presentado en este artículo (Oviedo et al., 2020), se compararon nuestros datos con datos de sondeos obtenidos del repositorio de datos magnéticos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en la misma zona de estudio. A pesar del largo intervalo de tiempo entre ambos sondeos, casi 50 años, no se observaron diferencias significativas para las variables magnéticas analizadas. Finalmente, los resultados muestran pequeñas diferencias entre los datos magnéticos obtenidos para los años 1970 y 2018.

La información magnética descargada de NOAA (NOAA-NCEI, 2024) tiene una extensión MGD77T y contiene las posiciones de la línea de seguimiento y los datos con correcciones por variación diurna y el IGRF. Para ser visualizadas en una superficie común, las dos geodatabases fueron unidas y cartografiadas a WGS 1984 UTM Zona 17N, correspondiente a la proyección de la zona de estudio. Con los datos posicionales y de intensidad magnética, se generó una superficie magnética (Figura 11) presentada en el artículo metodológico, donde las anomalías positivas se identifican de manera similar en el espolón Wayuu y en la

depresión Nutibara, al este y noroeste, en la cota baja de Nicaragua. En cuanto a las anomalías negativas,

destaca el bajo magnético localizado en las zonas cercanas a la isla de Cayo Albuquerque. (Oviedo et al., 2020). Dentro de los metadatos de la NOAA no se indica que se hayan realizado filtros de reducción de polos o corrección de posicionamiento.

4.7 GeoMapApp de baja resolución y datos libres

En la Figura 25 se realizaron análisis adicionales sobre la misma localización del perfil N°1 (G-G') - Figura 24, con datos libres disponibles en el servicio GeoMapApp en su versión 3.7.1 donde se superpusieron sobre el mismo perfil la grilla de datos de Topografía Global Multi-Resolución (GMRT), que compila datos editados de sonares Multihaz provistos por instituciones de todo el mundo y fusionados en una grilla actualizada de datos globales de elevación. Con la malla magnética del modelo EMAG2 Versión3 de 2017 (basada en anomalías magnéticas terrestres con una resolución de 2 minutos de arco) y compilada a partir de mediciones magnéticas por satélite, navales y aerotransportadas.

Dado que los datos disponibles libremente son limitados en términos de resolución, constituyen una buena base solo para un contexto general, también se observa que el modelo magnético EMAG2 y el modelo batimétrico GMRT no están directamente relacionados y que, por el contrario, representan curvas diferentes de las presentadas en la Figura 25, se deduce que la falta de detalle y resolución de los levantamientos hidrográficos y geofísicos proporcionan una información muy limitada y que, de hecho, si se desea un análisis más profundo, es necesario adquirir datos de alta resolución con métodos de levantamiento adecuados que permitan el procesamiento y la elaboración de productos finales de carácter investigativo.

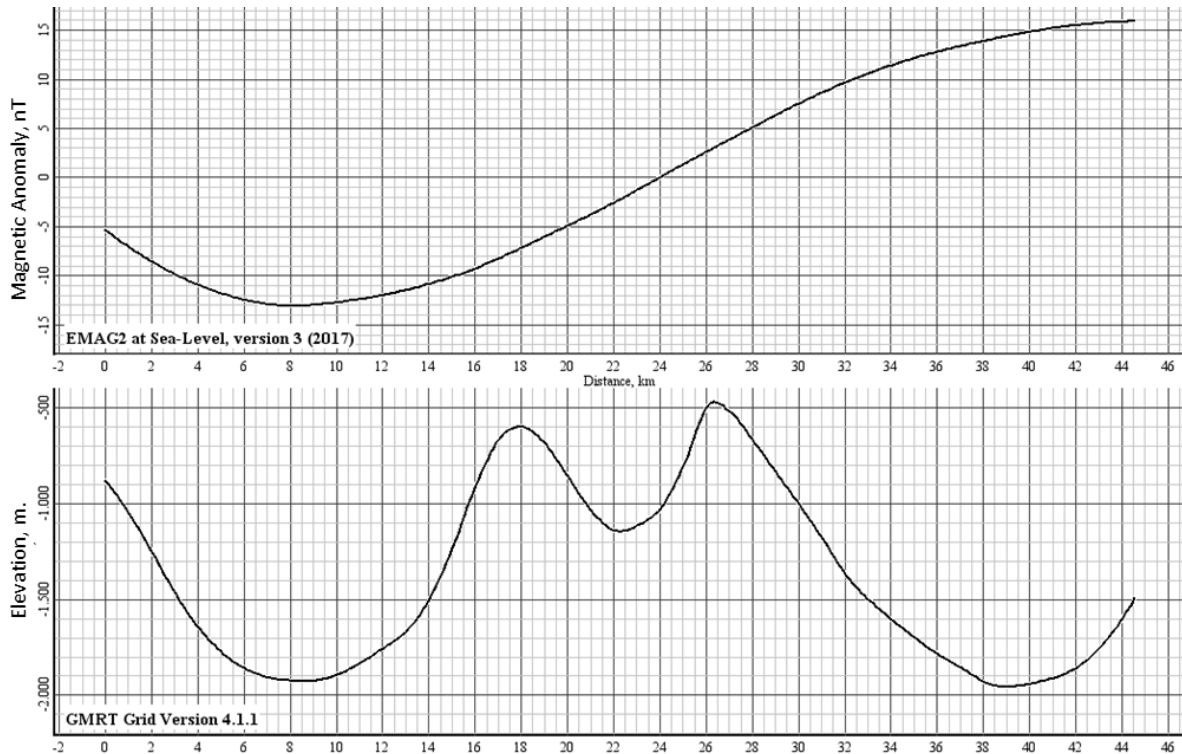


Figura 25. Perfil de comparación de batimetría y magnetometría 3. Perfiles de correlación entre los datos batimétricos y magnéticos obtenidos a partir de los datos libres en GeomapApp.

También se puede decir que la mayor información presentada en la figura 20 permite establecer relaciones de anomalías magnéticas generadas por las geoformas presentes en el área de estudio y que regionalmente con menor resolución con la información libre en la figura 25 se observa una anomalía positiva hacia el este, la cual coincide con un pico positivo en la anomalía magnética en la ubicación de la depresión de Nutibara, estableciendo así que la anomalía magnética sigue presente aún en el modelo EMAG2 pero no es posible asociarla directamente con una referencia geomorfológica presente en el fondo marino.

4.8 Otros autores

Los máximos magnéticos obtenidos en las cuadrículas de datos sobre la isla de los Cayos del Este-Sureste y sus proximidades proceden de formaciones que se elevan desde el fondo marino hasta profundidades

de más de 1000 m. Pueden estar asociados a una formación de origen ígneo o basaltos que podrían estar alojados cerca de la superficie del fondo marino generando variaciones positivas en las lecturas magnéticas (Figura 13). Aparentemente poseen un basamento volcánico, indicando que las anomalías magnéticas detectadas en los alrededores de la Isla de San Andrés, así como en la Isla de los Cayos Este- Sureste se deben a atolones e islas volcánicas, siendo consistente con los resultados de estudios previos (Mauffret & Leroy, 1997; Osorio-Granada et al., 2022). Prueba de ello es una muestra volcánica dragada de la isla Cayos Albuquerque (Díaz et al., 1996) así como rocas volcánicas de la isla Providencia (Geister, 1992). Esta información presenta una base geológica para los resultados obtenidos en este estudio, donde las fuentes más profundas permanecen con los máximos magnéticos más representativos y parecen estar localizadas a aproximadamente 5 km de profundidad, de acuerdo con el análisis espectral de los datos adquiridos. Adicionalmente, (Carvajal Arenas, 2017) presenta modelos de correlación gravedad- magnetismo con perfiles sísmicos donde indican que la alta amplitud de la anomalía magnética soporta una magnetización como un origen volcánico (Milliman, 1969).

Por otro lado, se observan bajas magnéticas sobre la isla de los Cayos Albuquerque, que pueden estar asociadas a la subsidencia y cobertura simultánea de estos volcanes por capas carbonatadas de aguas someras desde el Cenozoico hasta el Cuaternario, que dieron lugar a la formación de los bancos someros y atolones del archipiélago (Milliman, 1969; Geister & Díaz, 2007). Además, Milliman y Supko (1968) (Pindell et al., 2006) obtuvieron los primeros perfiles geomagnéticos durante un crucero a la zona de San Andrés. Al superponer esta información a la topografía submarina, se revela una relación, particularmente pronunciada en la Isla de los Cayos Este-Sureste. Esto indica posibles conos volcánicos profundos bajo una cubierta caliza de los atolones y la isla de San Andrés. El origen volcánico de los conos se ve apoyado además por un fragmento basáltico dragado a 700 m de profundidad cerca de la Isla de los Cayos Albuquerque durante la misma campaña.

Otros autores como (Leroy et al., 2000) han llevado a cabo estudios de correlación de datos magnéticos y batimétricos en el Caribe, más explícitamente en la Fosa de las Caimán donde han podido interpretar que la historia de la Fosa de las Caimán está directamente relacionada con la cinemática global de las placas, con eventos de convergencia. Estas conclusiones se extraen de la interpretación de modelos magnéticos sintéticos superpuestos y correlacionados con la topografía del fondo, indicando que se trata de una zona de divergencia oceánica que comenzó a principios del Eoceno.

Dentro de su análisis se puede corroborar, al igual que en nuestra zona de estudio, que los picos magnéticos, ya sean positivos o negativos, coinciden con los picos altos y bajos presentes en el relieve submarino, estableciendo que existe una relación entre ambas fuentes de información, lo que coincide también con el principio del método geofísico, que establece que puede ser utilizado para identificar zonas de divergencia oceánica y zonas de liberación de energía como los volcanes.

4.9 Publicaciones resultado de la Investigación

Como resultado de la investigación y de esta Tesis Doctoral se han publicado los siguientes artículos científicos y se han enviado a congresos internacionales las siguientes comunicaciones:

4.9.1 Artículos Científicos.

A New Method for the Collection of Marine Geomagnetic Information: Survey Application in the Colombian Caribbean

El Centro de Investigación Oceanográfica e Hidrográfica, parte de la Dirección General Marítima (DIMAR) de Colombia, ha estado avanzando activamente en la investigación en geofísica marina, con un enfoque en geomagnetismo, perfilado de sub-fondos y sonar de barrido lateral. El geomagnetismo destaca como la técnica más desarrollada. DIMAR ha ideado un método para adquirir datos geomagnéticos en aguas colombianas, que no solo contribuye al conocimiento científico, sino que también apoya los esfuerzos de soberanía nacional.

Las aplicaciones clave de los métodos geomagnéticos incluyen la localización de tuberías y placas metálicas, la detección de municiones enterradas, la identificación de sitios arqueológicos y la caracterización de estructuras geológicas. Para probar este método, se realizó un levantamiento de datos geomagnéticos en una cuadrícula cerca de la Isla de San Andrés, en el noroeste de las aguas colombianas. Los resultados se compararon con datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) obtenidos casi 50 años antes en la misma área.

Notablemente, a pesar del intervalo prolongado entre los levantamientos, no se observaron

diferencias significativas en las variables analizadas. Los datos magnéticos recopilados en 1970 y 2018 mostraron discrepancias insignificantes en parámetros como la inclinación, la declinación y el campo magnético total. Estas pequeñas diferencias pueden deberse a factores geológicos o variaciones en los métodos de adquisición y procesamiento de datos utilizados con el tiempo.

- Oviedo Prada, K., Jigena Antelo, B., Otálora Murillo, N., Romero Cózar, J., Contreras-de-Villar, F., & Muñoz-Pérez, J. J. (2020). A new method for the collection of marine geomagnetic information: survey application in the Colombian Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 10.

Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea.

El escrito describe un estudio hidrográfico y geofísico realizado en el sur del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (ASAPSC) en el Mar Caribe colombiano. El estudio, llevado a cabo en 2017 y 2018, utilizó datos de alta resolución adquiridos por el Centro de Investigación Oceanográfica e Hidrográfica del Caribe (CIOH).

Los datos hidrográficos fueron procesados y filtrados según los estándares de la Organización Hidrográfica Internacional (IHO), mientras que los datos geomagnéticos fueron procesados, corregidos y filtrados para mejorar la interpretación. El análisis tuvo como objetivo caracterizar el relieve submarino, analizar las anomalías geomagnéticas e identificar varias formas de relieve de origen volcánico.

El análisis espectral de las anomalías geomagnéticas reveló cuerpos altamente magnéticos en aguas profundas y anomalías magnéticas residuales fuertemente asociadas con la morfología del lecho marino. Se detectaron máximos magnéticos correspondientes a elevaciones del basamento y conos volcánicos. El análisis también indicó que las fuentes magnéticas más superficiales estaban dentro de los primeros 500 metros de profundidad, mientras que las fuentes más profundas estaban entre 4 y 5 kilómetros de profundidad.

La validez de los datos geomagnéticos se confirmó mediante análisis de deconvolución de Euler,

estableciendo además una relación directa entre las anomalías magnéticas y la batimetría del lecho marino. Esta confirmación reforzó la teoría del origen volcánico de las islas en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

- *Oviedo-Prada, K., Muñoz-Pérez, J. J., Escobar-Olaya, G., Osorio-Granada, A. M., Howden, S., Torrecillas-Lozano, C., ... & Jigena-Antelo, B. (2024). Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea. *Geocarto International*, 39(1), 2321365.*

4.9.2 Comunicaciones enviadas a congresos y/o eventos científicos.

Capacidades del Servicio Hidrográfico Colombiano, para sensoramiento remoto geofísico

Presentado en: II Curso de Verano CEI-Mar: 'Costas de Andalucía 2020'

En los últimos años, el Servicio Hidrográfico Nacional Colombiano, perteneciente a la Dirección General Marítima (DIMAR), ha realizado importantes esfuerzos para llevar a cabo investigaciones científicas multidisciplinarias en el territorio marino-costero colombiano. Además de mejorar equipos y talento humano para fortalecer sus capacidades hidrográficas, se ha centrado en ampliar sus conocimientos en investigación geofísica marina. Específicamente, ha desarrollado técnicas en geomagnetismo, perfilación del subsuelo marino y sonar de barrido lateral.

Como resultado de este trabajo, se han generado múltiples productos y soluciones que se aplican en diversos campos, como proyectos geológicos, desarrollo de prospección arqueológica subacuática, operaciones de búsqueda y rescate, así como investigación científica y reconocimiento del territorio marítimo colombiano. Todo esto tiene como objetivo posicionar a Colombia como líder regional en investigación oceanográfica y geofísica marítima, en aras de fortalecer la soberanía y el conocimiento en esta área.

- *Oviedo, K., Otálora, N., Jigena Antelo, B., Muñoz Pérez, J. J., & Contreras de Villar, A. (2020). Capacidades del Servicio Hidrográfico Colombiano, para sensoramiento remoto geofísico.*

Implementación del método geomagnético marino en el conocimiento del territorio marítimo colombiano.

Presentado en: II Curso de Verano CEI-Mar: 'Costas de Andalucía 2020'

El Servicio Hidrográfico Nacional Colombiano, bajo la dirección de la Dirección General Marítima (DIMAR), ha desarrollado en los últimos años el método geomagnético marino para impulsar la investigación científica en el territorio marítimo colombiano. Este avance ha implicado la adquisición de sensores de última tecnología y la capacitación de personal especializado. Entre los usos más significativos de esta técnica se destacan la localización de tuberías submarinas, la detección de buques hundidos, la identificación de sitios arqueológicos de interés y la caracterización de estructuras geológicas.

- *Oviedo, K., Jigena Antelo, B., Muñoz Pérez, J. J., Otálora, N., & Contreras de Villar, F. (2020). Implementación del método geomagnético marino en el conocimiento del territorio marítimo colombiano.*

Capítulo 5

5. CONSIDERACIONES PARA FUTURAS PUBLICACIONES

5.1 Magnetometría Local (Puntual para Naufragios)

Para llevar a cabo la planificación de la adquisición de datos geomagnéticos marinos de manera local en búsqueda de naufragios, o pecios es indispensable tener en cuenta tres aspectos fundamentales:

Las dimensiones del objeto que se busca caracterizar, la planeación de las líneas o arreglo geométrico debe contemplar un espaciamiento entre líneas menor al valor de la medida longitudinal del objeto que se busca caracterizar, esto, con el fin de tener mayor rigurosidad con el detalle del pecio que se busca o que se quiere modelar. Por ejemplo, si se busca modelar un naufragio de una embarcación de 50 metros de eslora, lo ideal es que el espaciamiento entre líneas sea inferior a este valor, adicionalmente una separación entre líneas de al menos $1/3$ de 50 metros aseguraría tener una red de datos más detallada que brinda más y mejor información en la prospección geofísica – arqueológica.

El material de composición: es fundamental tener en cuenta la composición del material, como se mencionó anteriormente los sensores magnéticos tendrán lecturas del campo magnético generado por el objeto en el fondo, pero esta lectura se verá influenciada por la cantidad de material ferromagnético que contenga el naufragio, así como de su forma y dimensión

La distancia del sensor al pecio: debido a que la señal puede enmascarse o puede no ser percibida debido a la distancia...es decir la intensidad magnética emanada por el objeto o pecio puede ser demasiado débil y no reflejarse en las lecturas del sensor si este se encuentra muy alejado de dicho objetivo, por lo tanto, debe asegurarse que la distancia del sensor magnético al fondo sea constante y prudencial teniendo en cuenta la tabla de sensibilidad del sensor magnético utilizado.

Una vez utilizada en objetivos regionales, se ha puesto a prueba la metodología de adquisición geomagnética para objetivos locales en búsqueda y prospección de objetos alojados en el fondo que

podieran ser susceptibles de ser patrimonio cultural sumergido en profundidades intermedias y someras correspondientes a profundidades menores a los 100m. Teniendo en cuenta estas variables se diseñó un arreglo geométrico para realizar un levantamiento geomagnético en una zona de la bahía de Cartagena (Castillo grande), en donde existen varios naufragios registrados y en donde se busca caracterizar uno en especial.

5.2 Buscaminas USS Peacock AM46

Construido para la Armada de Estados Unidos por el astillero Bethlem Staten Island, el USS Peacock AM-46 hace parte de las 48 embarcaciones de la clase avefría, las cuales se caracterizaron por ser desarrolladas para la detección de minas submarinas. Su botadura se realizó en Nueva York el 8 de abril de 1919, pero permaneció allí hasta que fue dado de baja el 14 de febrero de 1920, fecha en la que empezó sus días como remolcador de salvamento bajo el mando de la junta de transporte marítimo hasta el 24 de agosto de 1940 cuando naufragó al chocar con el mercante SS Hindanger en la Bahía de Cartagena, Colombia.

Los avefría eran dragaminas oceánicos con casco de acero capaces de realizar operaciones de barrido de minas ofensivas, alcanzaban velocidades de hasta 14 nudos con 840 toneladas de desplazamiento, estaban equipados con cañones AA, con esloras aproximadas a los 55 metros estas embarcaciones contaban con un sistema de propulsión de dos calderas de 200psi y una maquinaria de vapor alternativa.

Debido a su material de composición esta embarcación naufragada sirve de base para poner a prueba la metodología aplicada anteriormente para objetivos geológicos regionales, es por ello, que se realiza una campaña para caracterizar magnéticamente el USS Peacock AM-46.

Se empieza la ejecución de la metodología en la Bahía de Cartagena, realizando la planeación de las líneas de adquisición y de control, sobre el naufragio conocido como el Pavo Real con coordenadas 10°23'21.1333" N, 75°32'37.3594" W con el fin de establecer los primeros productos de la firma espectral que genera un el naufragio.

Se planea levantar la información batimétrica y magnetométrica del Polígono con las siguientes coordenadas:

Tabla 3. Tabla de coordenadas de polígono de levantamiento en USS Paacock AM46

	LATITUD.	LONGITUD.
P1	10.387323°	-75.543820°
P2	10.389188°	-75.545557°
P3	10.391346°	-75.543327°
P4	10.389562°	-75.541564°

La Estación base fue ubicada en la Escuela Naval Almirante Padilla, allí se identificó un lugar en donde la interferencia de objetos ferromagnéticos es muy baja en un radio de 30 metros. La posición de la estación base es Latitud: 10° 23' 29.436" (N) y Longitud: 75° 31' 55.258" (W)

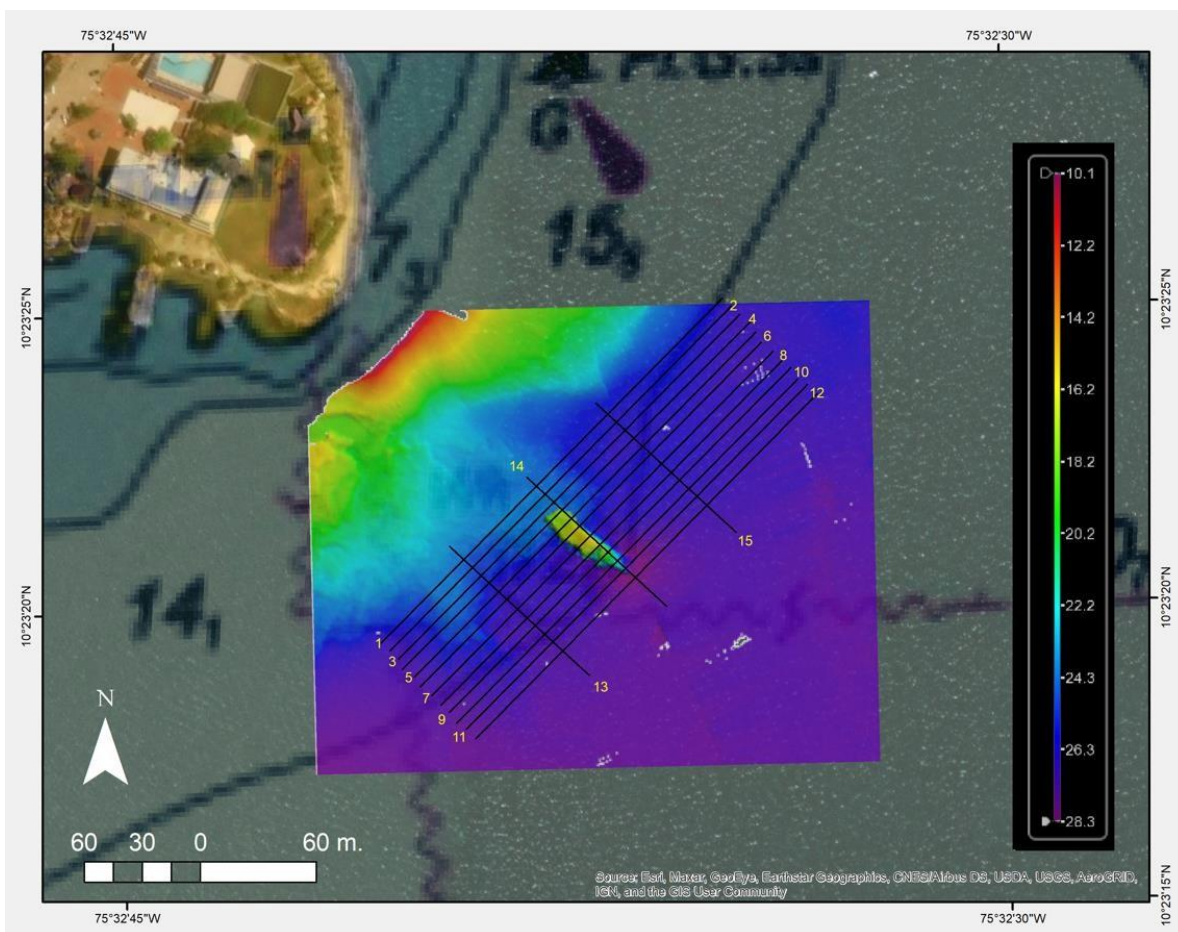


Figura 26. Líneas planeadas de adquisición geomagnética sobre el USS Paacock AM46.

Para realizar la planeación se tiene en cuenta la información batimétrica del área de estudio, así como la información de la carta náutica. Se sugiere que esta información sea oficial y suministrada por los Servicios Hidrográficos Nacionales. Se procede a establecer las líneas de adquisición teniendo en cuenta los parámetros estipulados con anterioridad para obtener la siguiente planeación en el software Hypack: se establecen un total de 12 líneas de adquisición con un ángulo de inclinación de 45° con respecto al norte, separadas por 15 metros y 3 líneas de control que pasan específicamente por encima de la embarcación, esto con fines meramente comparativos e ilustrativos de identificación de firmas espectrales.

El área de estudio presenta una profundidad promedio de 19 metros, el naufragio sobresale del lecho marino aproximadamente 6 metros en su zona más somera, se presenta en la imagen con color rojo y amarillo, la profundidad mínima en la bahía más cercana al naufragio se encuentra hacia noroeste sobre la línea de costa de Castillo grande en el club naval de oficiales de la armada. Con la batimetría se puede apreciar también la abertura en el casco del naufragio muy cerca de los tanques de combustible que hasta la fecha no han sido extraídos.

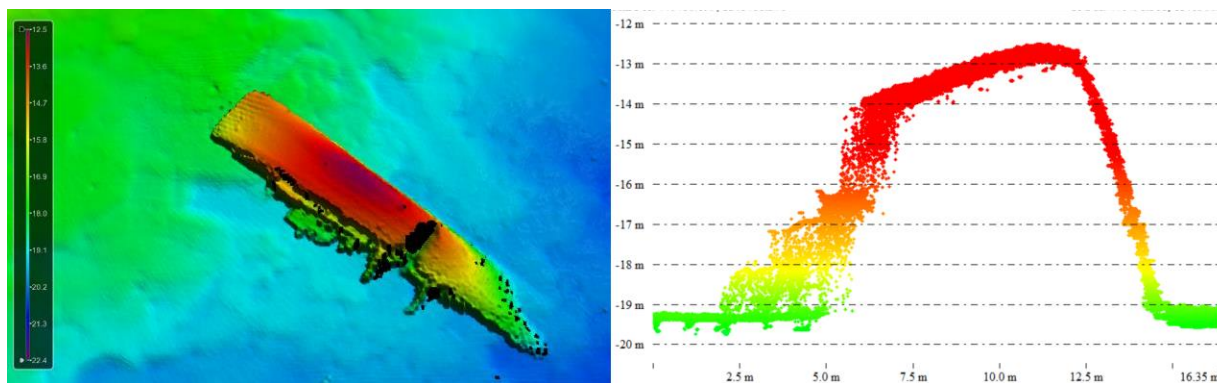


Figura 27. Imagen batimétrica del USS Peacock AM-46

La adquisición de los datos fue llevada a bordo de la embarcación Isla Fuerte, orgánica de la Dirección General Marítima, y que tiene como base la ciudad de Cartagena de Indias. Para el sistema de posicionamiento se utilizan equipos Trimble R7 y para la adquisición geofísica es utilizado el sensor magnético G-882 de la casa Geometrics, para el sistema de arriado, con cableado de 300 metros. Para este levantamiento el layback utilizado es de 17m con el fin de asegurar la navegación y la integridad del sensor magnético en el fondo.

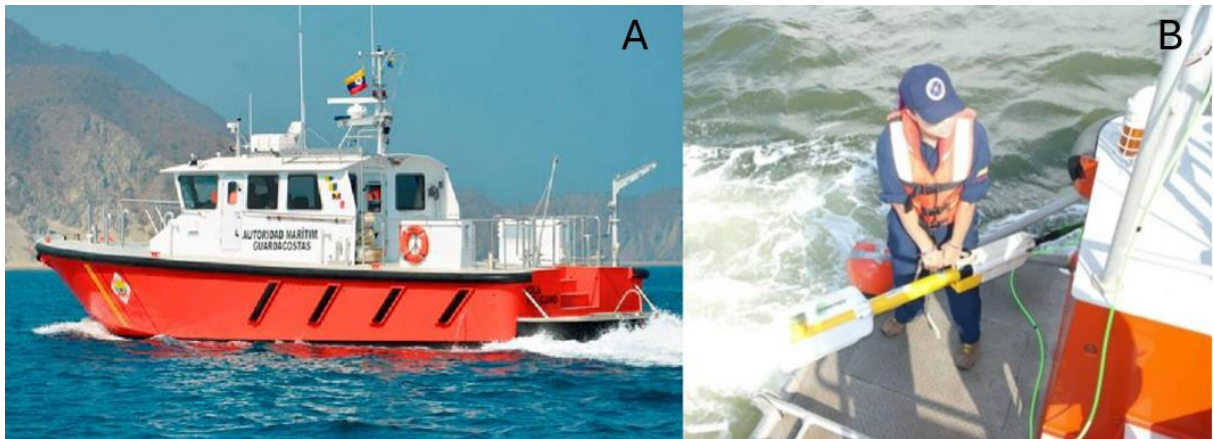


Figura 28. A: Embarcación tipo Pilot en donde se llevó a cabo el levantamiento geomagnético. B: Magnetómetro marino G-882 utilizado para el levantamiento de datos magnéticos en la Bahía de Cartagena de Indias.

De los datos adquiridos con el sensor geofísico se obtuvieron valores de anomalía mínimos negativos de 33802,7 nT y valores máximos de anomalías positivas de 34187,2 nT. Estos valores magnéticos se encuentran dentro de los rangos típicos para esta zona magnética ecuatorial, según el modelo de referencia IGRF. Con el levantamiento geomagnético se logró cubrir la totalidad de la zona de interés de una manera detallada.

De los datos adquiridos aun sin procesar se obtiene un rango de diferencia de lectura de 384,5nT lo cual indica que la fuente generadora de anomalía presenta un alto contenido ferroso, esto, puede dar indicios de una estructura de hierro o de acero. Adicionalmente, al verificar la telemetría del sensor magnético, se comprueba que la profundidad promedio del sensor fue de 8,31metros, muy cercana a la profundidad mínima del pecio que está cerca de los 12 metros de profundidad en su parte más elevada.

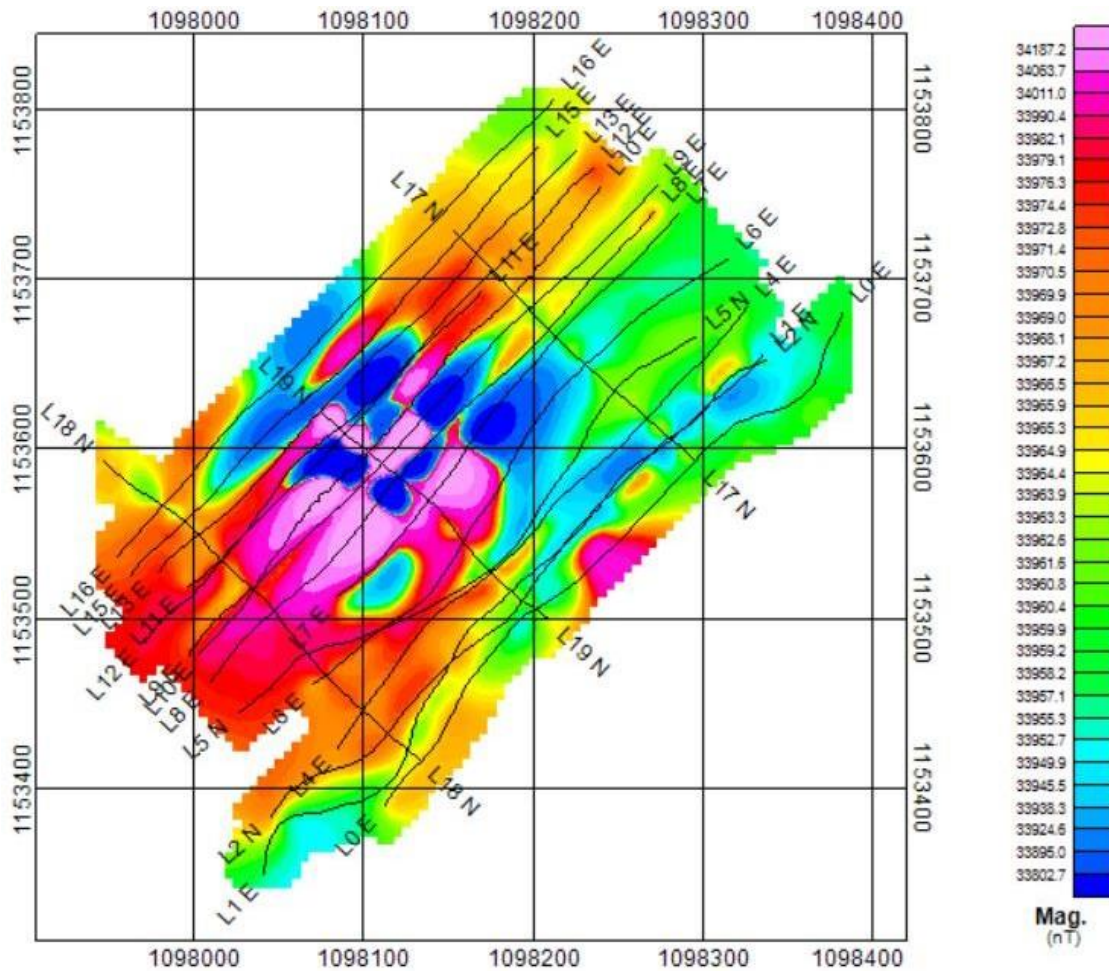


Figura 29. Mapa de anomalías magnética de datos brutos del USS Pacock AM-46

A continuación, nos centraremos en analizar algunas de las líneas de adquisición que se obtuvieron justo encima de pecio, se busca analizar la curva que describe la anomalía magnética derivada de la fuente generadora, para este ejercicio se utilizaran los datos derivados de los análisis 2D y 3D realizados en el software Oasis montaj sobre la grilla de los datos brutos.

Para la línea 8 de levantamiento, se presentan una visualización del programa Oasis Montaj, en donde se han seleccionado los datos brutos que describen a señal de un dipolo magnético, representados por un polo negativo 33335,328 nT y un polo positivo de 34613,512 nT presentando una lectura de 1,278nT aproximadamente, esta lectura representa en nano Teslas (nT) un campo magnético muy grande

representado por un dipolo y una fuente magnética con un alto contenido de minerales ferromagnéticos. Se observaron uno o más picos en cada transecto que cruzaba una única anomalía, pero las relaciones espaciales entre esos picos no eran muy evidentes, Muchas anomalías de pecios tienen también picos secundarios de amplitud, además de su dipolo principal. Los picos secundarios suelen tener menor amplitud que el dipolo principal y cubren un área menor que los picos del dipolo principal.

La duración de la anomalía es una medida común y válida utilizada por los arqueólogos para distinguir las posibles anomalías de naufragio de las que se cree que han sido causadas por escombros. Por ejemplo, Linden y Pearson (2014) considerarían una anomalía significativa si tiene una amplitud de al menos 50 nT y una anchura de 19m o más. Las dimensiones horizontales de las anomalías del naufragio y de los restos se solapan considerablemente, especialmente cuando se trata de pecios con casco de madera. por sí sola no es especialmente útil para discriminar entre ambas. (Inventory et al., 2004).

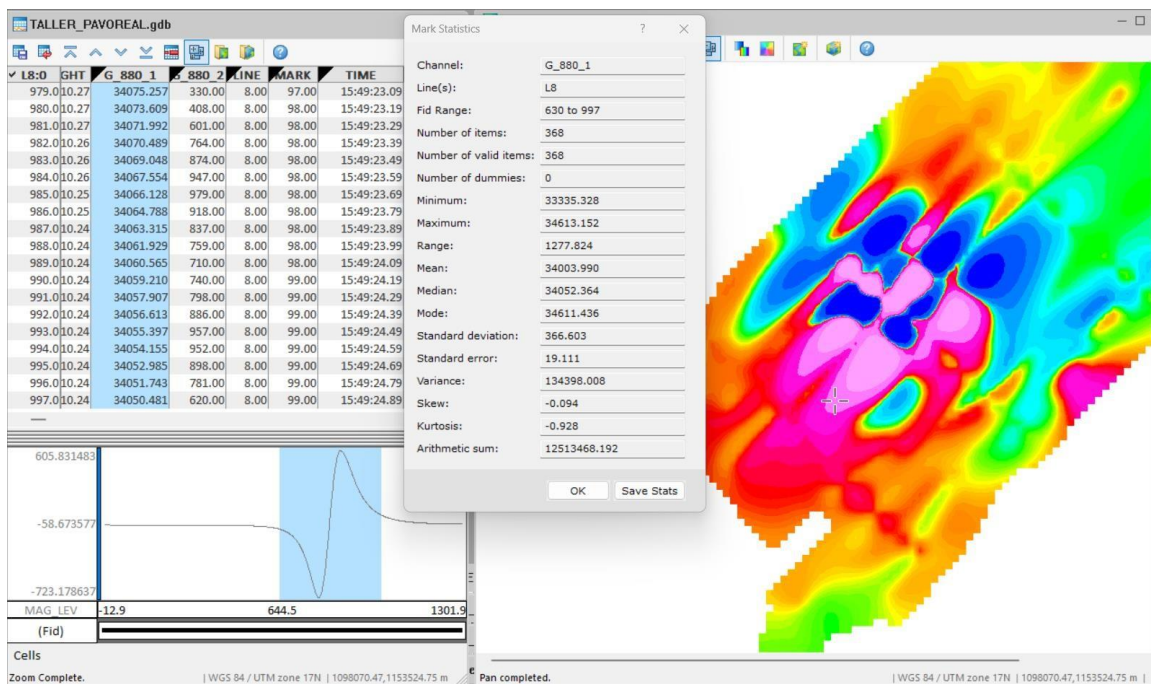


Figura 30. Línea 8 del levantamiento geomagnético del USS Pacock AM-46.

A continuación, para la línea 8 de levantamiento, se presenta una visualización del programa Oasis Montaj, donde se han seleccionado los datos brutos que describen a señal de un dipolo magnético. Este dipolo está representado por un polo negativo de 33249,641 nT y un polo positivo de 34858,109 nT presentando una

diferencia de lecturas de 1608nT aproximadamente. Esta lectura representa en nano Teslas un campo magnético muy grande representado por un dipolo y una fuente magnética con una alto contenido de minerales ferromagnéticos.

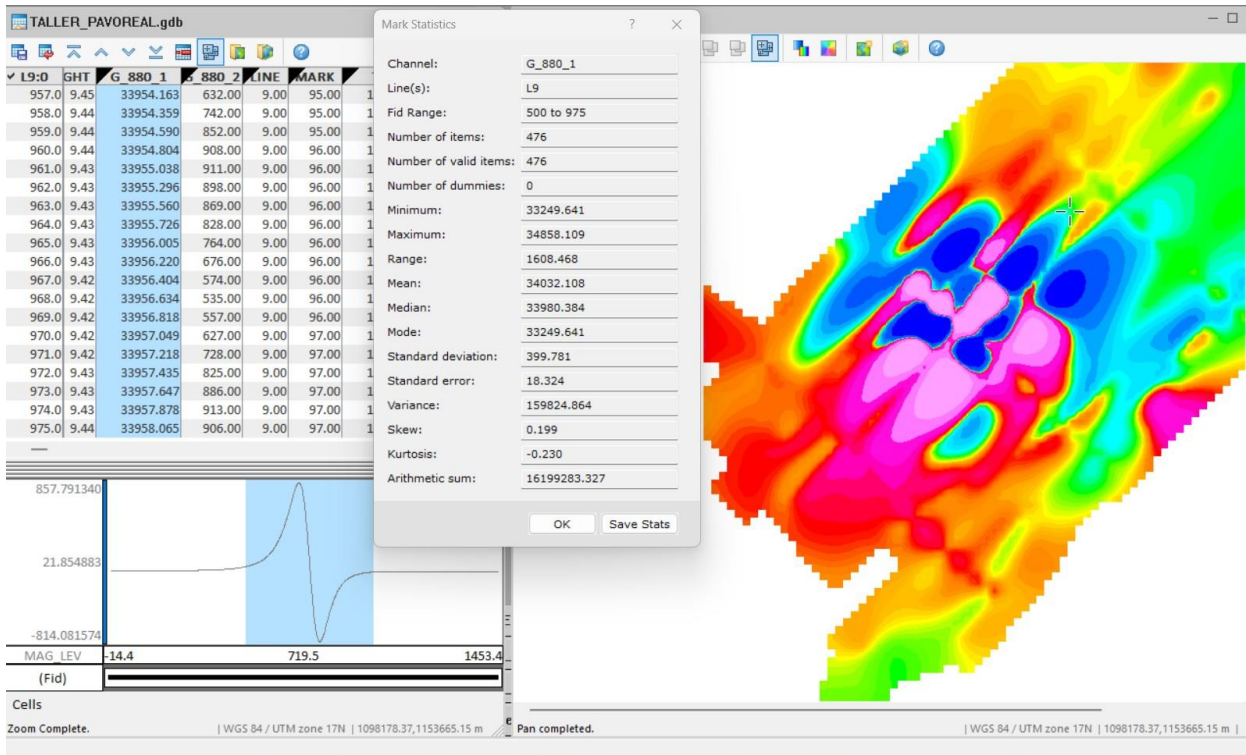


Figura 31. Línea 9 del levantamiento geomagnético del USS Pacock AM-46.

De las dos imágenes se destaca que, sin importar la dirección de la línea de levantamiento siempre tenemos la lectura del polo positivo y negativo sobre la misma posición, adicionalmente que los valores de anomalía para ambos casos están en el rango de los 1200 nT. Esta es una lectura bastante significativa debido a las condiciones propias del pecio, su material de composición, la profundidad a la que se encuentra alojado y la profundidad promedio en la que se encontraba el sensor magnético a la hora de la adquisición magnética sobre el pecio. Es relevante, y para tener en cuenta que el espacio ocupa un ancho promedio de 9 metros.

Luego del procesamiento de los datos aplicando las diversas correcciones y filtros se obtiene la señal analítica, de la que se obtiene valiosa información. Recordemos que este proceso de filtrado permite realizar un reborde y centraliza la anomalía magnética para mejorar su proceso de interpretación y visualización. En

la figura 32 se observan valores en nT/m que varían desde los 0,2nT/m hasta los 63,6nT/m. Adicionalmente, se realiza una medición de la amplitud de la anomalía generada por esta fuente encontrando una distancia aproximada de 250m. Esto representa un campo de anomalía casi 20 veces la forma física de la fuente ya que mencionamos con anterioridad que en promedio el pecio mantiene un ancho entre 9m y 12m, en la zona donde se ubican los mástiles.

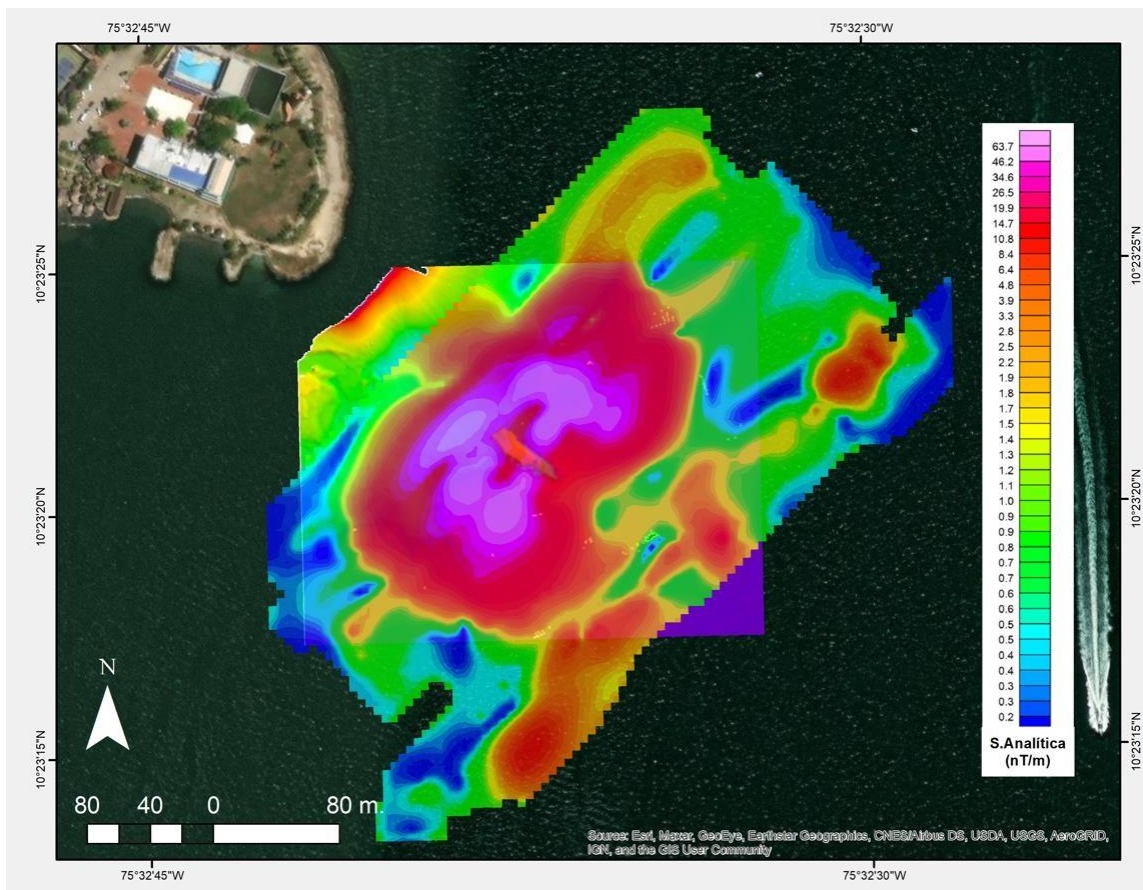


Figura 32. Mapa de anomalías magnética de señal analítica sobrepuesto a la batimetría de fondo del USS Paccok AM-46.

5.3 Salmedina

El banco de Salmedina se localiza entre las latitudes 10°21'15" y 10°23,10" Norte y las longitudes 75°38'05" y 75°41,45" Oeste. Están conformados por cinco elevaciones, a saber: banco Salmedina, banco

Burbujas, banco Ukura, banco Kubina y banco Ygio, que suman una extensión de 10.5 km² de los cuales 4.45 km² corresponden a las plataformas más altas (Domínguez et al., 2010)

La adquisición geofísica del proyecto de patrimonio cultural sumergido se llevó a cabo el día 20/agos/2021, teniendo como principal objetivo la caracterización magnética de un área cercana a la bahía de Cartagena, Colombia. Para la recolección de información geomagnética en el área conocida como Salmedina se utilizó un arreglo geométrico de 45 líneas en sentido norte sur con espaciamiento de 50m y 9 líneas de control en sentido este oeste con un espaciamiento de 150m. esto con el fin de asegurar una cobertura eficiente del método magnético en la prospección que tenía como fin identificar anomalías de posibles fuentes alojadas en el fondo.

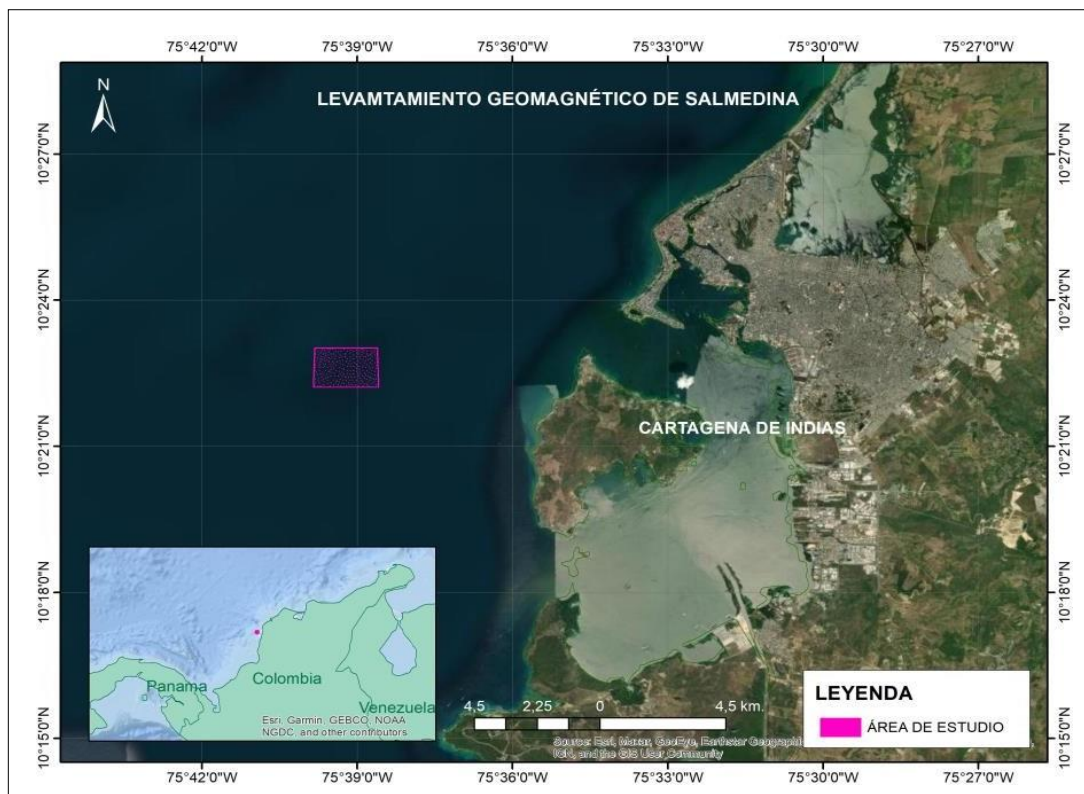


Figura 33. Ubicación del levantamiento geomagnético local.

El sensor utilizado fue el magnetómetro marino Geometrics G-882, y el magnetómetro base Geometrics G-862 ubicado en tierra a 13km en la Escuela Naval "Almirante Padilla" (ENAP), garantizando una precisa corrección por variación diurna. La lancha utilizada fue un tipo soundermax y se manejó un layback de 36m asegurando el menor ruido posible por efecto de la embarcación.



Figura 34. La lancha utilizada, tipo soundermax. Winche portátil de 300m

Durante el levantamiento geomagnético se obtuvieron una gran variedad de anomalías geomagnéticas asociadas a objetos alojados en el fondo marino

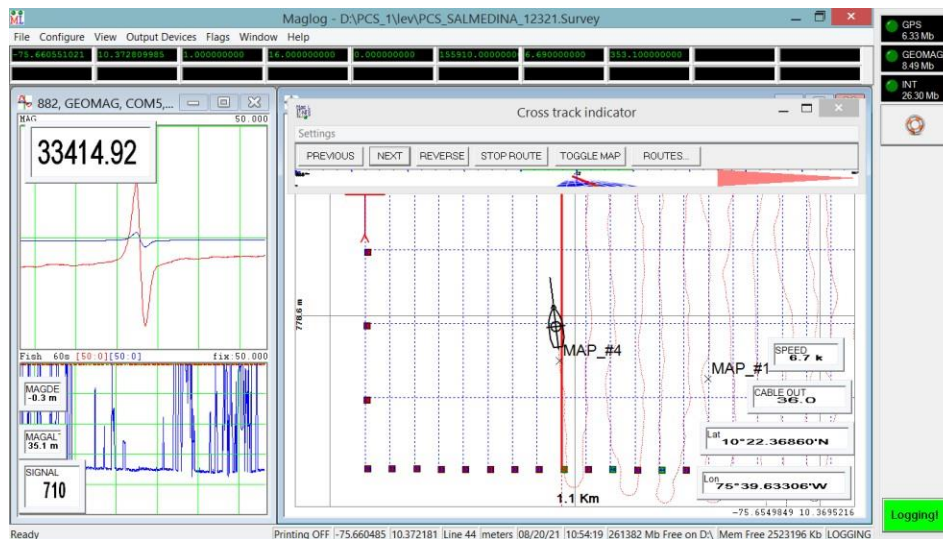


Figura 35. Líneas del levantamiento geomagnético local.

El software de adquisición utilizado es Maglog, propio de la casa fabricante del sensor magnético, y el software de procesamiento de datos fue el Oasis Montaj, que permite una optimización de filtros de visualización para mejorar en mejorar la interpretación geofísica. Con el procesamiento y el filtrado de los datos magnéticos presentados previamente, se obtuvo un mapa de anomalías magnéticas que se agrupan

en 5 sectores principales de interés marcados en la imagen de color fucsia.

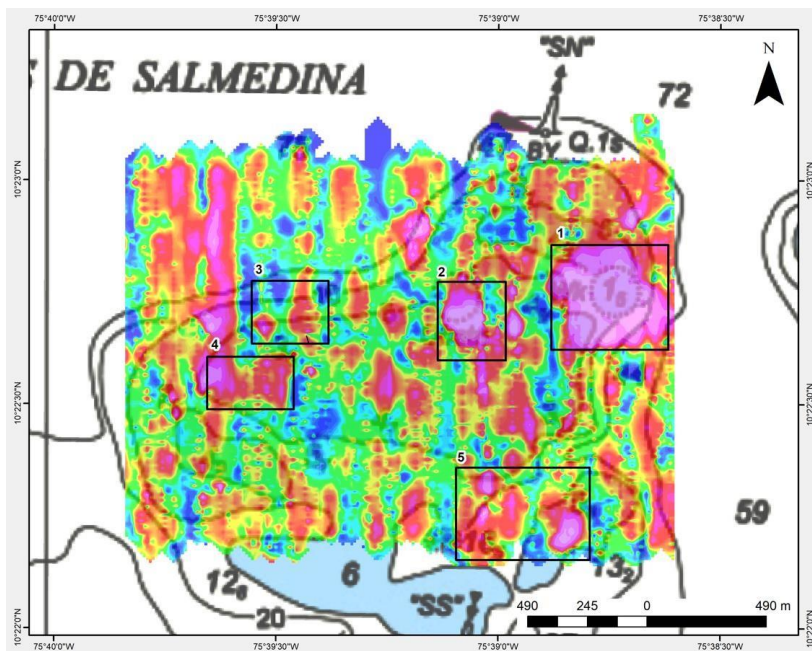


Figura 36. Levantamiento magnetométrico sobre bajo Salmedina.

A continuación, presentaremos un breve análisis de los datos magnéticos y de los hallazgos encontrados sobre los sectores 1 y 2, los cuales presentan las anomalías más significativas del bajo de Salmedina.

5.3.1 Sector 1

Línea 5

En el perfil A del sector 1 se observa la anomalía magnética más representativa de toda el área de estudio. La anomalía en su polo positivo presenta una intensidad de 33491nT y en su polo negativo un valor de 33370nT, que nos indica que la anomalía magnética generada por esta fuente es de 121nT. Teniendo en cuenta que la profundidad del sensor magnético se mantuvo constante en 1 metro en un área específica en donde la profundidad no supera los 10 metros, se puede inferir que el contenido ferromagnético de esta fuente generadora de anomalía es notable. Adicionalmente se puede interpretar que dicha anomalía pueda

estar siendo generada no solo por una fuente, sino que puede ser una acumulación de varias fuentes que se encuentran cercanas o apiladas.

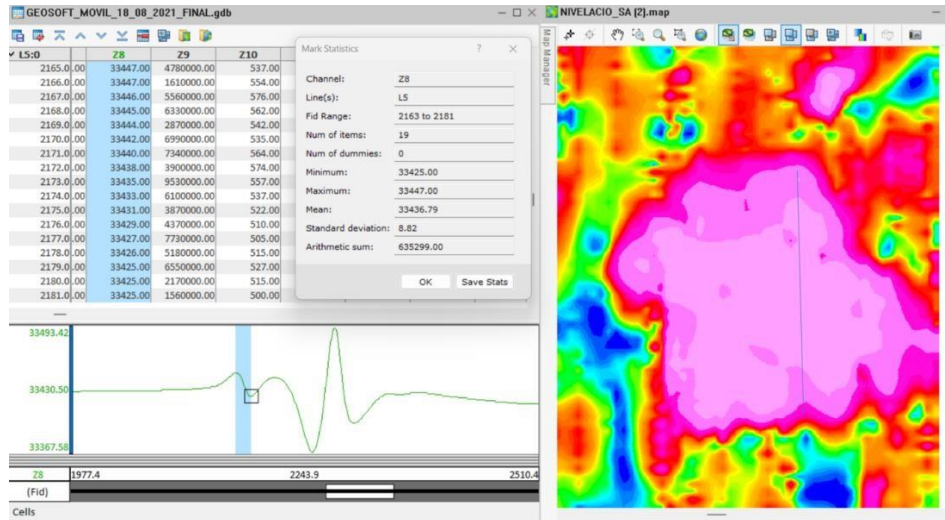


Figura 37. Anomalía magnética de línea 5 de levantamiento.

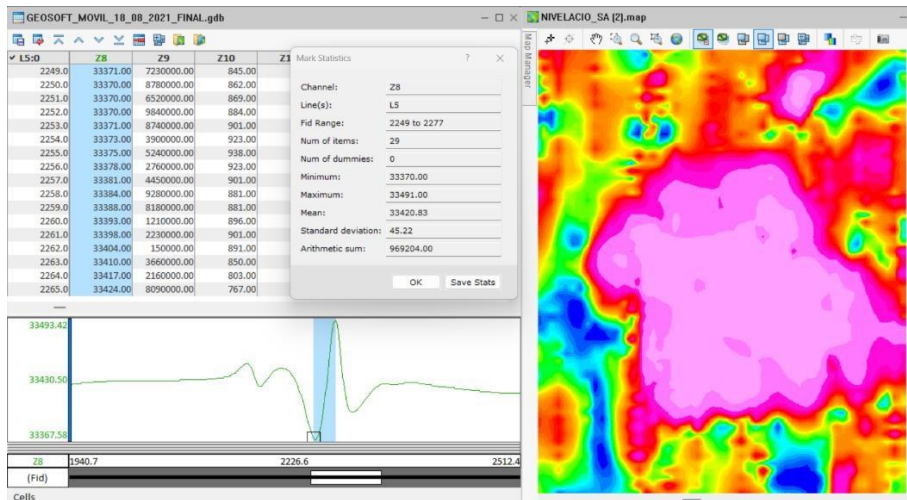


Figura 38. Anomalía magnética de línea 3 de levantamiento.

Un indicio claro de que se presentan varias fuentes generadoras de anomalías son los dos dipolos que se marcan uno de manera más representativa en la gráfica de la Figura 37 y otro secundario presentado en la figura 38 con un valor de anomalía máxima positiva de 33447nT y un valor máximo de anomalía negativa de 33425nT. Estos valores nos muestran una fuente generadora de una intensidad magnética de 22nT,

significativamente inferior a la fuente más cercana pero no menos interesante

A continuación, se presentan un par de imágenes tomadas de fondo marino en la posición que se registra la lectura de la línea 5. En esta línea, se visualizan estructuras de gran envergadura, que por su coloración cobre indican un proceso de oxidación lo cual puede ser un indicador de que se trata de estructuras compuestas por hierro.

Adicionalmente, se puede inferir que esta anomalía tan grande (Sector 1), no corresponde a una sola fuente generadora. Por lo tanto, podemos inferir que se trata de una agrupación de objetos alojados en el lecho marino con componentes sensibles al sensor magnético que generan lecturas elevadas del campo, así como pequeños picos de dipolo sobre la lectura registrada a lo largo de la línea.

En la Figura 39A se presenta una estructura solida que puede corresponder a una antigua estructura de barcaza, se observa gran proliferación de vida marina y coral. En la Figura 39B se mostramos una estructura correspondiente a un pequeño andamio, probablemente haya sido parte de la barcaza, en la imagen es fácil identificar algunas zonas que aún no presentan proliferación marina, pero si un alto grado de oxidación.

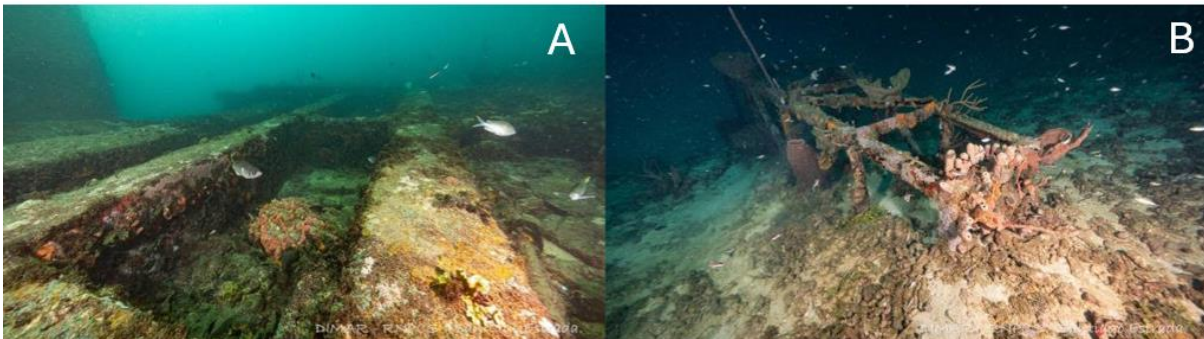


Figura 39. Anomalía magnética de línea 5 de levantamiento correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.

Luego en la inspección con buzos y verificando el historial de la zona se identifica que este es un naufragio registrado como buque de Ferrocemento. El barco hundido Ferrocemento, es una maravilla de la construcción naval, construido en concreto. Este sitio se encuentra en Salmedina, Cartagena de indias. Cuando las condiciones son favorables se puede bucear. En el sitio también se pueden observar cañones y anclas pegados al fondo marino y ubicados a muy poca profundidad. Durante el buceo se observa también una agrupación de anclas y cañones concentrados principalmente en tres áreas. En el área 1, se encuentran

20 cañones, 1 ancla. En el área 3, hay 4 anclas y cañones.

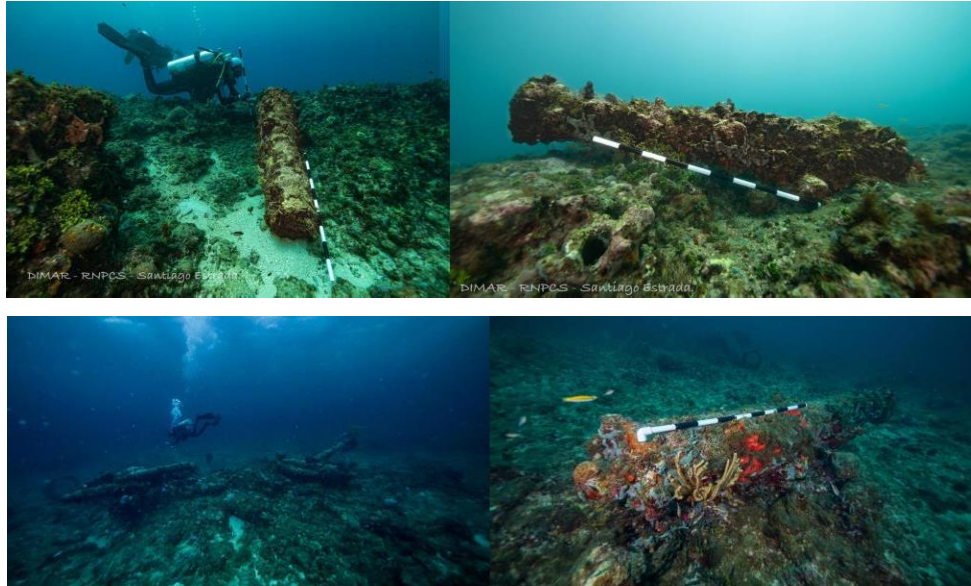


Figura 40. Imágenes del sector 1, correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.

5.3.2 Sector 2

En el sector 2 mostrado en la Figura 35, estudiaremos la línea 18. A lo largo de la adquisición magnética de esta línea se presentan dos anomalías representadas por dipolos siendo la más cercana al inicio y la de mayor intensidad magnética con un valor de 33404,60nT y un valor de bajo magnético de 33359,00nT. Este dipolo de 45nT, aunque alto, tiene una dimensión espacial muy pequeña, por lo cual pudiera inferirse que la fuente está ubicada de manera transversal a la línea de levantamiento y que dependiendo de la lectura de las líneas cercanas pudiera corresponder a un objeto con forma de cilindro.

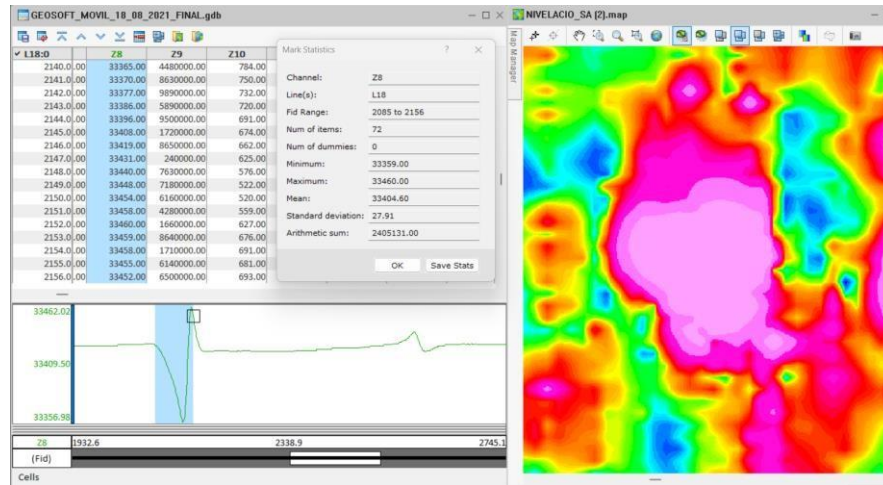


Figura 41. Anomalía magnética de línea 18 de levantamiento.

Para la segunda anomalía registrada en la línea 18 del levantamiento, se presenta una anomalía positiva de 33438,00nT y una anomalía negativa de 33421,00nT considerablemente más pequeña que su antecesora, pero no menos importante. Este dipolo tiene un rango de 17nT y a diferencia de la anterior tiene una dimensión espacial más grande pero una intensidad magnética menor. Esto nos puede indicar que se trata de un cuerpo más pequeño y compacto. En el área 2 hay un ancla de gran tamaño y otra más pequeña, rodeada por varios cañones

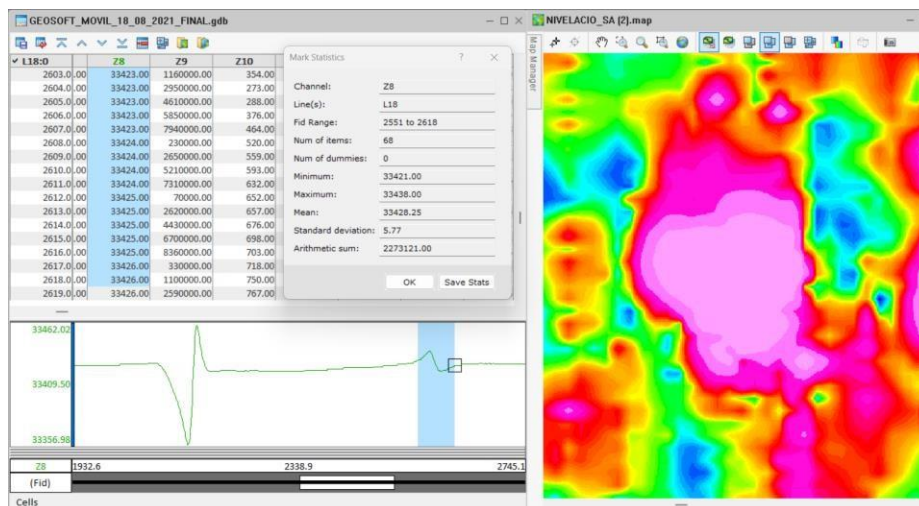


Figura 42. Anomalía magnética de línea 18 de levantamiento.

El ancla pequeña, aún cuenta con el cepo y está recubierta de coral, sobresale del lecho marino, en una de sus extremidades. El ancla presenta gran proliferación de vida marina, que puede llegar a enmascarar su señal magnética. En el cuerpo de la fuente se observa un proceso de oxidación, pero hay que mencionar que aún se encuentra en buen estado de conservación y es relativamente fácil su identificación.

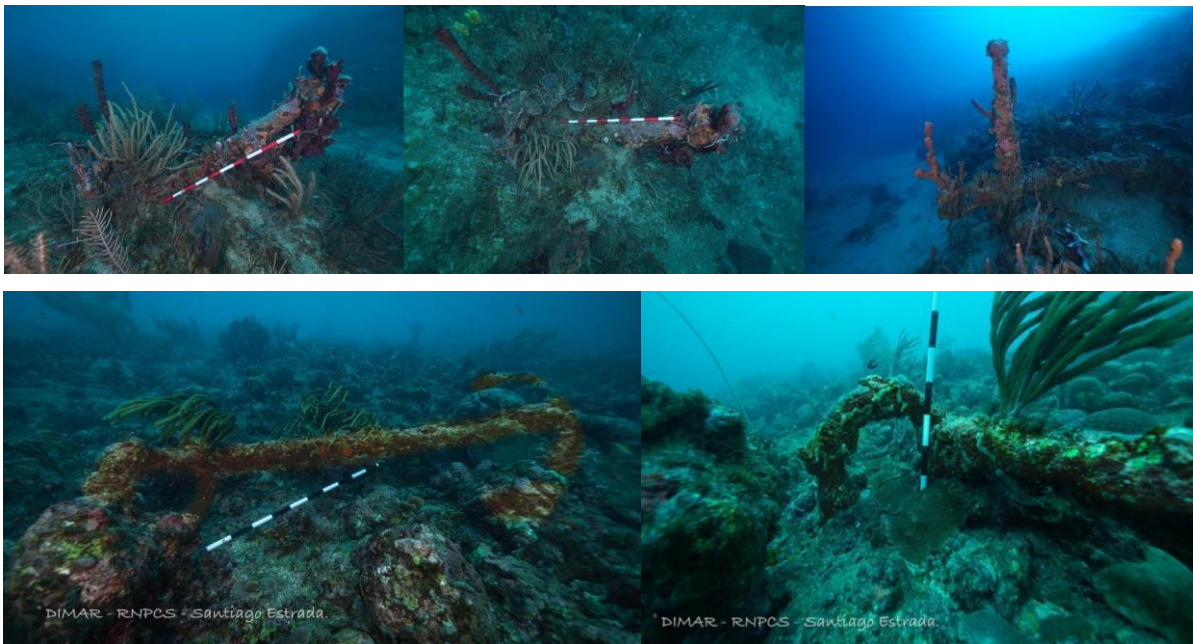


Figura 43. Imágenes del sector 2, correspondientes diversas estructuras alojadas en el fondo marino.

Capítulo 6

6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

- La tecnología de magnetometría avanzada combinada con la batimetría de alta resolución nos permitió caracterizar el comportamiento del relieve submarino y establecer los posibles procesos geológicos y geofísicos que han dado lugar a su modelado. Del mismo modo, los diferentes trabajos de levantamiento de información magnética desarrolladas han permitido identificar no solo presuntas fuentes de anomalías magnéticas que podrían estar asociadas a procesos volcánicos aún no evidentes en la superficie del fondo marino, sino también los magnetismos remanentes puntuales de carácter local asociados a pecios u objetos hundidos alojados en el fondo y subsuelo marino.
- Con el desarrollo de esta metodología ha sido posible establecer un protocolo de búsqueda y prospección de objetos alojados en el fondo marino. Los resultados fueron presentados a través del establecimiento del análisis de anomalías magnéticas que permitieron la identificación de fuentes en profundidad y objetos alojados en el lecho marino, en el Mar Caribe colombiano.
- La integración de datos hidrográficos y geofísicos permitieron establecer indicios que posteriormente corroboraron la identificación de áreas con alto potencial geomorfológico y arqueológico. Mediante el procesado y filtrado de datos hidrográficos y geofísicos, nos permiten la presentación cartográfica, a través de la generación de superficies y mapas temáticos de los sitios de interés.
- La aplicación de la metodología en la Bahía de Cartagena de Indias de manera local permitió la caracterización magnética de sitios conocidos y el establecimiento de nuevos sitios de interés arqueológico que no habían sido identificados con batimetría. Las áreas fueron inspeccionadas mediante métodos activos de manera directa con (Buzos) obteniendo resultados positivos en la confirmación del uso del método.

- La prospección para la adquisición de datos geomagnéticos en entornos marinos apoyó diferentes proyectos de investigación e ingeniería, como la detección de la ubicación de tuberías y cubiertas, artefactos enterrados, naufragios, identificación de sitios de interés arqueológico, caracterización de estructuras geológicas, prospección de hidrocarburos, entre otras aplicaciones. También otra línea de aplicación son los proyectos relacionados con la soberanía nacional y el estudio de los recursos naturales de un país.

6.2 Futuras líneas de Investigación

Se tiene previsto continuar con una nueva línea de investigación adicionando otras fuentes de información a las caracterizaciones de anomalías en ambientes marinos. Adicionalmente, se busca actualizar las cartas magnéticas en los principales puertos colombianos como un apoyo a las cartas náuticas de navegación. Esta investigación permitirá identificar posibles riesgos a la navegación y posibilitará la generación de ciencia y conocimiento de los entornos sumergidos del país.

En términos regionales, se considera establecer el método geomagnético como fuente de información primaria en el protocolo de fases de prospección de gas e hidrocarburos en el país, esto, acompañado de otras fuentes como sísmica, batimetría y gravimetría.

Estos nuevos lineamientos, generan la posibilidad de desarrollar trabajos de tipo arqueológico y geológico, que serían complementarios para las descripciones fisiográficas, arqueológicas e históricas del territorio colombiano.

Capítulo 7

7 Referencias Bibliográficas

- AIP Publicación de Información Aeronáutica (2020). Informe del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de la Isla de San Andrés. Recuperado el 16/jul/2020. Disponible en: <https://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/servicio-de-informacion-aeronautica-ais/aip>
- Alatorre-Zamora, M. A., Rosas-Elguera, J., Pérez-Rodríguez, G., Campos-Enríquez, J. O., & Maciel-Flores, R. (2012). *3D EULER DECONVOLUTION AND ANALYTIC SIGNAL CONTRIBUTING TO FAULT RISK ANALYSIS IN THE VALLE DE BANDERAS GRABEN*. *10*(1). www.e-gnosis.udg.mx/vol10/art1
- Alken, P., Thébaud, E., Beggan, C. D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T. N., Brown, W. J., Califf, S., Chambodut, A., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Grayver, A., Hammer, M. D., Holschneider, M., Huder, L., ... Zhou, B. (2021a). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*, *73*(1). <https://doi.org/10.1186/S40623-020-01288-X>
- Alken, P., Thébaud, E., Beggan, C. D., Amit, H., Aubert, J., Baerenzung, J., Bondar, T. N., Brown, W. J., Califf, S., Chambodut, A., Chulliat, A., Cox, G. A., Finlay, C. C., Fournier, A., Gillet, N., Grayver, A., Hammer, M. D., Holschneider, M., Huder, L., ... Zhou, B. (2021b). International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*, *73*(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/S40623-020-01288-X/FIGURES/5>
- Ariffin, K. S. (1879). Geophysical Surveying Using Magnetism Methods. *Geofizik Carigali*, 1–35.
- Armijo Mella, I. A. (2019). *Modos normales de la magnetización en multicapas ferromagnéticas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170470>
- Bajgain. (2011). *Gravity and Magnetic Modeling of Basement Beneath Alabama Gulf Coastal Plain*.
- Barrows, L., & Rocchio, J. E. (1990). Magnetic Surveying for Buried Metallic Objects. *Groundwater Monitoring &*

Remediation, 10(3), 204–211. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1990.tb00016.x>

Blakely, R. J., Wells, R. E., Weaver, C. S., & Johnson, S. Y. (2002). Location, structure, and seismicity of the Seattle fault zone, Washington: Evidence from aeromagnetic anomalies, geologic mapping, and seismic-reflection data. *Geological Society of America Bulletin*, 114(2), 169–177.

Calcina, M. (2009). *UN MODELO DINAMICO PARA EL CAMPO GEOMAGNETICO. 1964*, 44–62.

Campbell, W. H. (2003). Introduction to Geomagnetic Fields: Second Edition. In *Introduction to Geomagnetic Fields*. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003igf..book.....C>

Carvajal Arenas, L. C. (2017). Hydrocarbon Prospectivity of the Nicaraguan Rise and Colombia Basin, western Caribbean Sea. *University of Houston*.

Case, J. E., MacDonald, W. D., & Fox, P. J. (1990). Caribbean crustal provinces; seismic and gravity evidence. *The Caribbean Region*, 15–36.

Catalán, M., & Martos, Y. M. (2022). New Evidence Supporting the Pacific Mantle Outflow: Hints from Crustal Magnetization of the Phoenix Plate. *Remote Sensing*, 14(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs14071642>

Diaz, J. M., Sanchez, J. A., Zea, S., & Garzón-Ferreira, J. (1996). *ATOLL RESEARCH BULLETIN NO. 435 MORPHOLOGY AND MARINE HABITATS OF TWO SOUTHWESTERN CARIBBEAN ATOLLS: ALBUQUERQUE AND COURTTOWN*.

Diaz, J. M., Sánchez, J. A., Zea, S., & Garzón-Ferreira, J. (1996). Morphology and marine habitats of two Southwestern Caribbean atolls: Albuquerque and Courtown. *Atoll Research Bulletin*, 435, pages 1–33.

DIMAR, Peláez, J.; & Oviedo, K. (2015). *Manual de adquisición y procesamiento de información geomagnética*. 180. (Repositorio privado DIMAR)

DIMAR, Dirección General Marítima. (2021). ESQUEMA DE CARTOGRAFIA NAUTICA NACIONAL. Disponible en: <https://cioh.dimar.mil.co/index.php/es/eventlist/details/78-Día mundial de las organizaciones ecológicas y ambientales>

Domínguez, J. G., Gómez, J. C., Ricaurte, C., mayo, G., Orejarena, J., Díaz, J. M., & Andrade, C. A. (2010). Cobertura de los fondos y paisajes bentónicos asociados a formaciones diapíricas en los bancos de Salmedina, plataforma continental del caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 39(1), 117–135. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2010.39.1.145>

- Eppelbaum L. (2019). *Geophysical Potential Fields: Geological and Environmental Applications (Volume 2, Computational Geophysics)*, Editorial : Elsevier Science Publishing Co Inc, 476 pages, ISBN-10 : 0128116854, ISBN-13 : 978-0128116852,
- Ewing, J., Antoine, J., & Ewing, M. (1960). Geophysical measurements in the western Caribbean Sea and in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 65(12), 4087–4126. Disponible en:
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JZ065i012p04087>
- Fernández-Coppel, I. a. (2001). Las coordenadas geográficas y la Proyección UTM. *Geoasbuilt.Es*, 1–52.
<http://www.cartesia.org/data/apuntes/cartografia/cartografia-geograficas-utm-datum.pdf%5Cnhttp://geoasbuilt.es/tutoriales/topografia/utm.pdf>
- Fernández-Montblanc, T., Del Río, L., Izquierdo, A., Gracia, F. J., Bethencourt, M., & Benavente, J. (2018). Shipwrecks and man-made coastal structures as indicators of historical shoreline position. An interdisciplinary study in the Sancti Petri sand spit (Bay of Cádiz, SW Spain). *Marine Geology*, 395(September 2017), 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2017.10.005>
- Finn, C., & Williams, D. L. (1987). An aeromagnetic study of Mount St. Helens. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B10), 10194–10206. <https://doi.org/10.1029/JB092IB10P10194>
- Flanagan, G., & Williams, D. L. (1982). A magnetic investigation of Mount Hood, Oregon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B4), 2804–2814. <https://doi.org/10.1029/JB087IB04P02804>
- Fujiwara, T., Tamaki, K., Fujimoto, H., Ishii, T., Seama, N., Toh, H., Koizumi, K., Igarashi, C., Segawa, J., Kobayashi, K., Kido, M., Seno, T., & Kinoshita, H. (1995). Morphological studies of the Ayu Trough, Philippine Sea – Caroline Plate Boundary. *Geophysical Research Letters*, 22(2), 109–112.
<https://doi.org/10.1029/94GL02719>
- Gallego, J. M., Jaramillo, H., & Patiño, A. (2015). Servicios intensivos en conocimiento en la industria del petróleo en Colombia. *Servicios Intensivos En Conocimiento En La Industria Del Petróleo En Colombia*.
<https://doi.org/10.18235/0000198>
- Galván Pineda, J. (2016). Métodos potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo mar “La Joyuela”, Trabajo Fin de Master, Máster en Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, México, 2016. Disponible en:
<https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1813/1/TMIPICYTG3M42016.pdf>

- García-García, A., Jiménez-Teja, Y., García-García, F., Soto, R., Gárate, J., Martín-Dávila, J., Sánchez-Alzola, A., de Gil, A., Fernández-Prada, J. A., & Jigena, B. (2008). Geodetic Research on Deception Island and its Environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) During Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica*, 97–124.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-74882-3_6
- Geister, J. (1992). *ERLANGEN 1992 Modern Reef Development and Cenozoic Evolution of an Oceanic Island / Reef Complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia)*.
- Geister, J., & Díaz, J. (2002). Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina. *Mar Caribe, Colombia (Guía de Campo)*. INVEMAR, Santa Marta.
- Geister, J., & Díaz, J. M. (2007). *AMBIENTES ARRECIFALES Y GEOLOGÍA DE UN ARCHIPIÉLAGO OCEÁNICO: SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA (MAR CARIBE, COLOMBIA)*.
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/AmbGeolArch-SAnd-Prov-SCat-.pdf>
- Geometrics, Inc. (2005). *Manual de operación magnetómetro marino de cesio G-882. 25919-OM R*, Pag.122.
- Geometrics, Inc. (2012). Montaj Grav / Mag Interpretation (tutorials and user guilds). In *Montaj Grav / Mag Interpretation (tutorials and user guilds)* (pp. 57 and 58).
- Geometrics. (2015). MagLog Data Acquisition. *Geometrics*, 408.
- Geosoft. (2014). Oasis Montaj How-to Guide. *Oasis Montaj How-To Guide*, 1–21.
- Geotem (2024). Magnetometría (MAG). Recuperado: 20/03/2024 Disponible en:
<https://geotem.com.mx/tecnologias/>
- Grandis, H., & Dahrin, D. (2017). The Utility of Free Software for Gravity and Magnetic Advanced Data Processing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 62(1), 012046.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012046>
- Granot, R., & Dymant, J. (2019). The Influence of Post-accretion Sedimentation on Marine Magnetic Anomalies. *Geophysical Research Letters*, 46(9), 4645–4652. <https://doi.org/10.1029/2019GL082265>
- Graterol, V. (2005). *Basic principles and applications of the Gravity and Magnetic Exploration methods*.

- Hanna, W. F. (1990). *Geologic Applications of Modern Aeromagnetic Surveys*. 1–116.
- Hildenbrand, T. G., Rosenbaum, J. G., & Kauahikaua, J. P. (1993). Aeromagnetic study of the Island of Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B3), 4099–4119. <https://doi.org/10.1029/92JB02483>
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- Holcombe, T. L., Ladd, J. W., Westbrook, G. K., & Edgar, N. T. (1990). Caribbean marine geology; ridges and basins of the plate interior. *The Caribbean Region, The Geology of North America, Vol. H, Geological Society of America*, 231–260.
- Honkura, Y., Okubo, Y., Nagaya, K., Makino, M., & Oshima, S. (1991). A Magnetic Anomaly Map in the Japanese Region with Special Reference to Tectonic Implications. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 43(1), 71–76. <https://doi.org/10.5636/JGG.43.71>
- Idárraga-García, J., & León, H. (2019). Unraveling the Underwater Morphological Features of Roncador Bank, Archipelago of San Andres, Providencia, and Santa Catalina (Colombian Caribbean). *Frontiers in Marine Science*, 0(FEB), 77. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2019.00077>
- IHO. (2020). *Normas de la Organización Hidrográfica Internacional para los Levantamientos Hidrográficos S-44 Edición 6.0.0*. www.iho.int
- Introcaso, A., Ghidella, M. E., Ruiz, F., Crovetto, C. B., Introcaso, B., & Paterlini, C. M. (2008). Métodos gravimagnetométricos modernos para analizar las características estructurales de la plataforma continental argentina. *Geoacta*, 33, 1–20.
- Inventory, N., Consequences, C., The, E. O. N., & The, N. O. F. (2004). *Survey: A R Eport on the. May* 1–28.
- Jackson, A., Jonkers, A. R. T., & Walker, M. R. (2000). NCEI Geomagnetic Calculators. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1768), 957–990. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2000.0569>
- Jacobs, J. A., & Turner, G. M. (1995). Reversals of the Earth's Magnetic Field. *Geophysical Journal International*, 121(3), 975–975. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.1995.TB06453.X>
- Jigena, B., Berrocoso, M., Torrecillas, C., Vidal, J., Barbero, I., & Fernández-Ros, A. (2016). Determination of an experimental geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 28(4), 277–292. <https://doi.org/10.1017/S0954102015000681>

- Jigena-Antelo, B., Estrada-Ludeña, C., Howden, S., Rey, W., Paz-Acosta, J., López-García, P., Salazar-Rodríguez, E., Endrina, N., & Muñoz-Pérez, J. J. (2023). Evidence of sea level rise at the Peruvian coast (1942–2019). *Science of The Total Environment*, 859, 160082. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160082>
- Jigena B., Mamani R., Muñoz-Perez J.J., Garvi D., Walliser J., Calderay F. & Berrocoso M. (2018). Methodology for hydrological information management in waterways: Application to Bolivia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. 9, núm. 4 (2018), pp 237-256. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-04-10>
- Leroy, S., Mauffret, A., Patriat², P., & Mercier De Lépinay³, B. (2000). An alternative interpretation of the Cayman trough evolution from a reidentification of magnetic anomalies. In *Geophysics. J. Int* (Vol. 141). <https://academic.oup.com/gji/article/141/3/539/612159>
- López-Loera, H., Tristán-González, M., Luis Potosí, S., & Potosí, L. (2013). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana VoluMen 65. 1*, 137–156.
- MacLeod, I. N., Jones, K., & Dai, T. F. (1993). 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Exploration Geophysics*, 24(4), 679–688. <https://doi.org/10.1071/EG993679>
- Manea, M., & Manea, V. C. (2008). On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge: A geodynamical perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175(4), 459–471. <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.berr.02.028>
- Mauffret, A., & Leroy, S. (1997). Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province. *Tectonophysics*, 283(1–4), 61–104. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(97\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(97)00103-0)
- Milliman, J. D. (1969). *ATOLL RESEARCH BULLETIN NO. 129 FOUR SOUTHWESTERN CARIBBEAN ATOLLS: COURTOWN CAYS, ALBUQUERQUE CAYS, RONCADOR BANK AND SERRANA BANK.*
- Milsom, J. (2013). Field geophysics. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nakanishi, M. (2011). Bending-related topographic structures of the subducting plate in the Northwestern Pacific Ocean. *Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, 8, 1–38. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8885-7_1/COVER
- Narváez Medina, L. (2012). Modelo de fuentes de anomalías Geomagnéticas de Campo Total asociadas al

estado de la cámara magmática del volcán Galeras. Trabajo de Fin de Máster. Máster en Ciencias - Geofísica, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogotá, Colombia, 2012. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/39635/>

Neal W. Driscoll, & John B. Diebold. (1998). *Deformation of the Caribbean region: One plate or two?* | *Geology* | *GeoScienceWorld*. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/26/11/1043/206786/Deformation-of-the-Caribbean-region-One-plate-or?redirectedFrom=fulltext>

NOAA-NCEI, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environmental Information (2024). Geomagnetism. Disponible en: <https://www.ncei.noaa.gov/products/geomagnetic-data>

ORREGO, C. E. P. (2017). Modelamiento e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo locg. *Universidad de Chile*.

Osorio-Granada, A. M., Jigena-Antelo, B., Vidal Pérez, J. M., Hernández-Pardo, O., León-Rincón, H., & Muñoz-Pérez, J. J. (2022). Potential fields modeling for the Cayos Basin (Western Caribbean Plate): Implications in basin crustal structure. *Marine Geology*, 449. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2022.106819>

Oviedo, K., Jigena, B., Otálora, N., Romero, J., Contreras-de-Villar, F., & Muñoz-Pérez, J. J. (2020). A New Method for the Collection of Marine Geomagnetic Information: Survey Application in the Colombian Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering* 2021, Vol. 9, Page 10, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/JMSE9010010>

Oviedo-Prada, K., Muñoz-Perez, J. J., Escobar-Olaya, G., Osorio-Granada, A. M., Howden, S., Torrecillas-Lozano, C., ... & Jigena-Antelo, B. (2024). Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea. *Geocarto International*, 39(1), 2321365.

Payo, A., Antelo, B. J., Hurst, M., Palaseanu-Lovejoy, M., Williams, C., Jenkins, G., Lee, K., Favis-Mortlock, D., Barkwith, A., & Ellis, M. A. (2018). Development of an automatic delineation of cliff top and toe on very irregular planform coastlines (CliffMetrics v1.0). *Geoscientific Model Development*, 11(10), 4317–4337. <https://doi.org/10.5194/GMD-11-4317-2018>

Pérez Carrillo de Albornoz, F. J. (2002). El Instituto Hidrográfico de la Marina. *Arbor*, 173(682), 365–383. <https://doi.org/10.3989/arbor.2002.i682.1129>

- Pindell, J., Kennan, L., Stanek, K. P., Maresch, W. V., & Draper, G. (2006). Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. *Geological Acta: An International Earth Science Journal*, 4(1–2).
- Plets R., Dix J., Bates. R. (2013). Marine Geophysics Data Acquisition, Processing, and Interpretation. Guidance notes. English Heritage Publishing. Disponible en: <https://acortar.link/ico6np>
- Ramírez, E. (2014). Adquisición Y Procesamiento De Datos Gravimétricos Y Magnéticos En El Perfil Calabozo - Dabajuro. *Caracas*.
- Regi, M., Guarnieri, A., Lepidi, S., & Di Mauro, D. (2022). Signature of Tidal Sea Level in Geomagnetic Field Variations at Island Lampedusa (Italy) Observatory. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 6203, 14(24)*, 6203. <https://doi.org/10.3390/RS14246203>
- Rey, W., Ruiz-Salcines, P., Salles, P., Urbano-Latorre, C. P., Escobar-Olaya, G., Osorio, A. F., Ramírez, J. P., Cabarcas-Mier, A., Jigena-Antelo, B., & Appendini, C. M. (2021). Hurricane Flood Hazard Assessment for the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, Colombia. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1612. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.766258/BIBTEX>
- Schmidt, A., Gubbins, D., & Herrero-Bervera, E. (2007). *ARCHAEOLOGY, MAGNETIC METHODS Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism Magnetism and Archaeology*. <http://www.GeodataWIZ.com/arminschmidt>
- Seequent inc. (2021). *Geosoft | Oasis Montaj - Seequent*. <https://www.seequent.com/es/productos-y-soluciones/geosoft-oasis-montaj/>
- Tchernychev, M. (2009). *MAGPICK - magnetic map & profile processing. User Guide*.
- Teledyne. (2021). CARIS Collect. Disponible en: <https://www.teledynecaris.com/en/products/caris-collect/>
- Telford W.M, Gerald, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics (2nd Edition)* (p. 760). Cambridge University Press.
- Udías, A., Mezcuca, J., & Rodríguez, J. M. (1997). *Fundamentos de geofísica* (Vol. 167). Alianza Editorial Sa.
- Urrutia, J., & Del Castillo, L. (1977, July). *UN MODELO DEL EJE VOLCÁNICO MEXICANO*. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/3801/1977-38-1%20Urrutia-Del%20Castillo.pdf>

Zou, Z., Bakhtiari Rad, P., MacElloni, L., & Zhang, L. (2021). Temporal and spatial variations in three-dimensional seismic oceanography. *Ocean Science*, 17(4), 1053–1066. <https://doi.org/10.5194/OS-17-1053-2021>

Publicaciones

1.1 A New Method for the Collection of Marine Geomagnetic Information: Survey Application in the Colombian Caribbean

Technical Note

A New Method for the Collection of Marine Geomagnetic Information: Survey Application in the Colombian Caribbean

Karem Oviedo Prada ^{1,2,*}, Bismarck Jigena Antelo ^{1,*}, Nathalia Otálora Murillo ², Jeanette Romero Cózar ¹, Francisco Contreras-de-Villar ¹ and Juan José Muñoz-Pérez ^{1,*}

¹ Puerto Real Campus, University of Cadiz, 11510 Puerto Real (Cadiz), Spain; jeanette.romero@uca.es (J.R.C.); francisco.contreras@uca.es (F.C.-d.-V.)

² Oceanographic and Hydrographic Research Centre of the Caribbean, Barrio Bosque, Sector Manzanillo, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena de Indias 130001, Colombia; notalora@dimar.mil.co

* Correspondence: ing.karemoviedo@gmail.com (K.O.P.); bismarck.jigena@gm.uca.es (B.J.A.); juanjose.munoz@uca.es (J.J.M.-P.)

Abstract: In recent years, the Oceanographic and Hydrographic Research Center (part of the General Maritime Directorate of Colombia (DIMAR) has made important efforts to advance research in the field of marine geophysics, in particular, the techniques of geomagnetism, sub-bottom profiling, and side-scan sonar, the first being the most developed at the present time. A method is presented for the acquisition of geomagnetic data in marine environments, as used by DIMAR in the Colombian maritime territory. The development of the geomagnetic method not only offers the opportunity to advance basic scientific knowledge, but it is also of great importance in support of national sovereignty issues. Among other applications, the most representative uses of the geomagnetic method are the location of pipelines and metal plates, detection of buried ordnance, identification of sites of archaeological interest, and the identification and characterization of geological structures. As a result of testing the method, a grid of geomagnetic data was surveyed in an area close to the Island of San Andrés in the north-west of the Colombian maritime territory. The survey was prepared with a regional geometric arrangement, the result of which was compared with survey data obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) magnetic data repository and carried out in the same study area. Despite the long time interval between the two surveys, almost 50 years, no significant differences were observed in terms of the analyzed variables. Finally, results show negligible differences between the magnetic data obtained for the years 1970 and 2018 for all the variables measured, such as the inclination, declination, and total magnetic field. These differences may be attributable to a geological component or also to the acquisition and processing methods used in the 1970s.

Keywords: marine geophysics; magnetic method; Colombian Caribbean; DIMAR; CIOH



Citation: Oviedo Prada, K.; Jigena Antelo, B.; Otálora Murillo, N.; Romero Cózar, J.; Contreras-de-Villar, F.; Muñoz-Pérez, J.J. A New Method for the Collection of Marine Geomagnetic Information: Survey Application in the Colombian Caribbean. *J. Mar. Sci. Eng.* **2021**, *9*, 10. <https://dx.doi.org/10.3390/jmse9010010>

Received: 20 November 2020

Accepted: 16 December 2020

Published: 23 December 2020

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The increase in marine geophysical activity in recent years has provided essential data for evaluating theories about the origin of oceans and continents. Of the different methods used to explore the sea floor and underlying mantle, the magnetic field and its measurements have proven to be one of the most powerful tools for discovering and delineating structural and geological patterns [1].

According to Ewing et al. [2], before World War II, almost all marine magnetic observations had been made by the research ship "Carnegie" (1909–1929), which was specially built to work along widely spaced lines in the Atlantic, Pacific and Indian oceans. After the war, the fluxgate magnetometer, originally developed as an airborne instrument for detecting submarines, was adapted for marine applications by the Lamont Geological Research Observatory. These were the first measurements made with a magnetometer towed by a ship. Later, for work in the maritime field, the fluxgate magnetometer was replaced by

the proton magnetometer, having the advantages of absolute field measurement and not requiring orientation of the head [3].

The use of the geomagnetic method is widely known globally, for its various local and regional applications [4]. Due to its high costs, which involve equipment and logistic development and multiple applications, this geophysical method is generally undertaken by foreign private companies with commercial aims, as the high costs prove to be a disadvantage for state organizations dedicated to science and marine research, which have limited budgetary allocations [5]. Therefore, it can be summarized that established foreign companies, which compose the entire market, dominate geophysical exploration, including those services in limited supply, such as gravimetry and magnetometry and its applications [6–8].

The General Maritime Directorate (DIMAR) is located at Cartagena de Indias, in the Colombian Caribbean Sea. DIMAR started the project “Geomagnetismo Marino” in 2015 with the purpose of recovering research capacity through the use of the G-882 marine magnetometer from geometrics. One of the recovery activities included training on the handling of the magnetic sensor and data acquisition. For the former, a document was produced [9] in which a vast database and manuals were compiled, which served as a base for the production of the following geophysical work methodology.

The need to propose a work methodology was pressing, as there was no record in Colombia of any other public entity carrying out this type of scientific research. Therefore, the efforts of the Caribbean Oceanographic and Hydrographic Research Centre (CIOH) were aimed at the standardization of the guidelines and the parameters required for the optimization of the marine geomagnetic method. After much effort and field tests in the Colombian Caribbean, a methodology has been obtained that offers high-quality marine geomagnetic data collection.

Thus, the following method aims to sequentially show the planning and acquisition of geomagnetic information in deep marine environments in Colombian territory on board the oceanographic research vessel ARC (Navy of the Republic of Colombia) Providence. The guide has become a tool that provides an effective and efficient response for geophysical research at the service of the nation. For this work, a bibliographic compilation was carried out taking into account aspects such as the verification of magnetic sensors and operators that can be powerful sources of magnetic noise. [10]. A fundamental aspect in the survey was to determine the distance at which the magnetometer sensor must be towed to reduce the magnetic effects of the vessel. Finally, the optimal lateral spacing between the lines also had to be considered, which is directly related to the depth of the water [11].

Moreover, geomagnetism is a geophysical prospecting method, applicable to the oil industry, and also mining and archaeological artefact explorations [11–13]. In mineral exploration, magnetometry is widely used to directly prospect for magnetic minerals, such as magnetite and other ferromagnetic minerals, and the method stands out for its speed and low cost. This method is the most widely used in geophysical surveys, at local and regional scales, and it is based on the study of the Earth’s magnetic field and its variations, as a consequence of additional magnetic fields produced by magnetized rocky bodies positioned on the surface and close subsoil [14,15].

The magnitude measured in the magnetic method is the Geomagnetic Field, which is related to the magnetization of the environment and which, in the majority of materials, appears when a magnetic field is applied to a body [16]. In the magnetic method, the objective is to investigate the geology of the subsoil, from the variations in this geomagnetic field, resulting from the magnetic properties of the underlying rocks [17,18]. Not all the rock-forming minerals are magnetic, but certain types of rock contain sufficient magnetic minerals to be able to produce significant magnetic anomalies, such as iron and magnetite, among others. The influence of the total magnetic field can be measured anywhere on earth, with a certain direction and intensity, subject to periodic variations and non-periodic disturbances, the magnitude of which on the planet’s surface can vary from point to point from 25,000 to 65,000 nT [19,20].

When a magnetic material is placed in a magnetic field, the material is magnetized, and the external field of magnetization is reinforced with the induced magnetic field in the material. This is known as induced magnetization, and it is based on the magnetic susceptibility of the materials, (understood as the degree of magnetization of a material in response to a magnetic field), and the magnitude and direction of the magnetic field [21]. When the external field disappears, the induced magnetization disappears immediately, but some materials retain a residual magnetism, and its direction will be fixed in the direction of the inductive field [22]. The residual magnetism reflects the history of the material. Thus, there is a contrast of magnetism between an anomalous source and the adjacent lateral formations. These two types of magnetization are due to spontaneous magnetization, which is a property of the ferromagnetic minerals in the Earth's crust [23].

To calibrate the data, check its reliability, and study the variation of the new data, it was necessary to have a reference work. To do this, we took into account previous work carried out between 1970 and 1971, obtained from the repository of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). More specifically, from the Marine Geology and Geophysics data from the National Centers for Environmental Information (NCEI), formerly the National Geophysical Data Center or NGDC [24].

The objective of this work is to present a method to carry out magnetic surveys that is compatible with other techniques used in different areas of engineering and science (hydrographic surveys, side-scan sonar, search for magnetized bodies, search for archaeological remains, etc.). To evaluate the quality of the work, the results obtained in a recent campaign were compared with those from previous ones, and the differences were analyzed.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The study area is located in the Colombian Caribbean Sea and more specifically to the south of the archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina (SAPSC). The geophysical survey was carried out in the area located between San Andrés Island, Cayos de Albuquerque Island and Cayos de Este-Sudeste Island, within the polygon marked in yellow, as can be seen in Figure 1. The study area covers an area of approximately 2040 km².

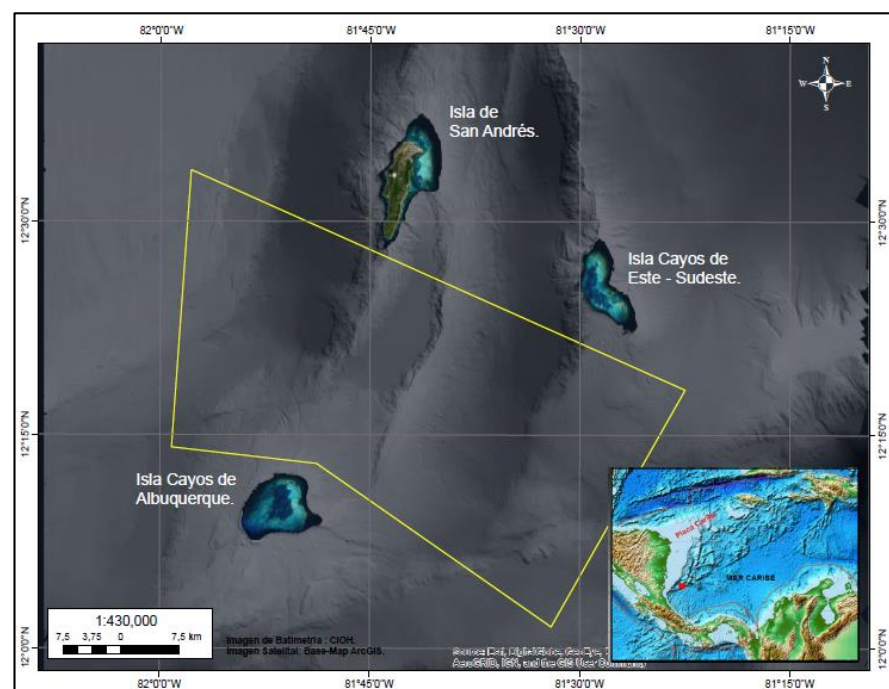


Figure 1. Polygon of acquisition in study area.

A magnetic survey measures the local magnetic field characteristics of a certain region. This type of technology only detects minerals and/or materials that respond to magnetic fields. For this reason, its applications are mainly aimed at mineral exploration, but it can also be useful for the exploration of coal, oil, and gas and in the detection of shipwrecks. [2,6,25,26]. A geophysical survey consists of different phases.

2.2. PHASE 1. Planning of the Acquisition Campaign

The form of the geophysical survey is established in this phase, and the times, the necessary inputs, and the possible unforeseen events that may occur at sea, are estimated.

Before planning the data acquisition, the study objective and the scale of the work (local or regional) should initially be taken into account. The configuration and length of the lines to be acquired will depend on these.

The generation of the acquisition grid is made based on the sought objectives. It is important to consider whether it is required to determine the regional magnetic field (e.g., changes of magnetic polarity reflected in the marine magnetic anomalies, regional guidelines, etc.), or to determine local geologic anomalies (e.g., geologic bodies and structures), or to identify the anomalies due to metallic objects produced by humans [27]. This is related to the fact that the geometric arrangement of the acquisition must take into account the spatial resolution of the body to be characterized—that is, the smaller the object, the denser and less spaced the survey grid must be.

It is also important to take into account the sensitivity of the sensors, since, to recognize an anomaly, this must be several times greater than the sensitivity (resolution) of the magnetometer and the external noise level. It is important to define this parameter to know if the object is detectable on the surface and, in such a case, how much the readings in the profile, and the distance between adjacent profiles, would have to be spaced (spacing of the grid). Ideally, a grid should be shaped to cover the whole area in such a way that the anomaly can be always detected by a profile. This means that there must be some overlapping between profiles [9].

Additional magnetic information is required, whether from magnetic observatories or from a Base Station near the survey area, with the purpose of improving the quality of the data. In this case, a Geometrics G-862 RBS Base Station (Figure 2) was used, which was acquired by the General Maritime Directorate in 2015. This was positioned at a minimum radius of 60 m from any source of electromagnetic interference. This reduces the errors that can occur in the data, due to fortuitous cases, such as electromagnetic interference from the solar field.



Figure 2. Installation of the Geometrics G-862 RBS Base Station.

Starting the planning activity, it is essential to have high-resolution bathymetric data, in order to support the identification of the geological structure that is required to be recorded with magnetometry [28]. As the objective of the project was to determine the magnetic anomalies, generated by the volcanic bodies and geological structures (faults)

located to the south of the SAPSC, in the vicinity of San Andrés Island, Cayos de Albuquerque Island and Cayos de Este- Sudeste Island (Figure 1). The survey lines were carried out, taking into account the geofoms displayed in the bathymetry. For this reason, the lines are established perpendicular to faults or other structures, in regular meshes, where it is ensured that the separation between lines is equal to the estimated minimum distance between the sensor and the magnetic object or target. This is why it is recommended to take into account the depths at which the survey will be carried out [29].

The area included in the geophysical research polygon, in which it was planned to undertake five main lines of acquisition, with a NW-SE direction (azimuth of 300°), with lengths between 70 and 57 km, and a separation of 7 km. The six control lines, oriented perpendicularly to the main lines, are distributed with a spacing of 23.50 km, and they have of an average length of 32 km (Figure 3). In order to calculate the days needed for the survey, the total length of the lines at the optimal survey speed in linear nautical miles was considered, assuming 24 working hours per day [9]. This calculation is shown in Tables 1 and 2.

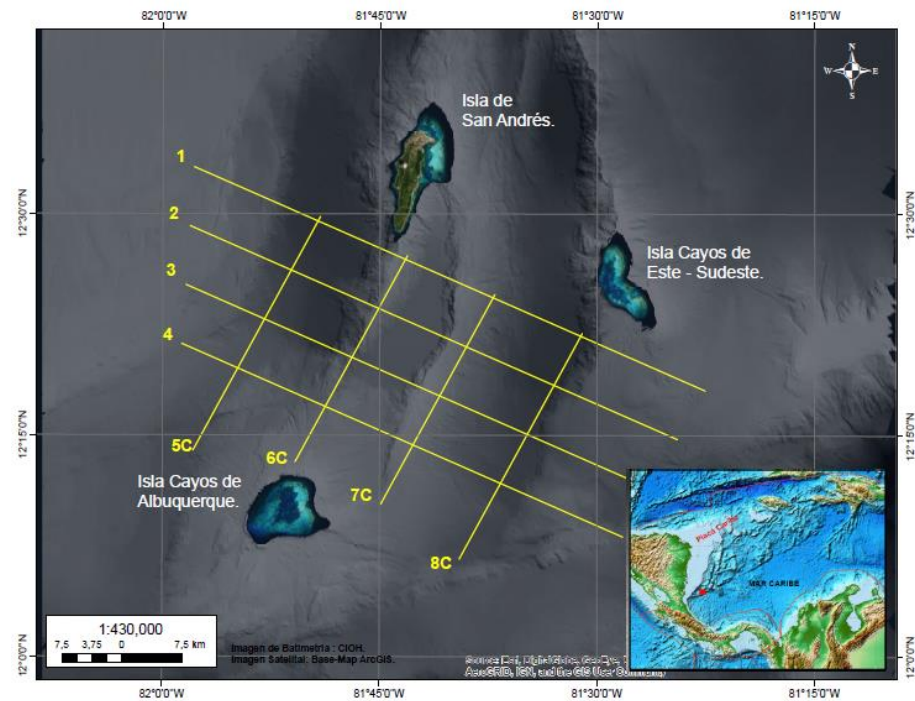


Figure 3. Lines of survey.

Table 1. Estimation of duration of the survey in days from linear nautical miles.

Survey	Number of Lines	Meters	LNM	Time in Days
San Andrés	4	317,087	171.213	2
Control lines	4	92,784	92.784	1
SURVEY				
120 LNM = 24 h				
263.99 LNM = 3 Days of survey				

Once the configuration of the survey was established, the times for the voyages and duration of the acquisition were estimated. As mentioned previously, it is important to maintain good data density that can adequately represent the objective; that is to say, the optimum survey speed was 5 knots, assuring that the intensity of the signal was stable, and 10 samples per second were obtained.

Finally, a meticulous control was made to ensure that the acquisition of the data was carried out successfully. In the case of consumable equipment, such as RS232-USB converters, it is ideal to have spare parts, in case of unexpected events.

Table 2. Estimation of time of the operation, including the displacement.

Activity	Days	Start Date	End Date
Voyage: Cartagena to San Andrés Island	02	D	D+2
Execution of the magnetometry survey in the deep waters off San Andrés Island	03	D+3	D+6
Voyage: Study area to Cartagena	02	D+2	D+8
TOTAL DAYS OF OPERATION: 08			

2.3. PHASE 2. Data Acquisition

The oceanographic research vessels, ARC Malpelo and ARC Providencia, were enabled to operate with the Geometrics G-882 marine magnetometer [30], property of the DIMAR (Figure 4). This apparatus has a broad range of detection for ferrous materials of various sizes and a sensitivity of $<0.004 \text{ nT}/\pi\text{Hz rms}$, which increases the probability of detection. It has a hydrodynamic design that helps reduce the probability of rock incrustation, and it operates to a depth of approximately 2750 m, and at temperatures from $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ to $50 \text{ }^\circ\text{C}$. The cesium-vapor sensor is at the rear of the “fish” in the cylinder that forms a T with the longest axis, where the direction of the sensor can be modified; this was vertical, as the work was to be carried out in equatorial latitudes. Finally, the sampling interval ranged from one sample every three seconds, to twenty samples per second, with an absolute precision of $<2 \text{ nT}$. The acquisition of field data was carried out with MagLog software from Geometrics Inc.



Figure 4. Geometrics G-882 marine magnetometer. Source Karem Oviedo Prada, 2020.

2.4. PHASE 3. Office and Data Processing

In this office phase, the data were analyzed and filtered and subsequently processed. Oasis Montaj version 8.5 software from Geosof was used for this, and ArcGIS version 10.7 software from ESRI was used for charting.

For this work, the data obtained from the NOAA repository of magnetic surveys carried out in the study area between 1970 and 1971 were used as a reference. A hydrographic and bathymetric survey was performed according to technical specifications of the International Hydrographic Organization (IHO), S-44 publication for Order 2 requirements [31,32]. These regulations guarantee the quality and standardization of the results. This geophysical working method is applicable in all the deep waters of the Colombian marine territory, which are considered to be from the isobath of 100 m, to the maximum registered depth of 4600 m. This specification is also stated by Standard S44 of the IHO [31,32], which recommends that Order 2 surveys are limited to areas deeper than 100 m [33]. Nevertheless, those reference data were about 50 years old, and there were no other modern data available for the study area until the current survey. However, nautical charts 1624 and 004 edited by the CIOH in 1998 and 2018, respectively [34,35], were taken into account to study the temporal and local variation of the geomagnetic field in the area. Thus, the declination, due to the annual variation effect, was corrected and was $4^\circ 18'$ (W) in 2020. Likewise,

the magnetic declination was compared with the data published in the AIP COLOMBIA Report of the Gustavo Rojas Pinilla Airport on San Andres Island, for 16 July 2020, which was $02^{\circ}48'$ W [36]. The difference in declinations is due to the separation between the San Andres Airport (North of the island) and the area where the magnetic declination is defined in the nautical chart 004, which is located about 90 km NE of the airport. For the analysis of magnetic declination, the procedure specified by Udias and Mezcuca [23] was followed.

In this work, the Minimum Curvature Gridding or Splines method and Geographic coordinate system were used. The Gridding method refers to the process of interpolating data onto an equally spaced grid of "cells" in a specific coordinate system. This interpolation method estimates values using a mathematical function that minimizes the curvature of the surface, resulting in a smooth surface that passes exactly through the input points [37–39].

2.5. Components

Going into the field, some indispensable elements must be taken into account to carry out an optimal acquisition. For example, the magnetometry sensor and the portable winch with 300 m of telemetry cable were specifically adapted to collect the geophysical information.

The vessel ARC Providencia (Figure 5) has special adaptations, such as a winch with 2800 m of telemetry cable (Figure 6), a wet laboratory aboard the ship, and the computer center where the magnetic data are visualized and stored in real time.



Figure 5. Research vessel ARC Providencia.



Figure 6. 2800 m geophysical research winch on board the ARC Providencia.

The assembly used in the vessels is shown in Figure 7. The magnetic data are communicated from the sensor and submerged in the water, passing through the winch, the on-board cable, and finally, arriving at a “junction box” where the magnetic data are related to those of the positioning obtained by the Global Navigation Satellite System [33,40]. From there, they are transmitted to and visualized in the computer by means of MagLog software [41], as shown in Figure 8.

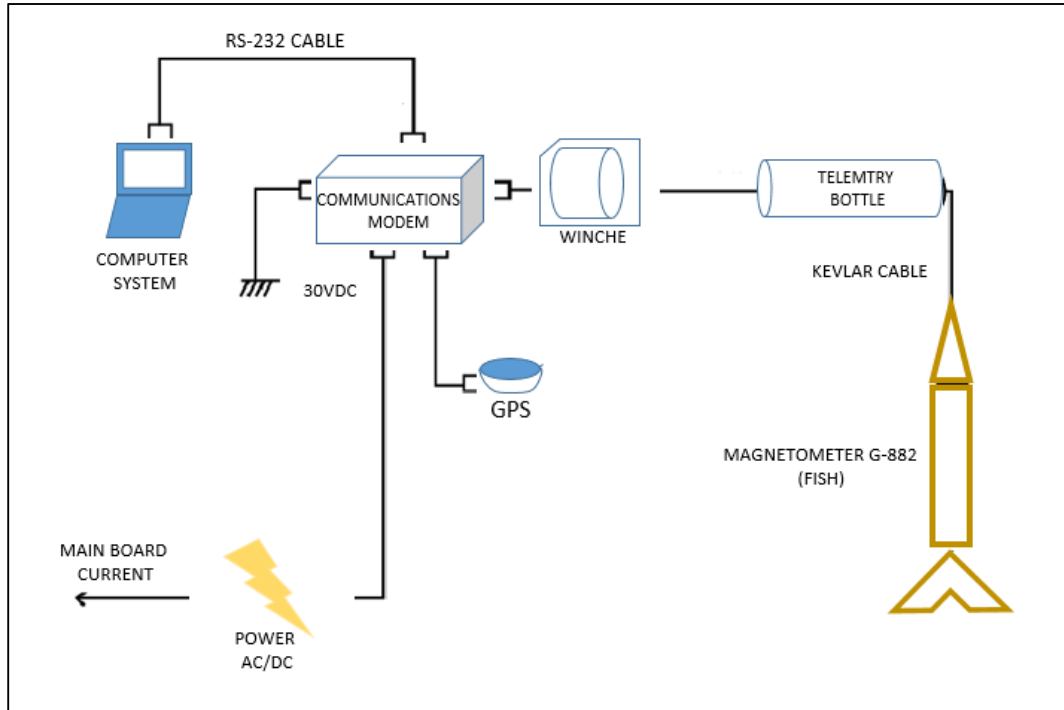


Figure 7. Assembly for the magnetic data acquisition.

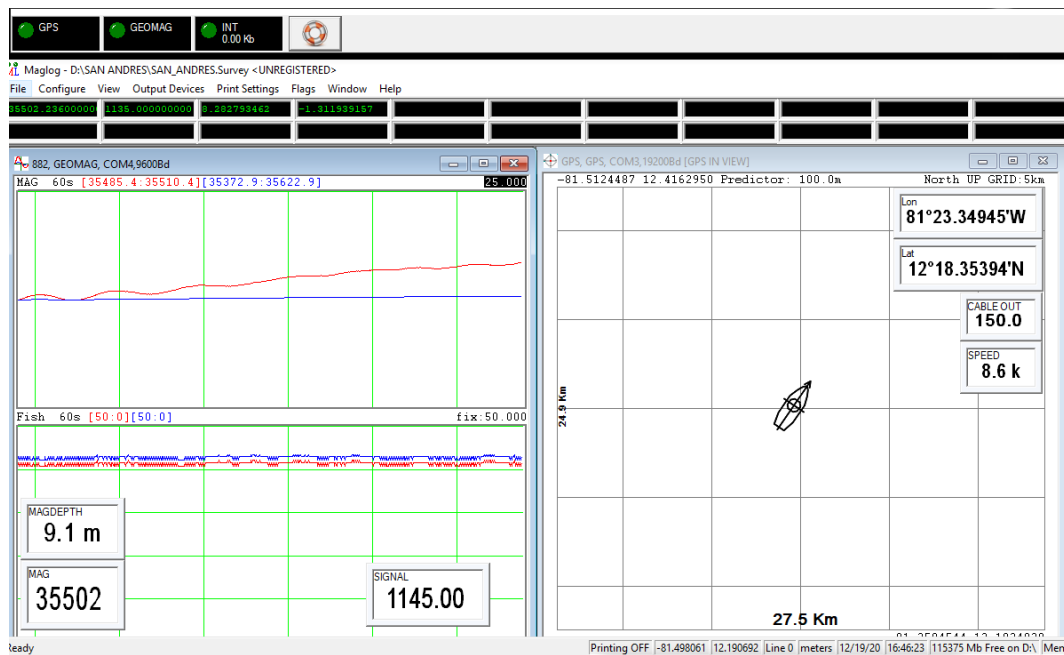


Figure 8. Visualization of geomagnetic information in MagLog software in real time.

In Figure 8, showing the visualization of data in real time, the red box to the left is the navigation window, where the position of the vessel and its course are shown. In addition, the lines that the helmsman must follow, according to the planning instructions, are indicated in this window [42]. The blue box, to the right, shows the curves of the data expected, or calculated, by the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model in that precise geographic position and the actual collected data. The small green indicators show the intensity of the signal, the magnetic data, and the positioning. All these indicators must be green, so that the data are correctly acquired. The red rectangle, in the extreme lower right, indicates that it is not recording, and it must be pressed to begin to record the data during the acquisition [37].

The acquisition is made with the help of the ship's personnel, taking into account certain guidelines, such as a maximum velocity of 5 knots, and a separation from the sensor of at least three times the length of the vessel, which in this case was 150 m. It is important that the "fish" is towed from the stern, as indicated in Figure 9.

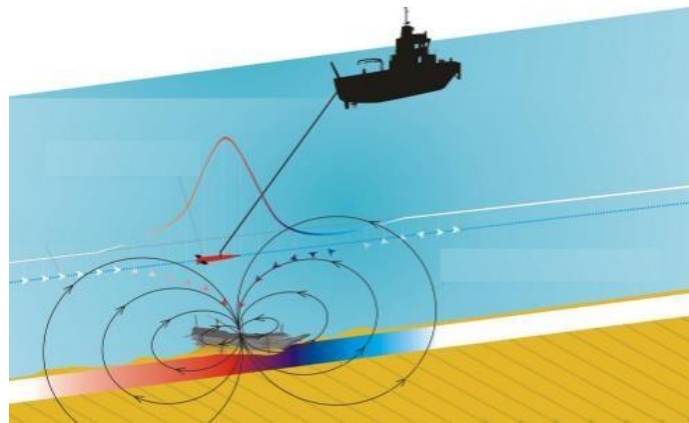


Figure 9. System of stern towing of the magnetometry equipment.

Magnetic recording is only useful in straight transects, whereas data from the turns between profile and profile are not considered, as the recorded values are affected by the magnetic field induced by the boat approaching each time a turn is made [43].

The different stages involved in the acquisition of marine geomagnetic data are subjected to a series of decisions that can radically affect the final result of the research [44]. Several usual errors exist that can be committed throughout the process, and which can be classified, according to the development stage of the study. For example, there are frequent errors related to planning that involve poor design of the lines to acquire, which could make it difficult to discern the exact form and size of the anomaly; a measurement is only of interest if the margin of error of that measurement is known. What is interpreted is a collection of data, which is why the sampling must be in accordance with the dimension of the objective to be reached. Other types of errors are associated with the measuring equipment, which can lead to mistaken readings and affect the quality of the data, operator errors, sampling errors, and errors related to environmental noise, among others. Some examples of error handling in geophysical and gravimetric data processing are shown in [45,46].

3. Results and Discussion

In the application of the method, some setbacks were presented in terms of what was planned. These were due to logistical issues with the vessel. It is also worth mentioning that the data collection was carried out on board the ship ARC Roncador, with a 300 m portable winch. The geometric arrangement had to be slightly less extensive than originally planned, as shown in Figure 10.

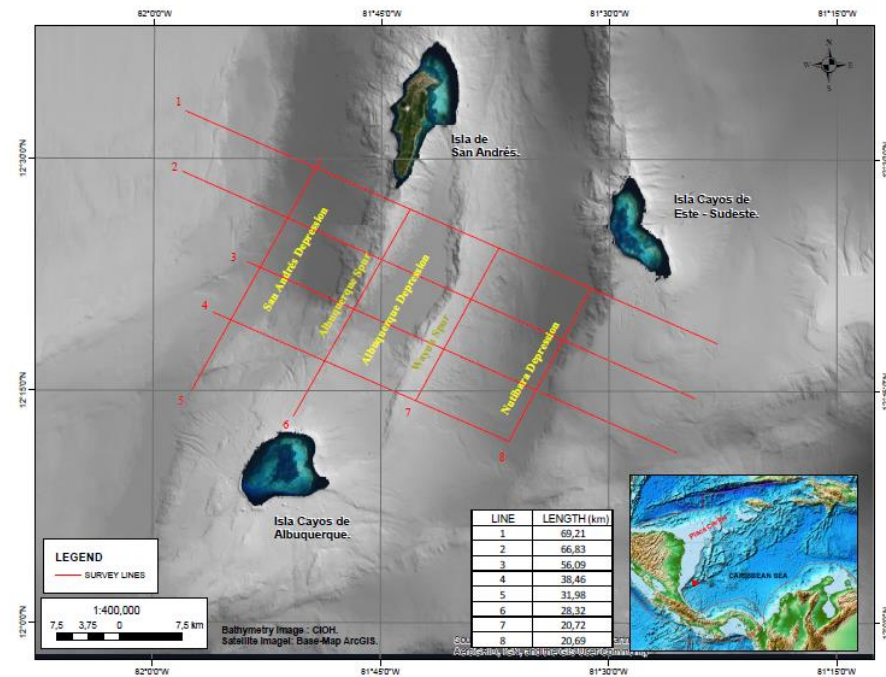


Figure 10. Geometric adjustment of the geomagnetic acquisition.

The geophysical study comprises the data collected between 20 June and 1 July 2018, in an area south of San Andrés Island, comprising four lines perpendicular to the general direction of geological structures, with a maximum length of 70.67 km, and four lines parallel to these formations, with a maximum length of 31 km. A grid-shaped geometric arrangement was preserved to provide good resolution for a regional geological study. The general direction of geological structures and geofoms has a northeast direction [47,48].

The chart of the total field of collected data appears in Figure 11, and it shows the magnetic surface of the collected data, after processing for corrections of diurnal variation, delay, direction in degrees, and of the IGRF mode [37]. A significantly positive anomaly was observed in this area, above the Nutibara Depression. The variations were in a range of -170.48 to $+159.37$ nT.

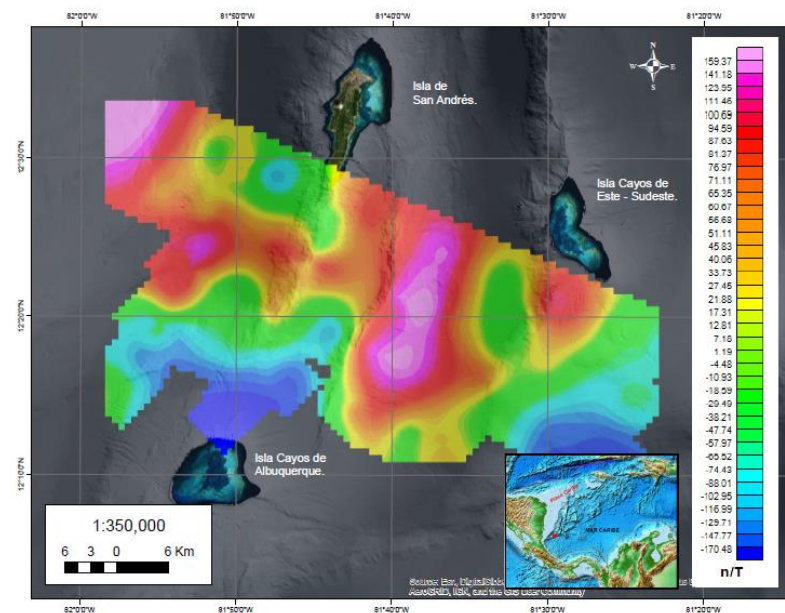


Figure 11. Geomagnetic surface of the total field with corrections.

In order to compare the obtained data with pre-existing data, a review was made of the bibliographical material and the data available from possible geomagnetic surveys carried out in the area. As a result, two research cruises were identified, giving free access to marine geomagnetic data from the National Oceanic and Atmospheric Administration [24], which are represented in two survey lines related to geophysical data that contain seismic, side-scan sonar, and magnetometry information. The first downloaded file of the zone, identified by code CH100L12, was collected by the Woods Hole Oceanographic Institution of the United States (WHOI) in 1971. The second file of the zone, identified by the code V2808, was collected by the Lamont–Doherty Earth Observatory of the United States between 1970 and 1971. The two compiled data lines appear in Figure 12.

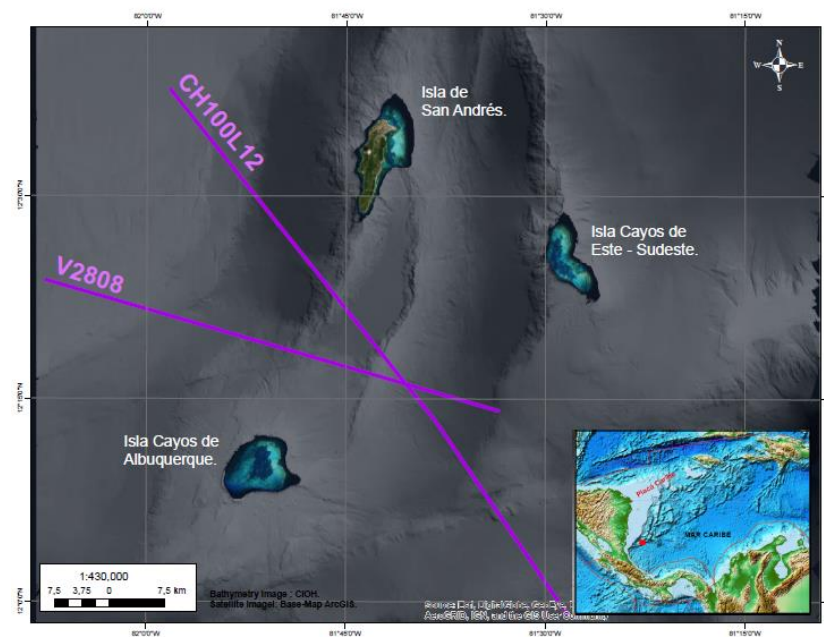


Figure 12. Tracking line chart of oceanographic cruises that acquired geomagnetic data in 1970 and 1971.

Taking into account that the magnetic field is dynamic and presents significant annual variations, an attempt was made to find geomagnetic information for the area, finding the only free access data to be those previously described, with the possible source of error of an elapsed time of around 50 years between both surveys. More current geomagnetic data on the study area have been found; however, these are global data obtained through NCEIs (National Center Environmental Information) global aeromagnetic project pertaining to the NOAA. They are aeromagnetic data obtained for the study and modeling of the Earth's magnetic field and have a much higher scale of resolution. In addition, their correction processes are different from the data obtained in situ, and specifically from those obtained in the geomagnetic surveys presented in this work. For those reasons, these aeromagnetic data were discarded for comparison, as they were incompatible in terms of resolution and processing [24]. On the other hand, the variations presented by the magnetic data during the half century between the two surveys have also been taken into account in this work. These variations have an important component of anomalies due to geological sources that have persisted in the study area during that time.

The magnetic information downloaded from NOAA [49] has an extension MGD77T and contains the positions of the tracking line and the data with corrections for diurnal variation and the IGRF. To be viewed on a common surface, the two geodatabases were joined and charted to WGS 1984 UTM Zone 17N, corresponding to the projection of the study area [39,50]. With the positional and magnetic intensity data, a magnetic surface was generated (Figure 13) showing positive and negative anomalies that vary from -328.99 to $+40.48$ nT.

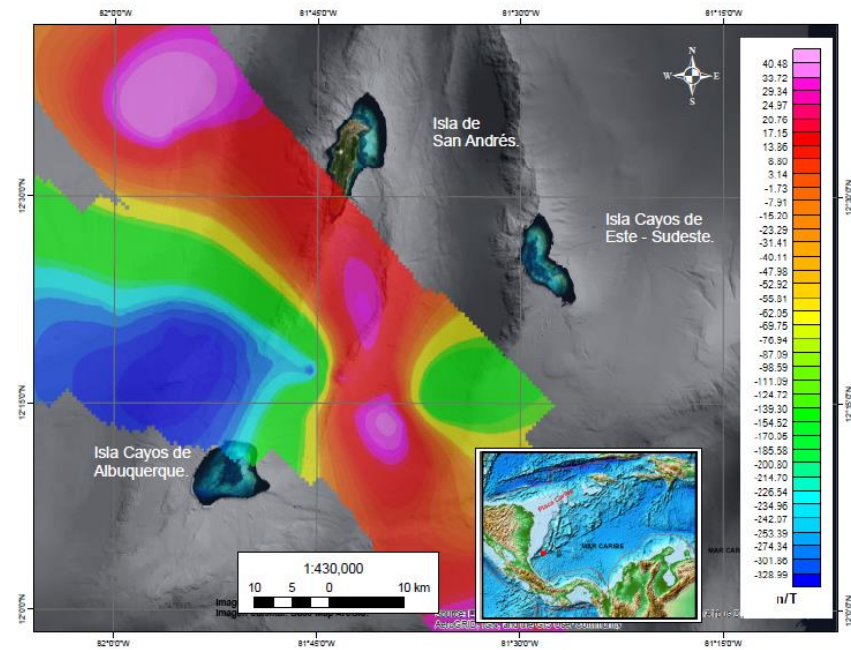


Figure 13. Geomagnetic surface of the total field, corresponding to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) data.

In order to visualize the surface of Figure 13, a magnetic grid was generated by the Minimum Curvature Method [38], with a cell size corresponding to 1000. In this image, magenta colors are observed that are associated with positive magnetic peaks, which are located toward the northwest and over the Nutibara Depression and the Wayuu Spur; the geofoms are mentioned in Figure 10.

The layouts of the two magnetic grids are shown in Figure 14, where the positive anomalies are similarly identified on the Wayuu stimulus and the Nutibara depression, to the east and northwest, at the low Nicaraguan elevation. As for the negative anomalies, the magnetic bass located on the areas near the island of Cayos de Albuquerque stands out.

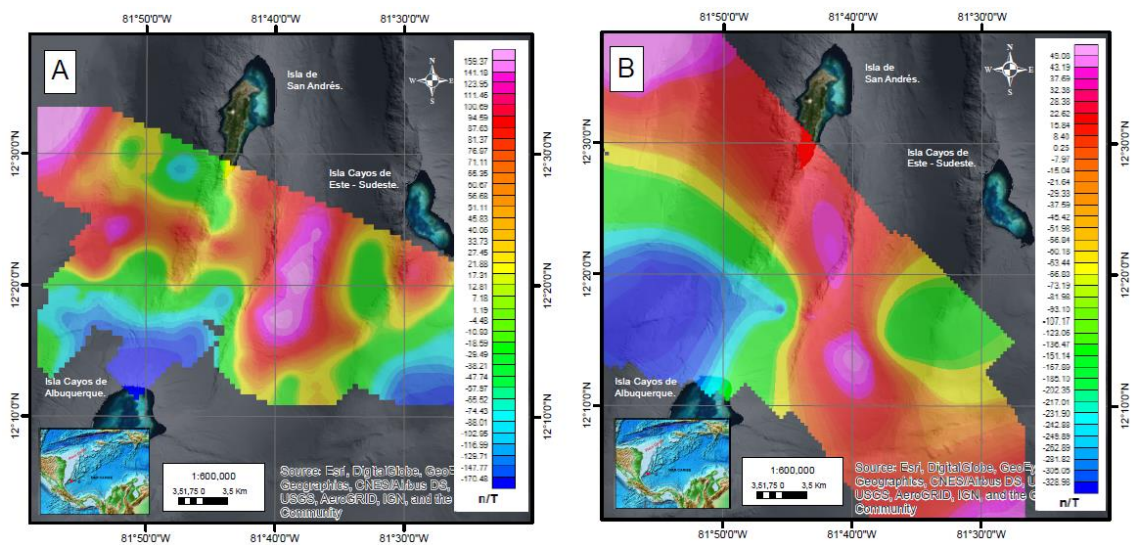


Figure 14. Geomagnetic surfaces of the total field. (A) Surveyed magnetic field. (B) Magnetic field from data downloaded from the NOAA.

It is important to mention that the color scales are not associated exactly with the same ranges on the two surfaces, but they are very close, remember that the color blue is always

associated with low magnetic and pink with high magnetic [51]. These differences are due to the main factor that it is a time difference between the two surveys of around 50 years, and from which other factors that influence the acquired data can be derived, such as the accuracy of the magnetic sensor, the disposition of the field magnetic model in 1970, which presents variations with respect to that of 2018. This due to the displacement of the field and the geometric arrangement used for each case.

Comparatively speaking, in Figure 14A, the magnetic peaks are within the range of -170.48 to 159.37 nT, while in Figure 14B, the magnetic lows and highs range from -328.98 to 45.08 nT, indicating a variation of 329.85 nT in Figure 14A and 374.06 nT in Figure 14B.

Using the NOAA magnetic calculator [52] and working with the magnetic data observed for the years 1970 and 2018, small but significant differences are identified in all the measurement variables, such as the inclination with $1^{\circ}46'47''$, the declination with $5^{\circ}2'41''$, and the magnetic field represented by 4415.7 nT. These results show a variation of the magnetic field across the timeline. It is important to highlight that these anomalies identified in the study area are geological in nature, which infers that they will be present as sources of magnetic anomalies for a very long period of time.

The significant magnetic anomalies, which can be seen in Figure 11, marked in fuchsia/magenta, correspond to a magnetic high. In Figure 10, it can be seen that this anomaly corresponds to the geomorphology of the Nutibara depression, and that it could be generated by some type of mineral deposition that can be found, associated with ferrous materials, or also with volcanic material with a high iron content compared to its geological environment. On the other hand, magnetic lows are observed north of the Cayos de Alburquerque Island, which would seem to be a contradiction, since its morphology is typical of a seamount, and, therefore, its magnetic response should be high [48,53,54].

The results of this work are very important for the scientific community, as this is an area where there is an immense lack of data. The data obtained in the survey, carried out in 2017 by the CIOH, 50 years later, are very important data taken in situ, with a high resolution that make them very reliable and precise, and they are unique in the area of the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina.

We have carried out an exhaustive search for data and geomagnetic surveys in the study area and, although no new works have been found, similar or related works have been carried out in the environment of the study area: magnetic mapping of the northern Caribbean region using marine magnetic data from GEODAS [55], works about gravity and magnetic field referring to hydrocarbon prospects at the Tobago Basin [56], geological description and interpretation in Providencia and Santa Catalina Islands [57], and many others related to tectonics and volcanism [58,59].

4. Conclusions

Surveying for the acquisition of geomagnetic data in marine environments is a method that is gaining ground worldwide, and it offers great opportunities for development and advances in new lines of research and scientific knowledge. In addition, it is a technology that supports different research and engineering projects, such as the detection of the location of pipelines and covers, buried ordnance, shipwrecks, identification of sites of archaeological interest, and the characterization of geological structures, among other applications, and also in projects related to national sovereignty and the study of a country's natural resources.

The methodology for marine geomagnetic acquisition has become the prime standard for marine geophysical research for the study of national resources and Colombian sovereignty.

Although geophysical exploration is dominated by established foreign companies, DIMAR now has the capacity to offer geophysical magnetometry services to different countries within its sphere, with excellent technical and human resources, and research equipment and vessels.

After much effort and field tests in the Colombian Caribbean, the geomagnetic acquisition procedure has been standardized as a methodology that can obtain high-quality marine geomagnetic information.

The acquisition of the G-882 marine magnetometer, the application of this methodology to a survey in the Colombian Caribbean, and the development of the magnetometry method have responded to the need of the DIMAR to recover the capacity for scientific research at national level, and scientific leadership in the region, by having an efficient tool in geological and archaeological prospecting supported by two modern, well-equipped scientific research platforms, namely, the ARC Malpelo and ARC Providencia research vessels.

Small differences have been identified between the magnetic data obtained for the years 1970 and 2018, being negligible in the variables measured, such as the inclination, declination, and total magnetic field. These results show a variation of the magnetic field across the very long timeline, so it can be inferred that these anomalies in the study area have an important geological component and will be present for a long time. These differences may also be attributable to the acquisition and processing methods used in the 1970s.

The results of this work are very important for the scientific community, because this is an area where there is a great lack of magnetic data. The data from the survey carried out in 2017 by the CIOH are very important due to the survey resolution reached, having achieved 91,285 data taken in the field at a rate of 20 data/second with an average ship speed of 7 knots, which managed to obtain a datum every 2 cm (0.02 m/datum).

Author Contributions: Conceptualisation, B.J.A.; J.J.M.-P. and K.O.P.; investigation and writing—original draft preparation, K.O.P., B.J.A., J.J.M.-P., J.R.C., N.O.M., F.C.-d.-V.; review and editing B.J.A., J.J.M.-P., F.C.-d.-V. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research for the acquisition and capture of geomagnetic data was supported by the Caribbean Oceanographic and Hydrographic Research Center (CIOH), attached to the General Maritime Directorate within the framework of the “Marine Geomagnetism Project”. The APC was funded by CIOH and RNM912 Coastal Engineering Research Group of the University of Cadiz.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the Centro de Investigaciones Oceanograficas e Hidrograficas de Colombia. The data are not publicly available due to military restrictions.

Acknowledgments: This work was possible thanks to the support of the “Marine Geomagnetism” project, financed by the General Maritime Directorate. The authors thank the crew of the ARC Roncador Oceanographic Research Vessel and the staff of the survey area of the Colombian Hydrographic and Oceanographic Research Center (CIOH) for their collaboration during the survey campaigns. We also thank the Captain of the Navy, Germán Augusto Escobar Olaya, Director General of CIOH for his support in the fieldwork and authorisation for the use of CIOH data for the preparation of this document. The authors thank Javier Idárraga García, the editors and the two anonymous reviewers for their comments and suggestions which greatly improved the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

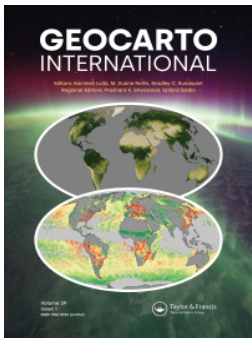
1. Allan, T. A review of marine geomagnetism. *Earth-Sci. Rev.* **2003**, *5*, 217–254. [[CrossRef](#)]
2. Ewing, M.; Heezen, B.C.; Ericson, D.B.; Northrop, J.; Dorman, J. Exploration of the Northwest Atlantic mid-ocean canyon. *GSA Bull.* **1953**, *64*, 865–868. [[CrossRef](#)]
3. Campbell, W.H. *Introduction to Geomagnetic Fields*, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2003; p. 337. ISBN 9781139165136.
4. Roy, K.K. *Potential Theory in Applied Geophysics*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008; p. 651. ISBN 13:9783540720898.
5. MnDOT (Minnesota Department of Transportation). Report Minnesota Deep Test Protocol Project, Chapter 11: COMPARISON OF OUTCOMES AND COSTS OF METHODS: FOUNDATIONS FOR A DEEP TEST PROTOCOL, Mn/DOT/WR-0200. Available online: <https://www.dot.state.mn.us/culturalresources/docs/deepsite/11CostBenefitScreen.pdf> (accessed on 1 July 2020).
6. Gallego, J.M.; Jaramillo, H.; Patiño, A. Servicios Intensivos en Conocimiento en la Industria del Petróleo en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Documento para Discusión N° IDB-DP-417. 2015. Available online: <https://pdfs.semanticscholar.org/b227/56f3b46037312b51e7dc93899ecbb1e0bb29.pdf> (accessed on 10 October 2020).

7. Jigena, B.; Berrocoso, M.; Torrecillas, C.; Vidal, J.; Barbero, I.; Fernandez-Ros, A. Determination of an experimental geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarct. Sci.* **2016**, *28*, 277–292. [CrossRef]
8. Muñoz-Pérez, J.J.; Gutiérrez, J.M.; Naranjo, J.M.; Torres, E.; Fages, L. Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bull. Mar. Sci.* **2000**, *67*, 761–772.
9. DIMAR (Dirección General Marítima de Colombia). *Manual de Adquisición y Procesamiento de Información Geomagnética*; DIMAR: Cartagena de Indias, Colombia, 2015; p. 180.
10. Milsom, J.; Eriksen, A. Field geophysics, fourth edition. *Environ. Eng. Geosci.* **2013**, *19*, 205–206. [CrossRef]
11. Schmidt, A. Archeology, magnetic methods. In *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*; Gubbins, D., Herrero-Bervera, E., Eds.; Encyclopedia of Earth Sciences Series; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; New York, NY, USA, 2007; pp. 23–31. ISBN 978-1-4020-3992-8. [CrossRef]
12. Rodríguez Álvarez, R. Geofísica General. 2010. Available online: <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/geofisica.htm> (accessed on 30 June 2020).
13. Deiana, R.; Leucci, G.; Martorana, R. New perspectives on geophysics for archaeology: A special issue. *Surv. Geophys.* **2018**, *39*, 1035–1038. [CrossRef]
14. Pérez-Orrego, C.E. Modelamiento e Interpretación de Datos Magnéticos y Gravimétricos en la Caracterización de un Depósito Tipo IOGC. Master's Thesis, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, Región Metropolitana, Chile, 2017; p. 127. Available online: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/149082/Modelamiento-e-interpretacion-de-datos-magneticos-y-gravimetricos-en-la-caracterizacion-de-un-deposito.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed on 8 July 2020).
15. Tchernychev, M.; Johnson, R.; Johnson, J.; Geometrics Inc. Multiple Magnetometer Sensor Array and Their Application in Marine Environmental Surveys. *Ocean News & Technology*. May 2014. Available online: <https://www.oceannews.com/featured-stories/may-multiple-magnetometer-sensor-arrays-and-their-applications-in-marine-environmental-surveys> (accessed on 17 July 2020).
16. Telford, W.M.; Gerald, L.; Sheriff, R. *Applied Geophysics*, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1990; p. 760.
17. Ariffin, K.S. Geophysical Surveying Using Magnetism Methods. EBS 309: Geofiz Carigali, Magnetik. Adapted from ES304—Geophysical Prospecting, Earth Science Department University of Melbourne, Australia, n.d. Available online: <http://www.ukm.my/rahim/G-Magnetism%20Methods.pdf> (accessed on 20 August 2020).
18. Goguitchaichvilia, A.; Hernández-Quintero, E.; García, R.; Cejudo, R.; Cifuentes, G.; Cervantes, M. Fluctuation of the Earth's magnetic field elements in Mexico revealed by archive documents since 1587. *Phys. Earth Planet. Inter.* **2020**, *300*, 106433. [CrossRef]
19. Ramírez, E.; Sánchez-Rojas, J.; Orihuela, N.; Schmitz, M. Adquisición y procesamiento de datos gravimétricos y magnéticos en el Perfil Calabozo. In Proceedings of the Jornadas de Investigación Encuentro Académico Industrial, Universidad Central de Venezuela, Dabajuro, Caracas, Venezuela, 25–28 November 2014. Available online: https://www.researchgate.net/publication/283488360_ADQUISICION_Y_PROCESAMIENTO_DE_DATOS_GRAVIMETRICOS_Y_MAGNETICOS_EN_EL_PERFIL_CALABOZO_-_DABAJURO (accessed on 16 November 2020).
20. Hatakeyama, T.; Kitahara, Y.; Yokoyama, S.; Kameda, S.; Shiraiishi, J.; Tokusawa, K.; Mochizuki, N. Magnetic survey of archaeological kiln sites with Overhauser magnetometer: A case study of buried Sue ware kilns in Japan. *J. Archaeol. Sci. Rep.* **2018**, *18*, 568–576. [CrossRef]
21. Hinze, W.J.; Von Frese, R.R.B.; Saad, A.H. *Gravity and magnetic exploration: Principles, Practices, and Applications*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2017; p. 502. ISBN 978-0-521-87101-3. Available online: https://assets.cambridge.org/9780521871013/frontmatter/9780521871013_frontmatter.pdf (accessed on 8 July 2020).
22. Reeves, C. *Aeromagnetic Surveys: Principles, Practice and Interpretation*; Geosoft: Delft, The Netherlands, 2005; Volume 35. Available online: https://files.seequent.com/PDFs/Aeromagnetic_Survey_Reeves-october-2005.pdf (accessed on 29 July 2020).
23. Udías Vallina, A.; Mezcua Rodríguez, J. *Fundamentos de Geofísica*; Alianza Editorial: Madrid, Spain, 1997; p. 480. ISBN 978-84-206-8167-2.
24. NOAA-NCEI (NOAA National Centers for Environmental Information, NCEI). Marine Geology and Geophysics > Geophysics. Available online: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml> (accessed on 30 June 2020).
25. Fernández-Montblanc, T.; Quinn, R.; Izquierdo, A.; Bethencourt, M. Evolution of a Shallow Water Wave-Dominated Shipwreck Site: Fougueux (1805), Gulf of Cadiz. *Geoarchaeology* **2016**, *31*, 487–505. Available online: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/gea.21565> (accessed on 17 May 2020). [CrossRef]
26. Fernández-Montblanc, T.; Del Río, L.; Izquierdo, A.; Gracia, F.; Bethencourt, M.; Benavente, J. Shipwrecks and man-made coastal structures as indicators of historical shoreline position. An interdisciplinary study in the Sancti Petri sand spit (Bay of Cádiz, SW Spain). *Mar. Geol.* **2018**, *395*, 152–167. [CrossRef]
27. Introcaso, A.; Ghidella, M.E.; Ruiz, F.; Crovetto, C.B.; Introcaso, B.; Paterlini, C.M. Métodos gravi-magnetométricos modernos para analizar las características estructurales de la plataforma continental argentina. *Geoacta* **2008**, *33*, 1–20.
28. Plets, R.; Dix, J.; Bates, R. *Marine Geophysics Data Acquisition, Processing and Interpretation. Guidance Notes*; Jones, D.M., Ed.; English Heritage: Swindon, UK, May 2013; 48p, Available online: <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/marine-geophysics-data-acquisition-processing-interpretation/mgdapai-guidance-notes/> (accessed on 20 November 2020).

29. Barrows, L.; Rocchio, J.E. Magnetic surveying for buried metallic objects. *Ground Water Monit. Remediat.* **1990**, *10*, 204–211. [[CrossRef](#)]
30. Geometrics. G–882 CESIUM MARINE MAGNETOMETER 25919-OM REV. FI. Operation Manual, Copyright. 2005. Available online: https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/G-882Man_RevF.pdf (accessed on 20 June 2020).
31. IHO (International Hydrographic Organization). *IHO Standards for Hydrographic Surveys*, 6th ed.; IHO: Monte Carlo, 2020. Available online: https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44_Edition_6.0.0-Final.pdf (accessed on 15 November 2020).
32. Carrillo de Albornoz, P.; Francisco, J. El Instituto Hidrográfico de la Marina. *Revista Arbor, Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC, Arbor CLXXIII*, 682. Octubre 2002, pp. 365–383. Available online: <https://core.ac.uk/download/pdf/207331548.pdf> (accessed on 15 October 2020).
33. Jigena, B.; de Gil, A.; Walliser, J.; Vidal, J.; Muñoz-Perez, J.J.; Pozo, L.; Lebrato, J. Improving the learning process in the subject of basic maritime training using GPS and Google Earth as useful tools. In *Proceedings of the INTED2016 Conference, Valencia, Spain, 7–9 March 2016*; pp. 6161–6171. ISBN 978-84-608-5617-7.
34. CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas). Carta Número 1624, Islas de San Andrés y Providencia, 1ra. Ed. Enero 1998, Escala 1:100.000. 1998. Available online: https://www.cioh.org.co/derrotero/wrapperDerrotero/cartas/carta_papel.php?codigocarta=1624 (accessed on 16 October 2020).
35. CIOH (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas). Carta Número 004, Archipiélago de San Andres y Providencia, 3a Ed. 2018, Escala 1: 600000. 2018. Available online: https://www.cioh.org.co/derrotero/wrapperDerrotero/cartas/carta_papel.php?codigocarta=004 (accessed on 16 October 2020).
36. AIP COLOMBIA (Servicios de Información Aeronáutica de la Dirección de los Servicios a la Navegación Aérea). *Informe AIP AD 2—SKSP 1 del 16 de Julio de 2020*; Aeródromo SKSP: San Andreas, Colombia, 2020.
37. Tchernychev, M. MAGPICK-Magnetic Map&Profile Processing User Guide. Beta Version of the Manual—Last Revised 12/12/2013, Copyright (C) 1997 Mikhail Tchernychev. Available online: <https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/MagPick.pdf> (accessed on 15 July 2020).
38. Geosoft. Oasis Montaj How-to Guide. Oasis Montaj Gridding. Available online: http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis_montaj_Gridding.pdf (accessed on 15 July 2020).
39. Fernández-Coppel, I.A. Las Coordenadas Geográficas y la Proyección UTM. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Palencia. 2001. Available online: <https://www.cartesia.org/data/apuntes/cartografia/cartografia-geograficas-utm-datum.pdf> (accessed on 20 August 2020).
40. Geometrics. G-856 Memory-MagTM Proton Precession Magnetometer OPERATOR'S MANUAL. P/N 18101-02. Available online: http://userpage.fu-berlin.de/~{j}geodyn/instruments/Manual_Geometrics_G856.pdf (accessed on 16 November 2020).
41. Geometrics. MagLogPro™ MagLogLite™ Data Acquisition Software 25479-01 Rev. R. Available online: <https://geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/MagLogManual.pdf> (accessed on 20 June 2020).
42. Schwartz, A.B. Magnetometer system for detecting OE in very shallow marine environments. In *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*; 2004; pp. 1722–1733. ISSN 1554-8015. Available online: <https://doi.org/10.4133/1.2923318> (accessed on 20 November 2020).
43. Calcina, M. UN MODELO DINÁMICO PARA EL CAMPO GEOMAGNÉTICO. *Revista Boliviana de Física*. Cited on 20 June 2020. Volume 15, pp. 44–62. Available online: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232009000100008&lng=es&tlng=es (accessed on 20 November 2020).
44. Geotem Ingeniería, S.A. Magnometría Marina. Available online: <http://www.geotem.com.mx/marinos4.php> (accessed on 9 June 2020).
45. Berrocoso, M.; Prates, G.; Fernández-Ros, A.; Peci, L.M.; De Gil, A.; Rosado, B.; Páez, R.; Jigena, B. Caldera unrest detected with seawater temperature anomalies at Deception Island, Antarctic Peninsula. *Bull. Volcanol.* **2018**, *80*, 41. [[CrossRef](#)]
46. Berrocoso, M.; Gárate, J.; Martín, J.; Fernández, A.; Moreu, G.; Jigena, B. Improving the local geoid with GPS. In *Reports of the Finnish Geodetic Institute 96.2*; Finnish Geodetic Institute: Helsinki, Finland, 1996; pp. 96–102.
47. Javier Idárraga-García, J.; Masson D., G.; García, J.; León, H.; Vargas, C.A. Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean). *Mar. Geol.* **2019**, *414*, 18–33. [[CrossRef](#)]
48. Idárraga-García, J.; León, H. Unraveling the underwater morphological features of roncador bank, archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (Colombian Caribbean). *Front. Mar. Sci.* **2019**, *6*. [[CrossRef](#)]
49. NOAA-NCEI (NOAA National Centers for Environmental Information, NCEI). Bathymetric Data Viewer. Available online: <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> (accessed on 30 June 2020).
50. Berrocoso, M.; Paez, R.; Jigena, B.; Caturla, C. The RAP net: A geodetic positioning network for Andalusia (South Spain). In *Proceedings of the EUREF Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Riga, Latvia, 14–17 June 2006*; pp. 364–368.
51. Narváz Medina, L. Modelo de Fuentes de Anomalías Geomagnéticas de Campo Total Asociadas al Estado de la Cámara Magnética del Volcán Galeras. Universidad Nacional de Colombia, 2012. Available online: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75128/194379.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed on 15 December 2020).
52. NOAA-NCEI (NOAA National Centers for Environmental Information, NCEI). Magnetic Field Calculators. Available online: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm> (accessed on 30 June 2020).
53. Milliman, J.D.; Supko, P.R. On the geology of San Andres Island, western Caribbean. *Geol. Mijm.* **1968**, *47*, 102–105.

54. Geister, J.; Díaz, J.M. Reef Environments and Geology of an Oceanic Archipelago: San Andres, Old Providence and Sta. Catalina (Caribbean Sea, Colombia). Colombia: Boletín Geológico Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas Mineras, 142. 2007. Available online: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/AmbGeolArch.SAnd.Prov.SCat.en.PDF> (accessed on 20 November 2020).
55. Catalán, M.; Martín-Dávila, J.J. Lithospheric magnetic mapping of the northern Caribbean region. *Geol. Acta* **2013**, *1*, 311–320.
56. Yuan, B.; Song, L.; Han, L.; An, S.; Zhang, C.; Bingqiang, Y.; Li, H.; Shaole, A.; Chunguan, Z. Gravity and magnetic field characteristics and hydrocarbon prospects of the Tobago Basin. *Geophys. Prospect.* **2018**, *66*, 1586–1601. [[CrossRef](#)]
57. Alvarez-Gutiérrez, Y.; Amaya-López, C.; Barbosa-Mejía, L.N.; Builes-Carvajal, J.S.; Henao-Casas, J.D.; Montoya-Cañola, S.M.; Pacheco-Sintura, P.A.; Ramírez-Hoyos, L.F.; Urrego-Osorio, S.; Zapata-Montoya, A.M.; et al. Geological description and interpretation of Providencia and Santa Catalina Islands. *Boletín Cienc. Tierra* **2014**, *35*, 67–81.
58. Xu, X.; Keller, G.R.; Guo, X. Dip variations of the North American and North Caribbean Plates dominate the tectonic activity of Puerto Rico-Virgin Islands and adjacent areas. *Geol. J.* **2015**, *51*, 901–914. [[CrossRef](#)]
59. Geldmacher, J.; Hoernle, K.; Bogaard, P.V.D.; Hauff, F.; Klügel, A. Age and Geochemistry of the Central American Forearc Basement (DSDP Leg 67 and 84): Insights into Mesozoic Arc Volcanism and Seamount Accretion on the Fringe of the Caribbean LIP. *J. Pet.* **2008**, *49*, 1781–1815. [[CrossRef](#)]

1.2 Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea



Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea

Karem Oviedo-Prada, Juan J. Muñoz-Perez, Germán Escobar-Olaya, Ana Maria Osorio-Granada, Stephan Howden, Cristina Torrecillas-Lozano, Jeanette Romero-Cozar, Antonio Contreras-de-Villar, Hermann Leon-Rincon & Bismarck Jigena-Antelo

To cite this article: Karem Oviedo-Prada, Juan J. Muñoz-Perez, Germán Escobar-Olaya, Ana Maria Osorio-Granada, Stephan Howden, Cristina Torrecillas-Lozano, Jeanette Romero-Cozar, Antonio Contreras-de-Villar, Hermann Leon-Rincon & Bismarck Jigena-Antelo (2024) Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea, *Geocarto International*, 39:1, 2321365, DOI: [10.1080/10106049.2024.2321365](https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2321365)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2321365>



© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group



Published online: 11 Mar 2024.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 680



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Results of high-resolution technologies applied in the acquisition of seafloor information in the Colombian Caribbean Sea

Karem Oviedo-Prada^{a,b}, Juan J. Muñoz-Perez^a, Germán Escobar-Olaya^b, Ana Maria Osorio-Granada^{a,b}, Stephan Howden^c, Cristina Torrecillas-Lozano^{d,e}, Jeanette Romero-Cozar^a, Antonio Contreras-de-Villar^a, Hermann Leon-Rincon^b and Bismarck Jigena-Antelo^{a,c}

^aUniversidad de Cádiz, Campus de Puerto Real, CASEM, Puerto Real, Spain; ^bOceanographic and Hydrographic Research Centre of the Caribbean, Cartagena de Indias, Colombia; ^cHydrography Science Research Center, University of Southern Mississippi, Long Beach, MS, USA; ^dDepartamento de Ingeniería Gráfica, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain; ^eKongsberg Maritime Training Center, Boca del Río, Veracruz, Mexico

ABSTRACT

We expound on a hydrographic and geophysical survey in the south of the Archipelago of San Andres, Providencia, and Santa Catalina (ASPSC) in the Colombian Caribbean Sea. In 2017 and 2018, high-resolution data were acquired from the Caribbean Center for Oceanographic and Hydrographic Research (CIOH). The hydrographic data were processed and filtered per International Hydrographic Organization (IHO) standards and the geomagnetic data were processed, corrected, and filtered to improve the interpretation. We could then characterise the submarine relief, analyse the geomagnetic anomalies in the area, and identify different relief forms of volcanic origin. Regarding geomagnetic work, a spectral analysis of the anomalies revealed highly magnetic bodies in deep water and residual magnetic anomalies strongly related to the seabed morphology. Magnetic highs associated with the basement highs and volcanic cones were detected. Complementary spectral analysis showed that the shallowest magnetic sources were in the first 500 m, whereas the deepest magnetic sources were between the depths of 4 and 5 km. The geomagnetic data were also validated using Euler deconvolution analysis, which confirmed these magnetic anomalies. Thus, a direct relationship between the magnetic anomalies and bathymetry of the seafloor was confirmed, reinforcing the theory of the volcanic origin of these islands.

ARTICLE HISTORY

Received 31 July 2023

Accepted 15 February 2024

KEYWORDS

Colombian Caribbean Sea; ASPSC; bathymetry; magnetic anomalies; marine geo-physics

CONTACT Bismarck Jigena-Antelo  bismarck.jigena@gm.uca.es

© 2024 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

1. Introduction

Magnetic methods for geological applications were developed in 1630 in Sweden, with a focus on iron ore prospecting (Hanna 1990). In the oil industry, these have been used as reconnaissance methods in regional surveys since the beginning of the last century (López-Loera et al. 2013). Marine magnetic anomalies are used to investigate the extent of the seafloor and the transition between continental crust and oceanic crust at passive margins and zones with high iron content (Granot and Dyment 2019). Potential theory methods (Telford et al. 1990; Blakely et al. 2002) have enabled magnetometry to become a source of information for studying fault zones and their possible reactivations (Blakely et al. 2002). It has also been used to evaluate the magnetic properties of volcanoes (Finn and Williams 1987; Berrocoso Domínguez et al. 2018), establish the existence of volcanic magnetic belts, and study their relationship with geodesy and topography (Flanagan and Williams 1982; Honkura et al. 1991; Bernabéu et al. 2001; Jigena et al. 2016). Magnetic methods have also been used to locate intrusive bodies in subsurfaces with no surface manifestations (Finn and Williams 1987; Oviedo et al. 2020).

The first geomagnetic data for the study area were obtained in the early 1970s. Two research cruises led by the National Oceanic and Atmospheric Administration were conducted. Several authors have described the western Colombian Caribbean Sea (e.g. Geister 1992; Geister and Diaz 2007) as a volcanic province with coral formations (Figure 1). Several theories and magnetic studies of the Caribbean Sea have been conducted with different hypotheses, such as Driscoll and Diebol (1998), denoting the presence of a fracture in a plate as evidence of two plates instead of one. (Catalán and Martos 2022) suggested the presence of local anomalous bodies that could be correlated with volcanic structures, which generated concerns about more specific areas.

From multibeam bathymetry data, a series of submarine geofoms have been identified south of San Andres Island, such as depressions of tectonic origin (the San Andres,

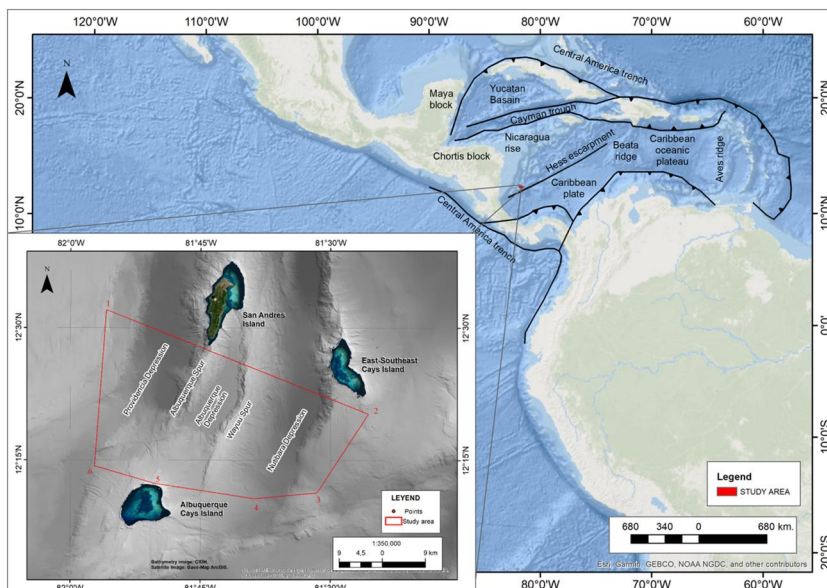


Figure 1. Location of the study area. Main: Shaded relief map showing the location of the study area and the major tectonic features in the Caribbean. In the inset shows zoomed study area in the northwestern Colombian corresponding to the red polygon. Grey shows the CIOH high-resolution bathymetry. The blue background shows the ArcGIS Ocean base map.

Albuquerque, and Nutibara Depressions), volcanic spurs (Albuquerque and Wayuu Spurs), and a series of fault systems, mostly in the NNE-SSW direction (Idárraga-García and León 2019). Based on such bathymetry, there is an imminent need to increase the number of geological and geophysical studies in this area to identify magnetic anomalies that may be associated with volcanic bodies and submerged reefs (Oviedo et al. 2020).

The bathymetry influences the magnetic response because it is highly dependent on the distance from the sensor to the seabed. Therefore, if there is shallow bathymetry, the magnetic response will be stronger than that of the same source in deeper bathymetry. In addition, we must consider that the magnetic response depends on the presence of magnetic materials in the rock; however, as mentioned previously, it also depends mainly on the distance to the source. This study was based on the assumption that a clear correlation exists between the elevations of the measurement point magnetic field for a relatively homogeneous magnetic medium. In the case of direct magnetisation, the field maxima correspond to the crests of the ‘magnetic’ relief, while the minima correspond to the valleys (Eppelbaum 2019).

The main contribution of this study was to test the implementation of the marine geomagnetic method developed by the National Hydrographic Service of Colombia (Oviedo et al. 2020; CIOH 2024). This project was motivated by the lack of information on the magnetic signatures of the complex of islands, atolls, and reefs, and the need to complement the physiographic descriptions made by the authors mentioned above. Finally, the objective of this study was to demonstrate the usefulness of high-resolution surveys for detecting magnetic anomalies and improving seafloor relief information. For this purpose, the methodology and results of its application to a zone in the Colombian Caribbean are presented.

2. Geological background

2.1. Study area

This study tests the implementation of the marine geomagnetic method developed by the Colombian National Hydrographic Service (Quintero et al. 2014) and is motivated by the lack of information on the magnetic signatures of the island complex, which can complement the physiographic descriptions made by other authors (Rey et al. 2021; Zou et al. 2021). In addition, although the study area is small (1050 km²), it has great geological, geomorphological, and oceanographic diversity (Payo et al. 2018; Rey et al. 2021; Jigena-Antelo et al. 2023).

The ASAPSC is located in the western Colombian Caribbean Sea. It extends from 12° N latitude and from the border with Panama in the southwest (SW) at 79° W longitude to the Guajira Peninsula in the northeast (NE) at 81° W. The study area is delimited by the island of San Andres and a group of smaller cays represented by atolls and coral reefs (Geister 1992; UN 1982) (Table 1).

Table 1. The coordinates that delimit the area.

Vertex	Latitude (N)	Longitude (W)
1	12°31'50.91"N	81°55'44.07"W
2	12°20'15.26"N	81°25'37.20"W
3	12-11'23.59"N	81°31'28.24"W
4	12°10'35.44"N	81°38'51.98"W
5	12°12'23.75"N	81°50'12.05"W
6	12°14'16.47"N	81°57'8.33"W

Freely accessible data only offer a solid foundation in a broad sense due to their resolution limitations. The GMRT bathymetric model and the EMAG2 magnetic model reflect distinct curves and have no direct relationship. EMAG2v3 has been used which does not use any prior age information. It follows that hydrographic and geophysical surveys yield relatively little information due to their lack of resolution and detail. In fact, if a more thorough study is required, high-resolution data must be obtained using suitable survey techniques that enable the processing and creation of investigative-style final products.

2.2. Geological and tectonic context

Geologically, ASPSC is located in the western part of the Caribbean Plate. This plate is located in the middle of the Cocos, Panama, North Andes, South America, and North America plates. The evolution of the Caribbean Plate throughout the Cenozoic was controlled by sediment accumulation, structural deformation of the pre-existing crust, and volcanism.

The study area is part of a geological province known as the Lower Promontory of Nicaragua (LNR) (UN 1982), which is a crustal block bounded to the northwest by the Pedro Escarpment and to the southeast by the Hess Escarpment, a zone of distensive character since the Middle Miocene (Holcombe et al. 1990; Mauffret and Leroy 1997). Recently (Case et al. 1990), based on gravimetry, magnetic modelling, and integration with seismic data, it has been concluded that the LNR is composed of oceanic crust (Carvajal Arenas 2017; Osorio-Granada et al. 2022).

It has been proposed that the tectonic evolution of the region started from two eroded volcanic cones whose geological history is closely related to the evolution of the Nicaraguan High and part of the Caribbean Plate (Case et al. 1990; Pindell et al. 2006). It was concluded that the atolls, islands, and coral banks may have originated from volcanic activity during the Early Cenozoic (Geister and Diaz 2007). Within the study area, the main structures are as follows:

San Andres Island: The age is estimated to be Palaeogene, which is compatible with the geological history of the western Caribbean crust. The simultaneous subsidence and carbonate production in the Miocene shallow sea resulted in the formation of a thick atoll-type limestone bank at the top of the volcanic structure (Geister 1992).

Albuquerque Cays Island: This atoll is the only one with a circular outline. According to palaeomagnetic data from a sample of a fragment of basaltic lava obtained from its northwestern slope at a depth of approximately 700 m, the atoll has a volcanic basement (Milliman 1969).

East-Southeast Cays Island: The southern half of the atoll has a SE-NW orientation, while the northern half shows a clear NNE-SSW direction. This could indicate an important site for the triple intersection of the two fault zones with different strike slips that underlie the presumed volcanic cone that appears to form the basement of the atoll (Geister and Diaz 2007).

3. Data and methods

3.1. Bathymetric survey

Bathymetric data were acquired between August and September 2017. On board the Oceanographic Research Vessel of the Colombian Navy 'ARC Providencia', a Kongsberg

model EM302 multibeam system with an operating frequency of 30 kHz was used (Kongsberg 2023).

The bathymetric survey in the area was composed of approximately 38 lines perpendicular to the general direction of NNE geology with an average length of 70 km. For the shallow waters adjacent to the emerged area of the islands, increasing the density of the lines was necessary to cover the whole zone while maintaining the overlapping (Oviedo et al. 2020; CIOH 2024). As a result, a bathymetric chart at the study area with a spatial resolution of 35 m per pixel was obtained.

The software used for hydrographic data collection is the Sea Information System (SIS) configured with an opening angle of 70°, performing a 30% overlap seeking to ensure 100% bottom coverage, according to IHO (International Hydrographic Organization) standards (IHO 2020). Additionally, differential positioning with the Seapath system was used, which guarantees centimetre accuracy in the bathymetric survey. For the horizontal and vertical referencing of hydrographic data, a previously proposed methodology (Jigena et al. 2015, 2016; Nwankwo et al. 2020) has been used.

3.2. Geomagnetic survey

Geomagnetic data were acquired aboard ARC Roncador between 20 June and 1 July 2018. A G-882 magnetometer with a sampling rate of 20 Hz was used (IHO 2020). It was towed at 150 m from the vessel at an average speed of seven knots. The positioning system used for the sensor was Trimble R7 with real-time correction in the WGS84 reference system (Berrocoso Domínguez et al. 2008; Jigena et al. 2016; Oviedo et al. 2020; Nwankwo et al. 2020). The implemented geometric arrangement for magnetometry considered a line spacing of 12 km, and a spatial resolution of 500 m per pixel was obtained.

Data collection was performed using MagLog software. Total Magnetic Field was calculated in nT, with a typical sensitivity of 0.02 nT at 0.1 s sample intervals, operating over an operating range of 20,000 nT to 100,000 nT (Geometrics Inc 2018).

The geophysical survey comprised four lines perpendicular to the general direction of the geological structures NNE (lines 1, 2, 3, and 4) with a maximum length of 70.67 km, and four lines parallel to the formations (lines 5, 6, 7, and 8) with a maximum length of 31 km (see Figure 10 in Oviedo et al. 2020).

3.3. Processing

The geomagnetic data were processed using the Oasis Montaj software, version 8.5.5, Geosoft (Seequent 2022). The data were corrected for diurnal variation, delay correction, orientation correction in degrees, and the International Geomagnetic Reference Field.

For diurnal variation correction, magnetometric readings were recorded simultaneously with the marine acquisition, using the RBS G-862 base magnetometer installed at Cartagena de Indias city (Colombia) at the following coordinates: latitude north 10°23'24.62, and longitude west 75°31'54.97. During this procedure, the data acquired from the RBS G-862 base magnetometer were subtracted from those obtained using the G-882 mobile magnetometer (Grandis and Dahrin 2017; Seequent 2022). In the correction process, a longitudinal difference of 6° was considered; unfortunately, owing to logistical aspects, it was impossible to instal it closer to the study area so that it would be within the ideal 1° distance. Additionally, it is important to highlight that diurnal variation correction data were applied because it was verified that there were no solar storms or major variations that could affect the results of the correction process.

For delay correction, the first five data points of each line were discriminated, seeking to eliminate the data that were taken while the sensor was not yet aligned on the planned survey line, to reduce the uncertainty of the data due to turning manoeuvres of the vessel at the time of acquisition (Grandis and Dahrin 2017).

For the correction of orientation in degrees, the changes in sensor orientation during acquisition were considered, and the uncertainties generated in these directions were calculated. This has been corrected according to the methodology presented in the user manual (DIMAR et al. 2015; Oviedo et al. 2020).

For the IGRF correction, the model values (Alken et al. 2021) were subtracted for each survey point, considering the inclination and magnetic declination. A value was assigned depending on the latitudinal position in the study area and subtracted from the database.

Finally, with the corrections, a total field anomaly map was generated, which became the basis for the elaboration of the visualisation filters. All the maps were generated using the minimum-curvature interpolation method. The following filters were used.

A reduction to the pole was applied to the total field anomaly grid to eliminate the effect of the tilt of the magnetic anomalies by transforming the anomaly as if the source had been read at the magnetic pole with a 90° tilt (Bajgain 2011). The pole reduction can be calculated in the frequency domain using the following operator: (MacLeod et al. 1993):

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i\cos(I)\cos(D - \theta)]^2} \quad (1)$$

Where:

θ is the wavenumber direction

I is the magnetic inclination

D is the magnetic declination.

nT was used in the SI for the magnetic field variations measured in the geophysical surveys.

The first vertical derivative was applied to the resulting grid of the total anomaly field to highlight linear features, accentuating pronounced bathymetric features. This procedure is related to deeper sources (Jacobs 1994), mapping of deep basement structures, and mineral exploitation targets (Seequent 2022).

An analytical signal filter is applied to enhance the potential field anomaly. It is used to define the boundaries of geologically anomalous density or magnetisation distributions (Alatorre-Zamora et al. 2012). The filter is defined as the square root of the sum of the derived squares in the x , y , and z directions: This is useful for locating the edges of the magnetic source bodies (Narvaez Medina 2012). The application of the analytic signal shows the shape of the bodies and their possible locations, but not the direction of magnetisation. The following formula describes this mathematically (Galvan 2016):

$$|B(x, y, z)| = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

To filter, visualise, and analyse possible features of the geomorphology, or to identify sources of seabed anomalies, we used the residual component with the following analyses:

Spectral analysis and Euler deconvolution inversion (DoE) were used and are defined as follows:

For the residual component, separation of the regional and residual anomalies was sought. This method uses the logarithm as a function of the wave number k , which is called interactive filtering

in the software. The deep characteristics that generate variations in the field observed on the surface on a regional basis and that present a long wavelength with smooth and gradual horizontal gradients are analysed. (DIMAR et al. 2015).

Normally, regional anomalies are attributed to deep (crustal) causes of large wavelengths, which generally influence the entire surveyed area in approximately the same manner. On the other hand, residual anomalies have small wavelengths and occur close to the measurement point.

The Gaussian filter with a cutoff frequency k_0 is defined as

$$L(\mathbf{k}) = 1 - e^{-k^2/2k_0^2} \quad (3)$$

Where:

$$\mathbf{k} = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} \quad (4)$$

The absolute value of the wave number.

This filter then passes through small wavelengths corresponding to residual-type signals (Galvan 2016).

For spectral analysis, the logarithmic spectrum of these data can be interpreted as the depth of a 'set' of sources that is easily determined by measuring the slope of the energy (power) spectrum and dividing by 4π (Whitehead and Musselman 2007).

Euler deconvolution is based on the concept that magnetic fields are homogeneous functions of the source coordinates, and therefore satisfy the Euler equation. This equation can parametrically solve the source locations (Narvaez Medina 2012) by employing structural indices to evaluate the appropriate solution results (Geometrics Inc 2020).

A complementary method to the previous one is that proposed by Parker and Huestis (1974), which relates the reversal of magnetic anomalies to the presence and changes in the topography of the seabed. This method, which will be used in future research, can filter the effects of bathing on magnetic signatures.

4. Results

4.1. Geofoms obtained from the bathymetric survey

Using the CARIS HIPS and SIPS hydrographic software, (Teledyne 2021), the information was processed and exported to the GeoTIFF format (Figure 2) with a 35 m spatial resolution. The GeoTIFF data were exported to ArcGIS software, in which a digital elevation model was generated outlining contours every 100 m to scan bathymetric profiles (Figure 3).

From the bathymetric survey, surfaces ranging from 400 m to 1800 m deep were obtained. Profiles that helped in the characterisation of the submarine relief were drawn (Figure 3).

From west to east, the geomorphology of the study area is represented by:

Providencia Depression: To the west of San Andres Island, it has a general NNE-SSW trend and reaches an amplitude of approximately 10 km. A range of depths is identified between -1900 m in the deepest zone and -850 m in the shallowest part located towards the southwestern part of San Andres Island (Figure 3).

Albuquerque Spur: Connects the seamount of Albuquerque Cays Island with the seamount that makes up San Andres Island. The spur has an elongated morphology. Its general trend is NNE-SSW, reaching a length of approximately 18 km and rising approximately 1000 m from the seafloor. Depths range from -300 m to -1100 m in the deepest zone (Figure 3).

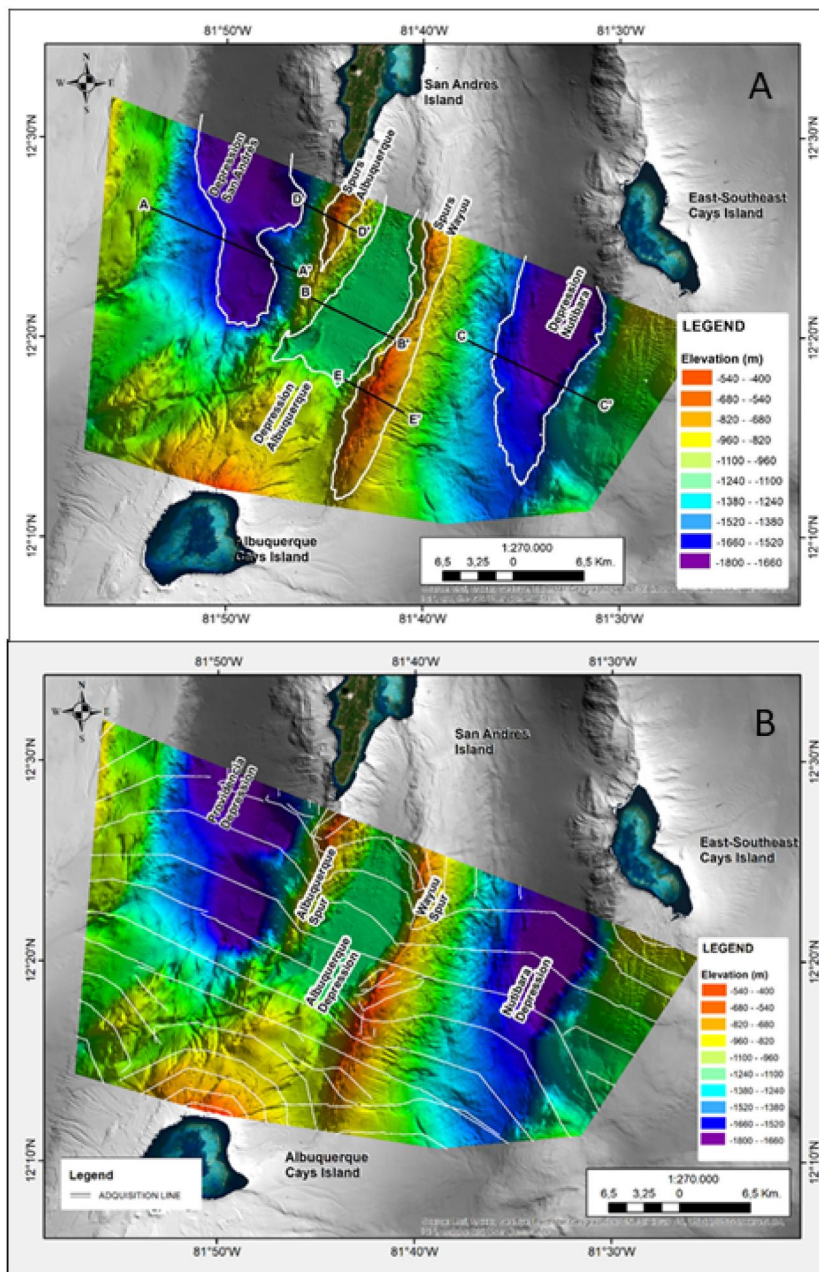


Figure 2. A. Identification of relief geomorphs in the study area in the western Caribbean Sea. The area is illustrated by colour bathymetry and shows the main geomorphological features marked with a white line representing the maximum depth for each geomorph (1800 m for the San Andres Depression, 600 m for the Albuquerque and Wayuu Spurs, 1100 m for the Albuquerque Depression and 1700 m for the Nutibara Depression). Bathymetric profiles (AA', ..., EE') are also represented. B. Trackline Survey Plot of the multibeam data collected by ARC Providencia.

Albuquerque Depression: Located between the Albuquerque and Wayuu Spurs, this is a small depression with an average depth of -1180 m. It extends from the northeastern sector of the Albuquerque seamount to the southeastern tip of San Andres Island (Figure 2). It is 6 km wide, varying from 3.46 km at its narrowest part to 7.24 km at its widest point. The profile shown in Figure 3 indicates a depth variation ranging from -500 m to -1100 m.

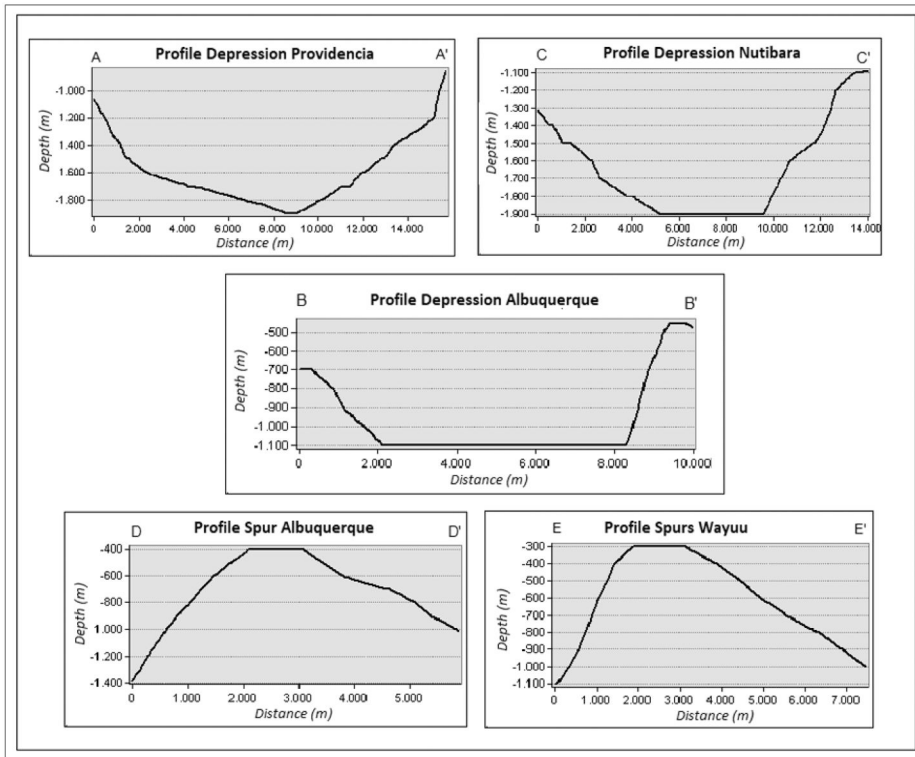


Figure 3. Bathymetric profiles showing the main geofoms of the study area (A) Providencia Depression, (B) Albuquerque Depression, (C) Nutibara Depression, (D) Albuquerque Spur, (E) Wayuu Spur. See [Figure 2](#) for the location of the profiles.

The Wayuu Spur: Located southeast of San Andres Island. It connects the seamount of Albuquerque Cays Island with the seamount that configures San Andres Island. It is 37.18 km long and averages 2.90 km in width. Depths range from -300 m in the shallowest part to -1400 m in the deepest zone ([Figure 3](#)).

The Nutibara Depression is located southwest of East-Southeast Cays Island. It extends for approximately 55 km from the northeastern sector of Albuquerque to the northeastern sector of the island of San Andres, reaching a maximum depth of -2180 m and a maximum width of approximately 7 km. It has a maximum depth of approximately -1900 m and an average width of 8.3 km. The depth of the shallowest zone was approximately -1100 m ([Figure 3](#)).

4.2. Magnetic anomalies

In the total magnetic field map of the study area, magnetic intensities ranging from -292 nT to 205 nT are observed. The information grid shows a magenta magnetic maximum located at the limits of the Wayuu Spur and the Nutibara Depression ([Figure 4](#)). In contrast, the area near Albuquerque Cays Island is represented by the magnetic minimum, shown in blue.

The pole reduction reaffirms the maximum value of the positive anomalies with a northeast alignment between the Wayuu Spur and Nutibara Depression; this value is expressed in a value of 343.30 nT ([Figure 4](#)). The blue-coloured magnetic lows are represented by values up to -361.61 nT located towards Albuquerque Cays Island. It was observed that the magnetic lows tended to increase with decreasing depth, similar to the geomorphology of Albuquerque Cays Island.

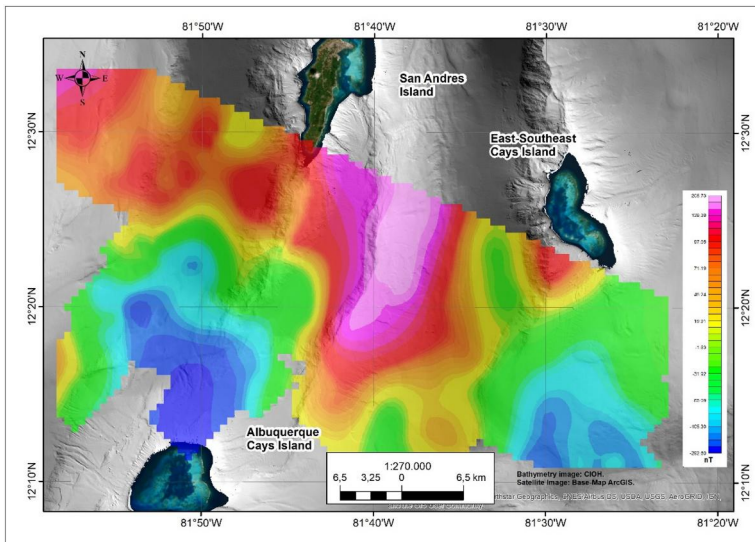


Figure 4. Magnetic pole reduction map of the study area. Magnetic surface reflecting the process of positioning correction for latitudinal effects. Grey background is the CIOH high-resolution bathymetry.

The analytic signal filter preserves the magnetic highs in the northeast lineament over the Nutibara Depression (Figure 5) but is more pronounced towards the southern part of the Nutibara Depression. New magnetic highs are visible towards the western part of the grid in a punctual and centralised manner. The magnetic surface values range from 0.0019 to 0.1007 nT/m (Figure 5).

The filter of the first vertical derivative of the inclination of the residual magnetic field shows a line of four magnetic maxima in yellow over the Wayuu Spur in the northeast direction, with values of up to 0.095 nT/m, and one to the south of East–Southeast Cays Island, represented by a value of 0.062 nT/m. A magnetic low of -0.0360 nT/m is observed over the Nutibara Depression, which coincides with the thickest depositional area in the basin. Moreover, it can be observed how the foci of magnetic anomalies at depth are represented on the surface through bathymetry, evidenced by the geomorphological diversity (Figure 5).

After the residual component separation grid was obtained, vertical derivative filtering was performed. The trends of the magnetic highs were more marked in the northeast direction over the Nutibara Depression area, as well as over the Providencia Depression and the Albuquerque Spur, which are areas with visible faults in bathymetry (Figure 6).

The separation of the regional components was applied to the grid generated from pole reduction by interactive filtering to highlight the magnetic anomalies generated by sources farther away from the surface. This indicates a trend of magnetic highs, with values of 226.21 nT over the Nutibara Depression. The positive anomaly is slightly centralised, but still maintains a northeasterly lineament. However, the magnetic lows were still preserved towards Albuquerque Cays Island (Figure 7).

4.3. Spectral analysis

A spectral analysis was performed on the corresponding map of the residual separation (Figure 7): The first segment (red) corresponds to the contribution of the deep, or

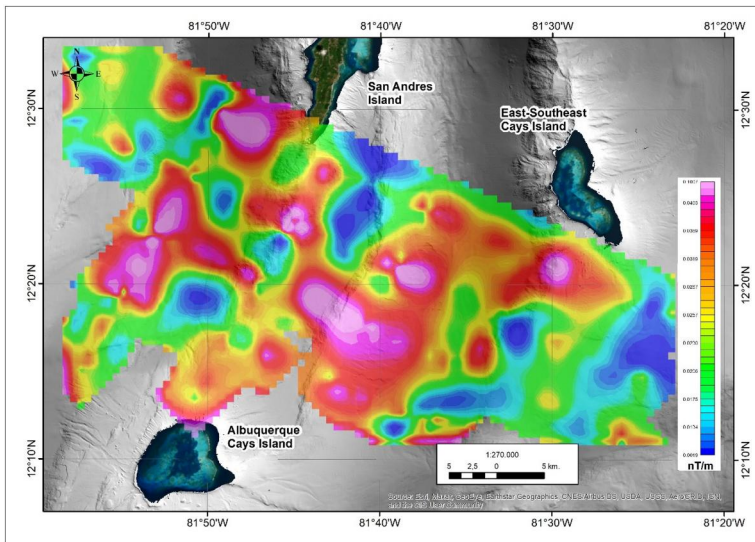


Figure 5. Magnetic map of the analytic signal of the residual field. The map reflects the process of centralization and the definition of residual anomaly edges.

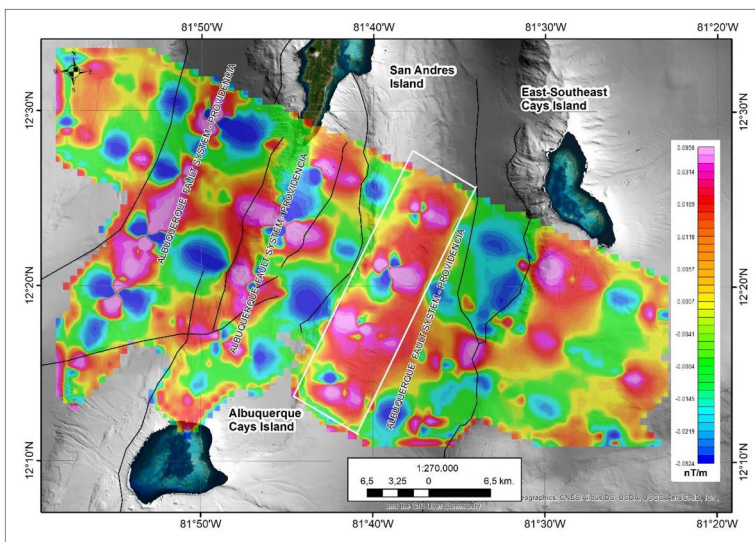


Figure 6. Map showing the vertical (z) derivative of the total magnetic field grid. Grey background is the bathymetry map from the ArcGIS Ocean Base Map. Solid black lines show the surface faults.

regional, source, with frequencies lower than 0.12 km^{-1} , and which therefore generates wavelength anomalies greater than 4 km up to 5 km. The second segment (blue) corresponds to the intermediate source, with frequency values between 0.12 km^{-1} and 0.26 km^{-1} , corresponding to wavelength anomalies between 4 km and 2.5 km, respectively. The third segment (green) is associated with the shallowest sources, for frequencies between 0.26 km^{-1} and greater than 0.56 km^{-1} , generating wavelength anomalies between 2.5 km and wavelengths less than 0.5 km (Figure 8).

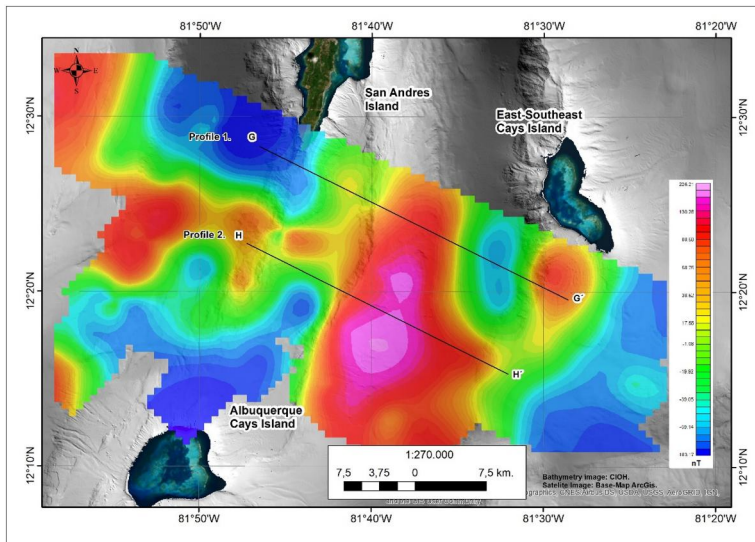


Figure 7. Map showing the regional separation of the deepest sources. Profile 1 and Profile 2 are intended to compare the behaviour of the submarine relief with the regional field displayed.

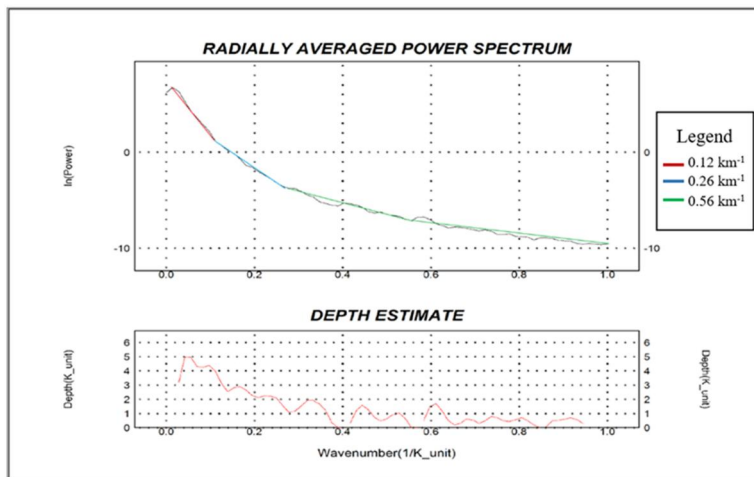


Figure 8. Display of the cut-off wavelength ($K=0.14$). Window showing the change in slope. It is interpreted as segments with wavelength ranges representing the depth of the sources. Top: Shows the power intensity by generating a radially averaged power spectrum from an image obtained by Fast Fourier Transform (residual separation surface). Bottom: Estimation of the source depth in km based on the radially averaged power spectrum of the anomalies.

4.4. Euler deconvolution (DoE)

Part of the data surface obtained through the DoE showed elongated anomalies linked to the northeastward lineaments (Figure 7) and shapes associated with magnetised elongated bodies. Assuming these are possible magnetic bodies, a structural index of '1.0' is specified. The estimated surface was presented as a colour palette (Figure 9).

The obtained map (Figure 10) shows the solutions represented on the DoE surface. The analytic signal is plotted in greyscale with symbols to present the following results: in blue, the shallowest anomaly sources are located at depths up to 1000 m; in green, the

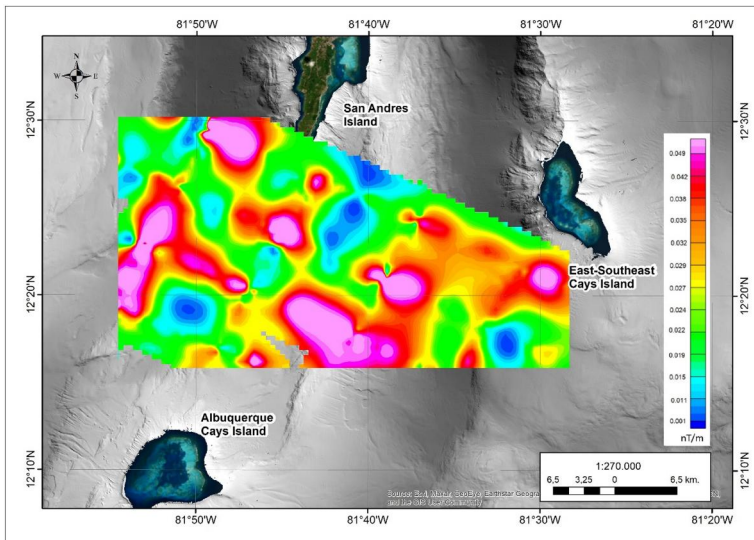


Figure 9. Signal map visualization by using Euler deconvolution. Grey background is the bathymetry map from the ArcGIS Ocean Base Map.

sources are located at depths ranging from 1000 to 2000 m; in yellow, the bodies are slightly deeper, between 2000 and 3000 m deep; and finally, in the larger red symbols, the sources are at depths greater than 3000 m.

4.5. Profiles

To establish the relationship between bathymetry and magnetism, two profiles were made perpendicular to the seafloor features (Figure 7), which have linear northeast-trending characteristics.

When performing profile 1 (Figure 11) on the two surfaces, a relationship between the relief shape and the residual magnetic anomaly curve was observed, where the boundary between the Nutibara Depression and Wayuu Spur had the most representative magnetic high in the study area (106.3 nT). There is also a relationship between the two magnetic lows that are located on the two depressions (San Andres with -145.6 nT and Nutibara with -62.2 nT).

In profile 2 (Figure 11), a relationship between bathymetry and the curve described by the magnetic signal was observed. The magnetic lows are strongly pronounced over the depressions of San Andres and Albuquerque Cays Island with values of -62.03 nT and -77.30 nT, respectively. In the Wayuu Spur area, the most pronounced magnetic high is preserved at 171.65 nT.

5. Discussion

5.1. Low resolution and free data NOAA

In the methodological paper of the work presented in this article (Oviedo et al. 2020), our data were compared with sounding data obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) magnetic data repository in the same study area. Despite the long interval between the two surveys, almost 50 years, no significant

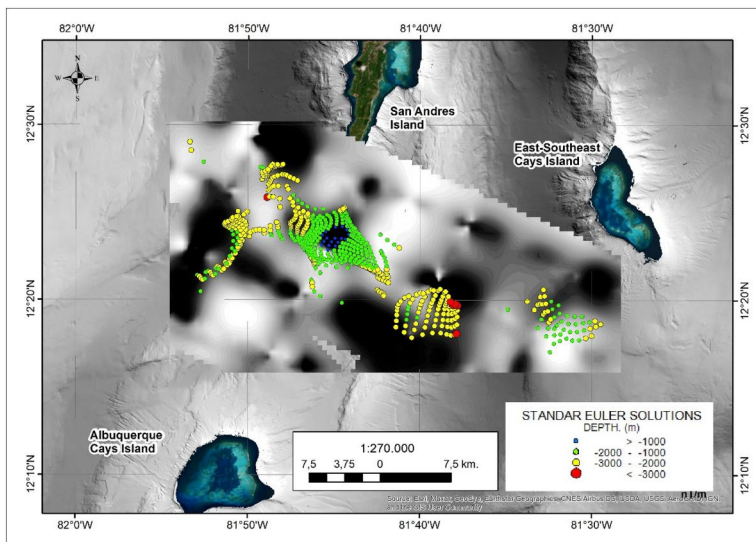


Figure 10. Visualization of the depth estimation of anomaly-generating sources, performed by the Euler deconvolution (DoE) method.

differences were observed for the magnetic variables analysed. Finally, the results show small differences between the magnetic data obtained for the years 1970 and 2018.

The magnetic information downloaded from NOAA (2021) has an extension MGD77T and contains the positions of the tracking line and data with corrections for diurnal variation and IGRF. However, no pole-reduction filters or positioning corrections were indicated within the NOAA metadata. For viewing on a common surface, the two geodatabases were joined and charted to WGS 1984 UTM Zone 17N, corresponding to the projection of the study area. With the positional and magnetic intensity data, a magnetic surface was generated (Figure 12), as presented in the methodological article, where the positive anomalies were similarly identified on the Wayuu Spur and the Nutibara Depression to the east and northwest, respectively, at the low Nicaraguan elevation. Regarding negative anomalies, the magnetic basement located in the areas near Albuquerque Cays Island stands out (Oviedo et al. 2020).

5.2. Low-resolution and free data GeoMapApp

Additional analyses were performed at the same location as profile 1 (G-G' in Figure 11), with free data available in the GeoMapApp service (version 3.7.1; Figure 13), where they were superimposed on the same profile of the Global Multi-Resolution Topography (GMRT) data grid, which compiles edited multibeam sonar data provided by institutions worldwide and merged into an updated grid of global elevation data. The magnetic grid was constructed using the EMAG2 model Version 3, based on terrestrial magnetic anomalies with a resolution of 2 arc min, and compiled from satellite, naval, and airborne magnetic measurements.

Related to the relationship commented previously between bathymetry and the curve described by the magnetic signal, evidence allows us to conclude that at least the atolls, islands, and coral banks in the south of the archipelago may have originated as volcanoes or geofoms with high ferrous content (Geister and Diaz 2007). About the magnetic observed in the depressions of San Andres and Albuquerque Cays Island, subsidence and

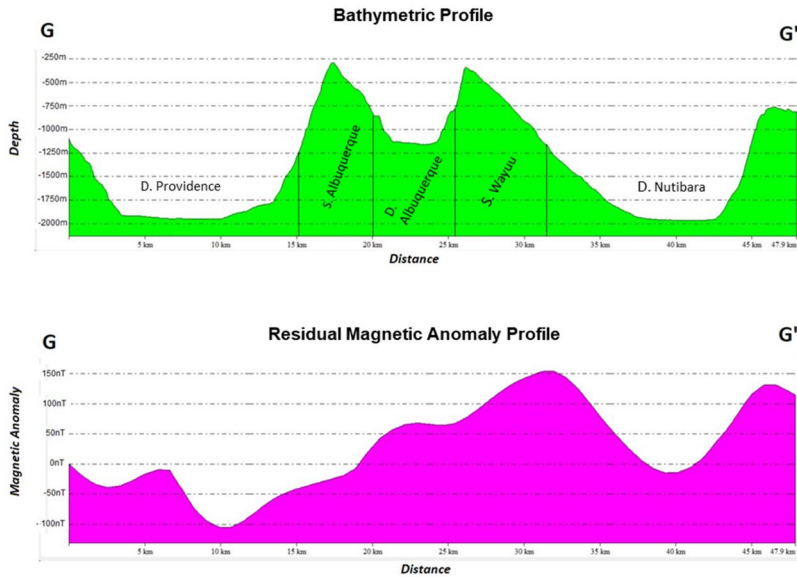
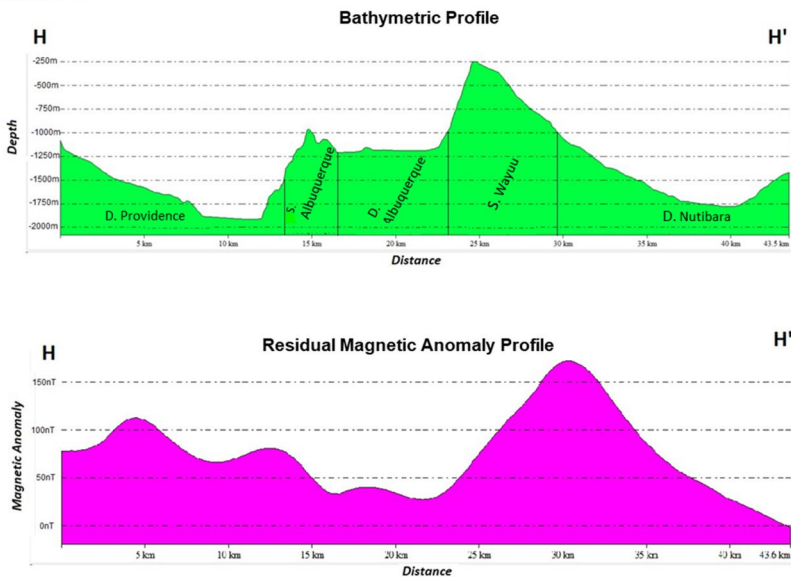
Profile 1.**Profile 2.**

Figure 11. Profile 1 and 2. Correlations between bathymetric and magnetic data obtained from the residual field surface and bathymetry.

simultaneous coverage with carbonates in the shallow zones of the volcanic summits from the Cenozoic to the Quaternary allowed the formation of shallow banks and atolls in the archipelago, which may be the reason for this low magnetic response. Finally, superimposing the magnetic information of the area with high-resolution gravity surfaces would help in the future to understand in a more approximate way the conformation of these insular bodies (Diaz et al. 1996).

Moreover, information about the correlations between bathymetric and magnetic data (Figure 11) also allowed us to establish magnetic anomaly relationships generated by the

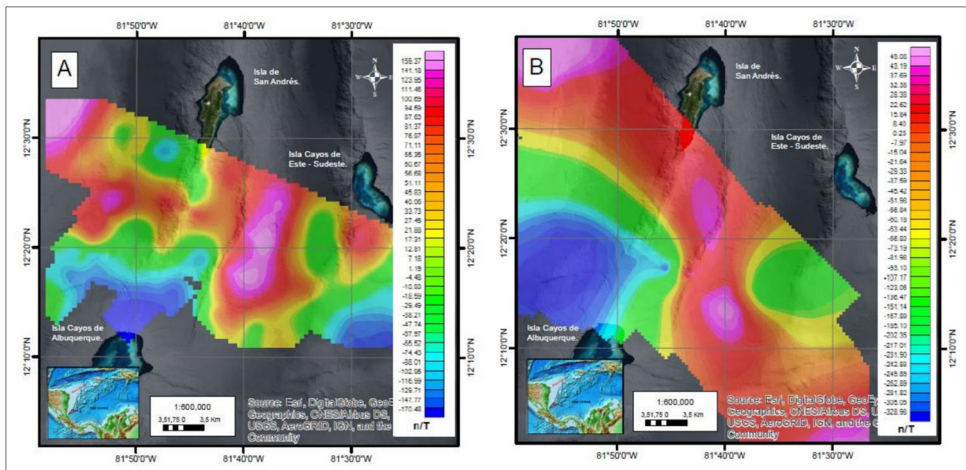


Figure 12. Survey application in the Colombian Caribbean 2018 (a), contrasted with data collected by NOAA in 1970 (B). Adapted from Oviedo et al. (2020).

geofoms present in the study area. Regional information, which is freely accessible and has been presented with lower resolution, allows for the observation of a positive anomaly to the east, which coincides with a positive peak in the magnetic anomaly at the location of the Nutibara Depression (Figure 12). Comparing both figures (Figure 12(A,B)), we can establish that a positive magnetic anomaly is still present, even in the EMAG2 model, but it is not possible to associate it directly with a geomorphological reference present on the seafloor.

5.3. Comparison with other researchers

The magnetic highs obtained in the data grids over East-Southeast Cays Island and in the vicinity are from formations rising from the seafloor to depths of more than 1000 m. These may be associated with the formation of igneous origins or basalts that could be lodged near the seafloor surface, generating positive variations in the magnetic readings (Figure 4). Apparently, they have a volcanic basement, indicating that the magnetic anomalies detected in the surroundings of San Andres Island and East-Southeast Cays Island are due to atolls and volcanic islands, which is consistent with the results of previous studies (Mauffret and Leroy 1997; Osorio-Granada et al. 2022). Evidence of this is a dredged volcanic sample from Albuquerque Cays Island (Diaz et al. 1996), and volcanic rocks from Providence Island (Geister 1992). This information provides a geological basis for the results obtained in this study, where the deepest sources have the most representative magnetic highs and appear to be located at a depth of approximately 5 km, according to the spectral analysis of the acquired data. Additionally, Carvajal Arenas (2017) presents gravity-magnetic correlation models with seismic profiles, which indicate that the high amplitude of the magnetic anomaly supports magnetisation similar to a volcanic origin (Milliman 1969).

Moreover, magnetic lows were observed over Albuquerque Cays Island, which may be associated with the subsidence and simultaneous coverage of these volcanoes by shallow-water carbonate layers from the Cenozoic to the Quaternary, leading to the formation of shallow banks and atolls of the archipelago (Milliman 1969; Geister and Diaz 2007). In addition, according to Pindell et al. (2006), Milliman and Supko (1968) obtained the first

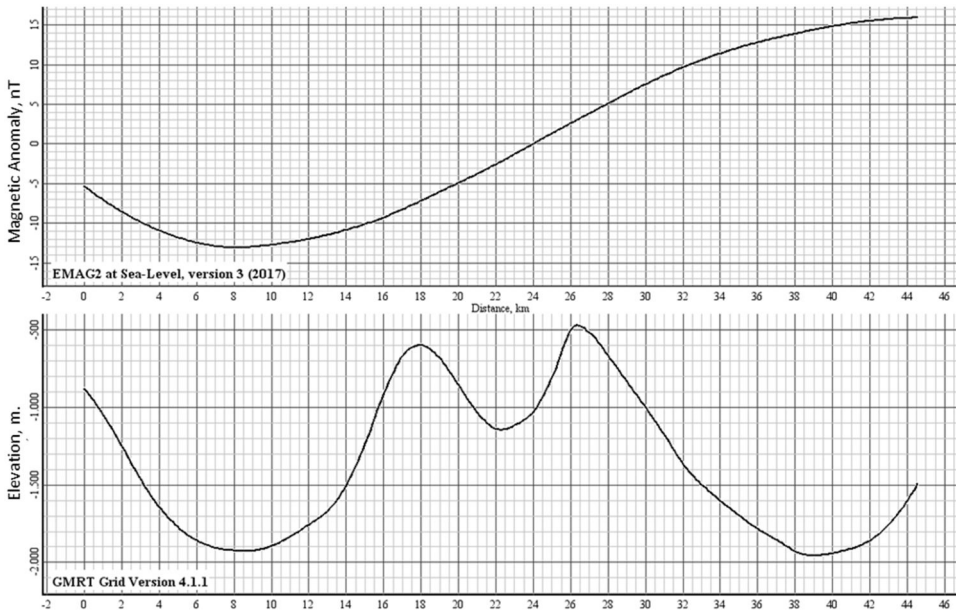


Figure 13. Bathymetric and magnetometry comparison profile 3. Correlation profiles between bathymetry and magnetic data obtained from the free data in GeoMapApp.

geomagnetic profiles during a cruise to the San Andres area. By superimposing this information on the submarine topography, a relationship that is particularly pronounced in East-Southeast Cays Island is revealed. This indicates possible deep volcanic cones under the limestone cover of the atolls and San Andres Island. The volcanic origin of the cones is further supported by a basaltic fragment dredged at a depth of 700 m near Albuquerque Cays Island during the same campaign.

Leroy et al. (2000) conducted correlation studies of magnetic and bathymetric data in the Caribbean, more explicitly in the Cayman Trench, where they were able to interpret that the history of the Cayman Trench is directly related to global plate kinematics with convergence events. These conclusions were drawn from the interpretation of superimposed synthetic magnetic models and correlated with the bottom topography, indicating that this is a zone of oceanic divergence that began at the beginning of the Eocene.

In this analysis, it can be corroborated, as in our study area, that the magnetic peaks, whether positive or negative, coincide with the high and low peaks present in the submarine relief, establishing that there is a relationship between the two sources of information. This also coincides with the principle of the geophysical method, which states that it can be used to identify areas of oceanic divergence and areas of energy release, such as volcanoes.

6. Conclusions

The present study allows the identification of the relief and geomagnetic characterisation of the subsoil of the area, demonstrating that the techniques and methods developed by the authors and the Colombian maritime general direction provide valuable information for the analysis and characterisation of marine geomorphology, which in turn becomes scientific support for the defense of the Colombian sovereignty of its maritime territory.

Advanced magnetometry technology, combined with high-resolution bathymetry, allows us to characterise the behaviour of the submarine relief and establish the possible geological and geophysical processes that have given rise to its modelling. Similarly, the magnetic information in this study identified suspected sources of magnetic anomalies that could be associated with volcanic processes that are not yet evident on the surface of the seabed.

The bottom geomorphology is strongly related to the signatures described by the residual magnetic anomalies, which indicate the presence of magnetic highs that may be associated with basement highs and volcanic cones with elongated shapes in the northeast direction due to ocean floor faults. On the other hand, the most representative magnetic lows of the study area were located over the area of Albuquerque Cays Island. This may be due to the masking of the magnetic signal by the presence of coral structures characterised by low magnetic responses.

The results of the spectral analysis show that the shallowest sources are in the first 500 m depth with frequencies of 0.26 km^{-1} and above 0.56 km^{-1} , while the deepest sources are located between 4 and 5 km depth with representative frequencies below 0.12 km^{-1} . The results are in contrast with the results obtained with the DoE method and show that the anomaly-generating bodies are mostly located between 1000 and 3000 m depth, reaching depths greater than 3000 m, which can be correlated with the spectral analysis, enabling the validation of data processing.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Acknowledgments

This work was possible thanks to the support of the 'Marine Geomagnetism' project, founded by the General Maritime Directorate (DIMAR). We also thank the Directorate of DIMAR and CIOH for their support in fieldwork and authorisation for the use of data in the preparation of this document. The authors thank the crew of the ARC Roncador Oceanographic Research Vessel and the staff of the CIOH Hydrographic Survey for their collaboration during the survey campaigns and data processing.

Funding

APC was funded by the University of Cádiz and RNM912 Coastal Engineering Research Group. The UCA research stay in Cartagena de Indias (Colombia) was funded by the University of Cadiz, and supported in Colombia by ENAP (Escuela Naval de Cadetes 'Almirante Padilla'). The authors thank the two anonymous reviewers and the editor for their comments and suggestions, which have allowed us to significantly improve the ms.

References

- [CIOH] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hoidrográficas. 2024. Secciones/Sección Servicio de Hidrografía/Productos y Servicios/Levantamientos/Levantamientos Hidrograficos. Accessed on: <https://cioh.dimar.mil.co/index.php/es/areas-del-conocimiento/hidrografia/arhid-productos-y-servicios/levantamientos-hidrografia/levantamientos-hidrograficos-arhid>.
- [IHO] International Hydrographic Organization. 2020. International hydrographic organization standards for hydrographic surveys S-44 Edition 6.1.0. Monaco: International Hydrographic Organization. Available from: <https://acortar.link/UQUIQP>.
- [UN] United Nations. 1982. Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf.

- Alatorre-Zamora MA, Rosas-Elguera J, Pérez-Rodríguez G, Campos-Enríquez JO, Maciel-Flores R. 2012. 3D Euler deconvolution and analytic signal contributing to fault risk analysis in The Valle de Banderas. Graben. 10(1):1–31. www.e-gnosis.udg.mx/vol10/art1.
- Alken P, Thebaud E, Beggan CD, Amit H, Aubert J, Baerenzung J, Bondar TN, Brown WJ, Califf S, Chambodut A, et al. 2021. International geomagnetic reference field: the thirteenth generation. Earth Planets Space. 73(1):1–25. doi:10.1186/S40623-020-01288-X/FIGURES/5.
- Bajgain SK. 2011. Gravity and magnetic modeling of basement beneath Alabama Gulf Coastal Plain [Degree Master Science Thesis]. Montgomery (AL): Auburn University, Department of Geology and Geography. <https://acortar.link/H9wqBa>.
- Bernabéu A, Medina R, Vidal C, Muñoz Pérez JJ. 2001. Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. Rev Soc Geol de España. 14(3–4):227–236. Available from: <https://rocin.uca.es/handle/10498/15916>.
- Berrocoso Domínguez M, Jigena B, Mamani R, Muñoz-Pérez JJ, Walliser J, Calderay F. 2018. Metodología para la gestión de la información hidrológica en vías fluviales: aplicación a Bolivia. Available from: <https://rocin.uca.es/xmlui/handle/10498/20851>.
- Berrocoso M, Fernández-Ros A, Ramírez ME, Salamanca JM, Torrecillas C, Pérez-Peña A, Páez R, García-García A, Jiménez-Teja Y, García-García F, et al. 2008. Geodetic research on deception island and its environment (South Shetland Islands, Bransfield Sea and Antarctic Peninsula) During Spanish Antarctic Campaigns (1987–2007). Geodetic Geophys Observ Antarctica. 97–124. doi:10.1007/978-3-540-74882-3_6.
- Blakely RJ, Wells RE, Weaver CS, Johnson SY. 2002. Location, structure, and seismicity of the Seattle fault zone, Washington: evidence from aeromagnetic anomalies, geologic mapping, and seismic-reflection data. Geological Society of America Bulletin. 114(2):169–177. doi:10.1130/0016-7606(2002)114<0169:LSASOT>2.0.CO;2.
- Carvajal Arenas LC. 2017. Hydrocarbon prospectivity of the Nicaraguan Rise and Colombia Basin, western Caribbean Sea [PhD thesis]. University of Houston.
- Case JE, MacDonald WD, Fox PJ. 1990. Caribbean crustal provinces; seismic and gravity evidence. Caribbean Region. Vol H: 15–36.
- Catalán M, Martos YM. 2022. New evidence supporting the Pacific Mantle Outflow: hints from crustal magnetization of the Phoenix Plate. Remote Sensing. 14(7):1642. doi:10.3390/rs14071642.
- Diaz JM, Sanchez JA, Zea S, Garzon-Ferreira J. 1996. Morphology and marine habitats of two Southwestern Caribbean Atolls: Albuquerque and Courtown. Atoll Research Bulletin No. 435. Available from: <https://acortar.link/Dq1JeJ>.
- DIMAR, Pelaez J, Oviedo K. 2015. Manual de adquisición y procesamiento de información geomagnética. Colombia: DIMAR. p. 180.
- Driscoll NW, Diebold JB. 1998. Deformation of the Caribbean region: one plate or two? GeoScienceWorld. 26(11):1043. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/26/11/1043/206786/Deformation-of-the-Caribbean-region-One-plate-or?redirectedFrom=fulltext>. doi:10.1130/0091-7613(1998)026<1043:DOTCRO>2.3.CO;2.
- Eppelbaum L. 2019. Geophysical potential fields: geological and environmental applications. In: Computational geophysics series. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier. ISBN: 978-0-12-819646-5. Available from: <https://acortar.link/5qcm1h>.
- Finn C, Williams DL. 1987. An aeromagnetic study of Mount St. Helens. J Geophys Res. 92(B10):10194–10206. doi:10.1029/JB092iB10p10194.
- Flanagan G, Williams DL. 1982. A magnetic investigation of Mount Hood, Oregon. J Geophys Res. 87(B4):2804–2814. doi:10.1029/JB087iB04p02804.
- Galvan PJ. 2016. Metodos potenciales y electromagneticos aplicados a la modelacion bidimensional del volcan tipo maar La Joyuelá [Tesis de Máster]. San Luis Potosi, Mexico: Instituto Potosino de Investigacion Cientifica y Tecnologica, A.C., Laboratorio de Geofisica. <https://acortar.link/gh3Q0C>.
- Geister J. 1992. ERLANGEN 1992 Modern Reef Development and Cenozoic Evolution of an Oceanic Island/Reef Complex : Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). Facies. 27(1):1–69. doi: 10.1007/BF02536804.
- Geister J, Diaz J. 2007. Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Mar Caribe, Colombia (con Guía Campo). Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Available from: <https://acortar.link/k9SEdA>.
- Geometrics Inc. 2018. MagLogPro™ & MagLogLite™. Data acquisition software, 25479-01 Rev. R, User's Guide. Available from: <https://www.geometrics.com/wp-content/uploads/2018/10/MagLogManual.pdf>.
- Geometrics Inc. 2020. G-882 Cesium Marine magnetometer operation manual [accessed 2023 March 23]. Available from: <https://acortar.link/uEwv1O>

- Grandis H, Dahrin D. 2017. The utility of free software for gravity and magnetic advanced data processing. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 62(1):012046. doi:10.1088/1755-1315/62/1/012046.
- Granot R, Dyment J. 2019. The influence of post-accretion sedimentation on marine magnetic anomalies. *Geophys Res Lett.* 46(9):4645–4652. doi:10.1029/2019GL082265.
- Hanna WF. 1990. Geologic applications of modern aeromagnetic surveys. William F. Hanna, editor. Colorado: U.S. Geological Survey Bulletin 1924. p. 116. Available from: <https://pubs.usgs.gov/bul/1924/report.pdf>.
- Holcombe TL, Ladd JW, Westbrook GK, Edgar NT. 1990. Caribbean marine geology; ridges and basins of the plate interior. *The Caribbean Region, The Geology of North America, Vol. H.* Colorado: Geological Society of America. p. 231–260.
- Honkura Y, Okubo Y, Nagaya K, Makino M, Oshima S. 1991. A magnetic anomaly map in the Japanese region with special reference to tectonic implications. *J Geomagn Geoelec.* 43(1):71–76. doi:10.5636/jgg.43.71.
- Idárraga-García J, León H. 2019. Unraveling the underwater morphological features of Roncador Bank, Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina (Colombian Caribbean). *Front Mar Sci.* 6(FEB):77. doi:10.3389/fmars.2019.00077.
- Jacobs JA. 1994. Reversals of the Earth's magnetic field. 2nd ed. Vol. 63. Cambridge: Cambridge University Press; p. 346. Available from: <https://acortar.link/gTUDFN>.
- Jigena-Antelo B, Estrada-Ludeña C, Howden S, Rey W, Paz-Acosta J, Lopez-García P, Salazar-Rodriguez E, Endrina N, Muñoz-Pérez JJ. 2023. Evidence of sea level rise at the Peruvian coast (1942–2019). *Sci Total Environ.* 859(Pt 2):160082. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160082.
- Jigena B, Berrocoso M, Torrecillas C, Vidal J, Barbero I, Fernandez-Ros A. 2016. Determination of an experimental geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarct Sci.* 28(4):277–292. doi:10.1017/S0954102015000681.
- Jigena B, Vidal J, Berrocoso M. 2015. Determination of the mean sea level at deception and Livingston Islands. *Antartic Science.* 27(1):101–102. doi:10.1017/S0954102014000595.
- Kongsberg. 2023. Versions of EM 302. EM Series Multibeam echo sounders. Instruction Manual. [accessed 2023 April 18]. Available from: <https://acortar.link/BrdxvP>
- Leroy S, Mauffret A, Patriat P, Mercier de Lepinay B. 2000. An alternative interpretation of the Cayman trough evolution from a reidentification of magnetic anomalies. *Geophys J Int.* 141(3):539–557. <https://academic.oup.com/gji/article/141/3/539/612159>. doi:10.1046/j.1365-246x.2000.00059.x.
- López-Loera H, Tristán-González M, Luis Potosí S, Potosí L. 2013. Geology and magnetometry of the Villa de Reyes graben, San Luis Potosí, Mesa Central, Mexico: Tectonic implications. *Boletín de la Sociedad Geologica Mexicana.* 65(1):137–156.
- MacLeod IN, Jones K, Dai TF. 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Explor Geophys.* 24(3–4):679–687. doi:10.1071/EG993679.
- Mauffret A, Leroy S. 1997. Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province. *Tectonophysics.* 283(1–4):61–104. doi:10.1016/S0040-1951(97)00103-0.
- Milliman JD, Supko PR. 1968. On the geology of San Andres Island, western Caribbean. *Geol Mijnbouw.* 47:102–105.
- Milliman JD. 1969. Four Southwestern Caribbean Atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays, Roncador Bank and Serrana Bank. *Atoll Res Bull.* 129:1–26.
- Narvaez Medina L. 2012. Modelo de fuentes de anomalías Geomagneticas de Campo Total asociadas al estado de la cámara magmática del volcán Galeras. Universidad Nacional de Colombia. p. 115. <http://www.bdigital.unal.edu.co/39635/>.
- Nwankwo UC, Howden S, Wells D, Cannon B. 2020. Validation of VDatum in Southeastern Louisiana and Western Coastal Mississippi. *Mar Geod.* 44(1):1–25. doi:10.1080/01490419.2020.1846644.
- Osorio-Granada AM, Jigena-Antelo B, Vidal Pérez JM, Hernández-Pardo O, León-Rincón H, Muñoz-Pérez JJ. 2022. Potential fields modeling for the Cayos Basin (Western Caribbean Plate): Implications in basin crustal structure. *Mar Geol.* 449:106819. doi:10.1016/j.margeo.2022.106819.
- Oviedo K, Jigena Antelo B, Otálora N, Romero J, Contreras-de-Villar F, Muñoz-Pérez JJ. 2020. A new method for the collection of marine geomagnetic information: survey application in the Colombian Caribbean. *JMSE.* 9(1):10. doi:10.3390/jmse9010010.
- Parker RL, Huestis SP. 1974. The inversion of magnetic anomalies in the presence of topography. *J Geophys Res.* 79(11):1587–1593. doi:10.1029/JB079i011p01587.
- Payo A, Antelo BJ, Hurst M, Palaseanu-Lovejoy M, Williams C, Jenkins G, Lee K, Favis-Mortlock D, Barkwith A, Ellis MA. 2018. Development of an automatic delineation of cliff top and toe on very irregular planform coastlines (CliffMetrics v1.0). *Geosci Model Dev.* 11(10):4317–4337. doi:10.5194/gmd-11-4317-2018.

- Pindell J, Kennan L, Stanek KP, Maresch WV, Draper G. 2006. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. *Geol Acta Int Earth Sci J.* 4:1–2.
- Quintero W, Ladino A, Lozano E, Bolívar O, Rincón J, Puentes M. 2014. Mapa de profundidad de la isoterma de Curie para Colombia Versión 0. Bogota: Servicio Geológico Colombiano.
- Rey W, Ruiz-Salcines P, Salles P, Urbano-Latorre CP, Escobar-Olaya G, Osorio AF, Ramírez JP, Cabarcas-Mier A, Jigena-Antelo B, Appendini CM. 2021. Hurricane flood hazard assessment for the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, Colombia. *Front Mar Sci.* 8:1612. doi:10.3389/FMARS.2021.766258/BIBTEX.
- Seequent. 2022. Better in ten – Oasis montaj, Oasis montaj How-to Guide. Available from: <https://www.seequent.com/help-support/oasis-montaj/>.
- Teledyne. 2021. Inicio | Teledyne CARIS. <https://www.teledynecaris.com/en/home/>.
- Telford WM, Gerald LP, Sheriff RE. 1990. *Applied geophysics*. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press; p. 760. Available from: <https://acortar.link/uv3jo1>.
- Whitehead N, Musselman C. 2007. Montaj MAGMAP Filtering. 69. www.geosoft.com.
- Zou Z, Bakhtiari Rad P, MacElloni L, Zhang L. 2021. Temporal and spatial variations in three-dimensional seismic oceanography. *Ocean Sci.* 17(4):1053–1066. doi:10.5194/os-17-1053-2021.

1.3 Capacidades del Servicio Hidrográfico Colombiano, para sensoramiento remoto geofísico

Capacidades del Servicio Hidrográfico Colombiano, para sensoramiento remoto geofísico

Oviedo, K. (1) (2); Otálora, N. (1); Jigena, B. (2); Muñoz, J. J. (2); Contreras, A. (2)

- (1) Centro de Investigaciones Oceanográfica e Hidrográficas del Caribe, Cartagena Colombia; Ing.karemoviedo@gmail.com; NOtalora@dimar.mil.co
- (2) Universidad de Cadiz, Puerto Real (Cadiz), España; ing.karemoviedo@gmail.com; bismarck.jigena@gm.uca.es; juan jose.munoz@uca.es

Resumen: En los últimos años, el Servicio Hidrográfico Nacional Colombiano (perteneciente a la Dirección General Marítima - DIMAR) ha realizado grandes esfuerzos para adelantar investigaciones científicas multidisciplinarias en el territorio marino-costero colombiano. Adicional al mejoramiento de equipos y talento humano para optimizar sus capacidades hidrográficas, se ha ocupado en profundizar en el campo de la investigación geofísica marina. En particular, las técnicas de geomagnetismo, perfilador de subsuelo marino y sonar de barrido lateral. Como resultado de este gran trabajo se tiene en la actualidad múltiples productos y soluciones que se vienen ofreciendo en diversos aspectos como: proyectos geológicos, desarrollo de prospección arqueológica subacuática, búsqueda y rescate, e investigación científica y de reconocimiento del territorio marítimo colombiano. Todo esto encaminado a catapultar a Colombia como líder en la región en investigación oceanográfica y geofísica marítima en pro de la soberanía y el conocimiento.

Palabras clave: geofísica marina, sensores remotos marinos, Servicio Hidrográfico Nacional Colombiano.

1. INTRODUCCIÓN

El Servicio Hidrográfico Nacional repotenció su capacidad para el desarrollo de estudios hidrográficos y geofísicos en aguas someras y offshore del Caribe y Pacífico Colombiano, con la adquisición de plataformas hidrográficas, equipos de última tecnología y software de gestión de datos batimétricos. Permitiendo así, obtener y entregar productos de óptima calidad, garantizando la seguridad de la navegación y preservación de la vida humana en el mar, así como, la adquisición de conocimiento técnico-científico de la Plataforma Continental para un completo ejercicio de la soberanía nacional.

2. DATOS Y METODOS

Partiendo de la misión que tiene la DIMAR que es la de ejercer autoridad en todo el territorio marítimo, dirigiendo coordinando y controlando las actividades marítimas fluviales y costeras con seguridad integral y vocación de servicio, con el propósito de contribuir al desarrollo de los intereses marítimos y fluviales de la nación, la DIMAR busca fortalecer cuatro intereses fundamentales como lo son: soberanía e integridad del territorio marítimo nacional, investigación científica, tecnológica y de innovación, seguridad integral marítima y recursos ambientales marino costeros. Para ellos cuenta con 4 plataformas de investigación ARC MALPELO, ARC

PROVIDENCIA, ARC RONCADOR y ARC CARIBE (Fig. 1), y adicionalmente con 5 botes tipo pilot



Fig. 1. Plataformas de investigación para levantamientos de información hidrográfica y geofísica, de derecha a izquierda, ARC Malpelo, ARC Providencia, ARC Roncador y ARC Caribe.

Las embarcaciones cuentan con ecosondas fijas y portables como por ejemplo, la EM302 y la 2040P de Kongsberg, que tienen la capacidad de realizar levantamientos batimétricos que van desde los 0m a los 7000m de profundidad posibilitando una cobertura total del fondo, por medio de la cual se ejecuta la elaboración de cartas náuticas, estudios geológicos y geofísicos, exploración de recursos minerales, investigación de ecosistemas submarinos y búsqueda y rescate. El producto obtenido es una superficie que puede ser generada con diferentes resoluciones incluso a partir de los 0.5m, dependiendo de la necesidad como se aprecia en la

Fig 2. Para estos levantamientos se utilizan las normas OHI (OHI, 2008) apoyados por tecnologías de última generación como ser los sistemas GNSS, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (Torrecillas et al. 2012, Jigena et al. 2018)

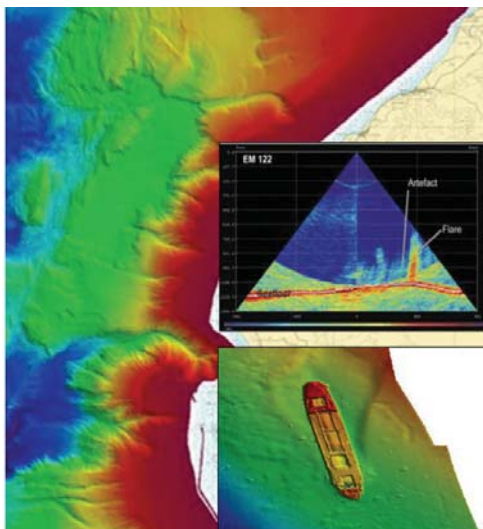


Fig. 2. Superficies generadas del levantamiento Multihaz.

De la mano con los levantamientos batimétricos, se desarrollan levantamientos de perfilador de sub fondo marino con el equipo (SBP 300) de Kongsberg, con frecuencias que van desde 2.5 a 6.5kHz (Fig. 3)

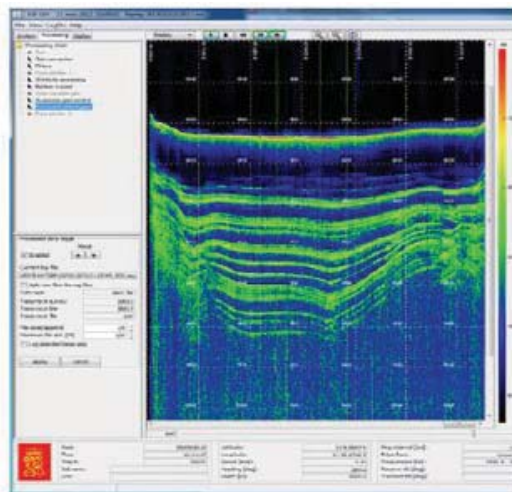


Fig. 3. Ejemplo de visualización de la adquisición de información de perfilador del sub fondo marino con el equipo SBP 300 a bordo del buque ARC Malpelo.

Se alcanzan hasta 100m de penetración y que permiten la identificación de fallas en la corteza oceánica, determinación de capas de isocapas (mismo tipo de sedimento), estudios de dinámica sedimentaria, arqueología submarina, búsqueda de objetos hundidos, búsqueda de fuentes hidrotermales y la obtención de volúmenes de sedimentos para trabajos de dragado (Muñoz-Perez et al., 2000, Pranzini et al., 2018).

Adicionalmente se cuenta con Sonar de barrido lateral (Fig. 4) que ha permitido desarrollar con eficacia la búsqueda y rescate (Muñoz-Perez et al., 2015), así como el desarrollo de estudios Arqueológicos (PCS), inspección de cables y tuberías submarinas, estudios geológicos y geofísicos, para ello se cuenta con el equipo pulsar de Kongsberg que maneja unas frecuencias de 500Khz a 1000Khz y trabaja hasta una profundidad máxima de 300m.

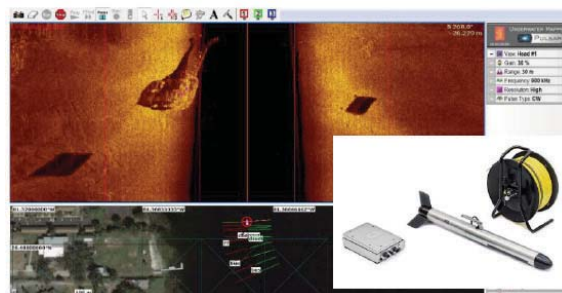


Fig. 4. Imagen de levantamiento en tiempo real del Sonar de barrido lateral Pulsar de Kongsberg.

Siguiendo la línea de los equipos geofísicos se tiene el magnetómetro marino de vapor de cesio de Geometrics G-882, apto para realizar levantamientos regionales y locales y con el cual se han obtenido grandes resultados (Fig. 5) que van desde la caracterización geológica hasta la identificación de sitios susceptibles de ser patrimonio cultural sumergido de la nación gracias a su tecnología y alta sensibilidad del sensor.

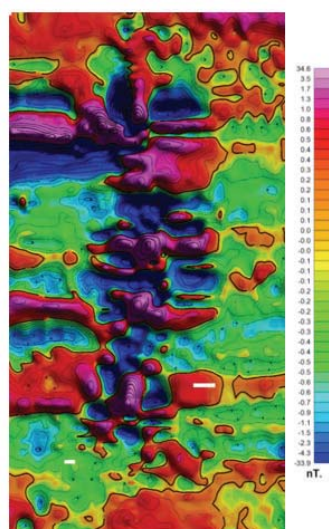


Fig. 5. Superficie magnética del subsuelo marino para la detección de un pecio sedimentado.

Los productos generados son superficies magnéticas que brindan información geofísica acerca del estudio de la actividad de las dorsales oceánicas, arqueología submarina, búsqueda y rescate de objetos ferromagnéticos hundidos o enterrados y la búsqueda de recursos minerales.

Con la integración de las fuentes de información de los sensores anteriormente mencionados, Colombia se destaca en la región por la generación de información y producción científica de interés local y global, ya que por ejemplo se ha llegado a una caracterización detallada de la geomorfología del fondo marino (Fig. 6) en el territorio marítimo del caribe colombiano y se suman esfuerzos en la actualidad para alcanzar dicha caracterización en el pacífico colombiano.

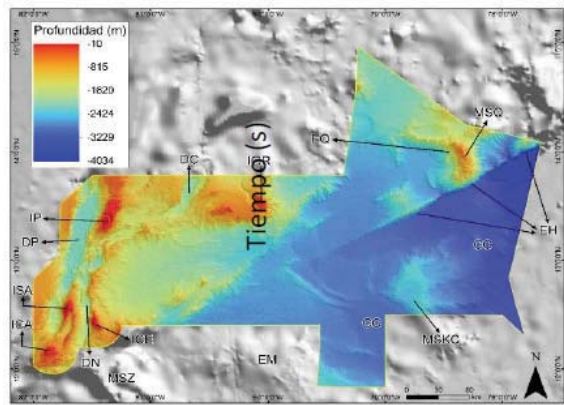


Fig. 6. Cálculos de profundidades para la caracterización de geoformas en el fondo marino del caribe colombiano

Esta sinergia también ha permitido brindar soluciones eficaces y eficientes en la búsqueda y rescate puesto que se han realizados ejercicios en conjunto con la Armada de Colombia como se muestra en la figura 7, y algunos de búsqueda y salvamento en mar y río como se muestra a continuación en los ejemplos de las figuras 8, 9 y 10.



Fig. 7. Levantamiento batimétrico del submarino ARC PIJAO de la Armada Nacional.

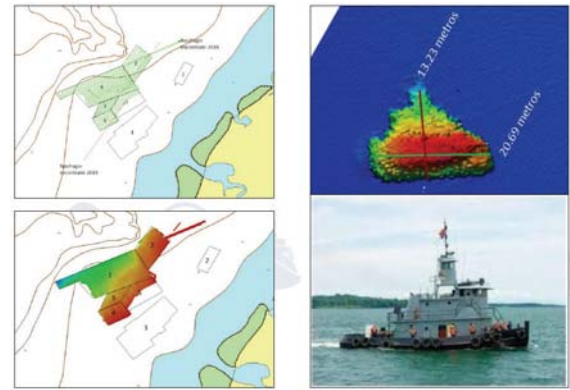


Fig. 8. Levantamiento batimétrico del remolcador ARC Andagoya de la Armada Nacional que naufragó en el año 2018.

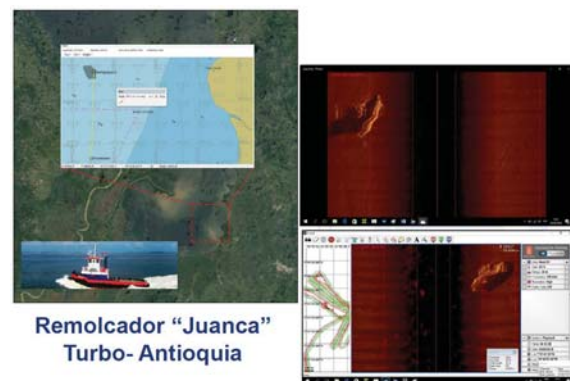


Fig. 9. Detección en tiempo real del remolcador "Juanca" en el golfo de Urabá

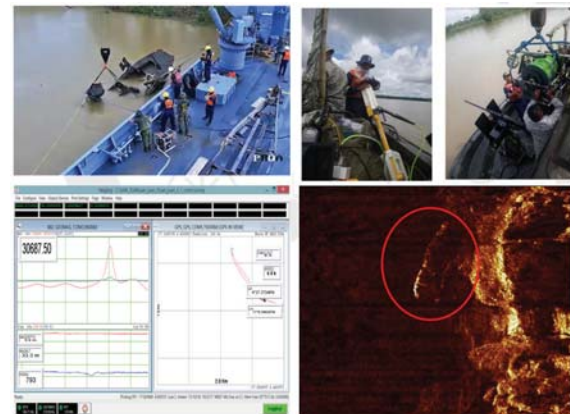


Fig. 10. Detección en tiempo real con magnetómetro y sonar de Barrido lateral de lancha de infantería, en el Rio San Juan. Que fue reflotada posteriormente.

3. CONCLUSION

Las capacidades fortalecidas en los últimos años son el resultado de una búsqueda incansable de la excelencia y un trabajo constante por la obtención de datos que permitan producir y divulgar la información necesaria para garantizar la seguridad marítima, un concepto que involucra de forma integral la seguridad de la vida humana en el mar, la protección del medio

ambiente marino y la seguridad de la navegación, lo cual ha llevado a que Colombia se profile como una potencia bioceánica de la región.

Agradecimientos

A la Dirección General Marítima y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, por apoyar las nuevas iniciativas y brindar las herramientas para consolidar nuestro país marítimo.

REFERENCIAS

- Berrocoso M., Torrecillas C., Jigena B. and Fernández-Ros A. 2012. Determination of geomorphological and volumetric variations in the 1970 land volcanic craters area (Deception Island, Antarctica) from 1968 using historical and current maps, remote sensing and GNSS. *Antarctic Science*, Vol 24(4), pp 367–376, doi:10.1017/S0954102012000193
- Dimar. (2020) Capacidades Acusticas SHN WEBINAR. <https://cloud.dimar.mil.co/index.php/s/WjnNQhQVpmBqQ6X>
- Jigena B., Mamani R., Muñoz-Perez J.J., Garvi D., Walliser M., Calderay F. & Berrocoso M. 2018. Methodology for hydrological information management in waterways: Application to Bolivia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. 9, núm. 4 (2018), pp 237-256. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-v9-n4>
- Muñoz-Pérez, J. J., Gutiérrez Mas, J. M., Naranjo, J. M., Torres, E., Fages, L. (2000). Position and monitoring of anti-trawling reefs in the Cape of Trafalgar (Gulf of Cadiz, SW Spain). *Bulletin of Marine Science*, 67(2), 761-772.
- Muñoz-Perez, J. J., Khan-Mozahedy, A. B. M., Neves, M. G., Tejedor, B., Gomez-Pina, G., Campo, J. M., & Negro, V. (2015). Sinking of concrete modules into a sandy seabed: A case study. *Coastal Engineering*, 99, 26-37.
- OHI (Organizacion Hidrografica Internacional). 2008. Normas de la OHI para los levantamientos hidrograficos. Publicación Especial No. 44, 5a Edición, Febrero 2008, Publicado por el Bureau Hidrográfico Internacional, Mónaco.
- Peláez, J., Oviedo, K., (2015). Metodología General Para Adquisición y Procesamiento de Datos Geomagneticos. Direccion general Maritima - DIMAR. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe - CIOH.
- Pranzini, E., Anfuso, G., Muñoz-Perez, J.J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32-35.
- Telford W. M., Geldart L. P. and Sheriff R. E. 1990. Cambridge University Press, 2nd Edition, OnlineISBN: 9781139167932. DOI:<https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>
- Udias Vallina, Agustin. 1997. Fundamentos de Geofisica. Editorial Alianza, 476 pp, ISBN: 9788420681672.

1.4. Implementación del método geomagnético marino en el conocimiento del territorio marítimo colombiano

Implementación del método geomagnético marino en el conocimiento del territorio marítimo colombiano

Oviedo, K. (1) (2); Jigena, B. (2); Muñoz, J. J. (2); Otálora, N. (1); Contreras, F. (2)

(1) Centro de Investigaciones Oceanográfica e Hidrográficas del Caribe, Cartagena Colombia; Ing.karemoviedo@gmail.com; NOtalora@dimar.mil.co

(2) Universidad de Cadiz, Puerto Real (Cadiz), España; ing.karemoviedo@gmail.com; bismarck.jigena@gm.uca.es; juanjose.munoz@uca.es

Resumen: El Servicio Hidrográfico Nacional Colombiano encabezado por la Dirección General Marítima – DIMAR, ha desarrollado en los últimos años el método geomagnético marino en aras de fortalecer la investigación científica de territorio marítimo colombiano. En este sentido, se ha fortalecido con la adquisición de sensores de última tecnología, así como de capacitaciones y personal especializado en el método geofísico. La implementación del método geomagnético no solo ofrece la oportunidad de avanzar en el conocimiento científico básico, sino que también es de suma importancia como apoyo en lo que concierne al tema de la soberanía nacional. Los usos más representativos del método geomagnético, y de mayor interés para la DIMAR son: localización de tuberías y detección de artillería enterrada, identificación de sitios de interés arqueológico, y caracterización de estructuras geológicas, entre otras aplicaciones.

Palabras clave: Geomagnetismo marino, Geofísica marina, DIMAR.

1. INTRODUCCIÓN

Es ampliamente conocida la utilización del método geomagnético a nivel mundial, por sus diversas aplicaciones de forma local, y regional. Debido a sus altos costos (que implica equipamientos y desarrollo logístico) y múltiples aplicaciones, este método geofísico es generalmente realizado por empresas privadas extranjeras con fines comerciales, lo cual se convierte en una desventaja para las entidades estatales dedicadas a la ciencia y la investigación marina, que cuentan con asignaciones presupuestales limitadas. Por lo tanto, se puede resumir que la exploración geofísica es dominada por empresas extranjeras consolidadas que componen todo el mercado, incluidos esos servicios de poca oferta como lo son gravimetría y magnetometría (Gallego et al., 2015)

La Dirección General Marítima (DIMAR) dio inicio al proyecto “Geomagnetismo Marino” en el año 2015, con el fin de recuperar la capacidad investigativa, a través de la utilización del magnetómetro marino G-882 de Geometrics. Una de las actividades de recuperación, incluía capacitación sobre el manejo del sensor magnético y la adquisición de datos. Por lo anterior, se elaboró un documento (DIMAR et al., 2015) donde se recopiló una vasta base de datos y manuales que sirvieron de base para la elaboración de la siguiente metodología de trabajo geofísico

2. METODOLOGIA

FASE 1. Planeación de la campaña de adquisición. En esta etapa se da inicio al establecimiento de la forma del levantamiento geofísico, se estiman los tiempos, los insumos necesarios y los posibles imprevistos que se pueden presentar en altamar. Antes de realizar la planeación de la adquisición de datos, inicialmente se debe tener en cuenta el objetivo de estudio y la escala de trabajo (local o regional). De éstos dependerá la configuración y la extensión de las líneas a adquirir (ver Fig. 1).

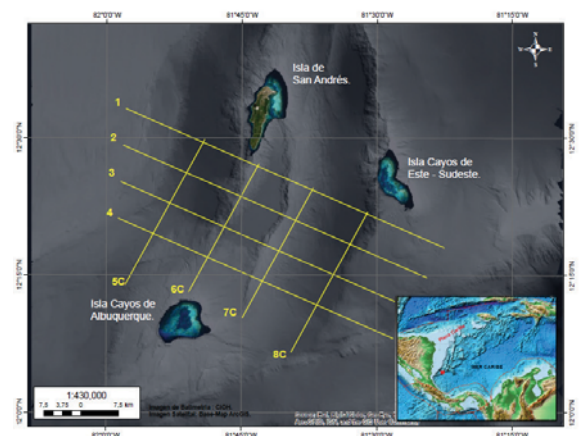


Fig. 1. Líneas y Zonas de levantamiento.

Es necesario contar con información magnética adicional, ya sea de observatorios magnéticos o de una estación base cercana al área de levantamiento, con el fin de mejorar la calidad de la información. Para este caso se utiliza una estación base G-862 RBS Geometrics (Fig. 2)



Fig. 2. Instalación de Estación Base Geometrics RBS G-862.

FASE 2. Adquisición de la información

Las plataformas de investigación oceanográfica ARC Roncador, ARC Malpelo y ARC Providencia, están capacitadas para operar con el magnetómetro marino Geometrics G-882 (Geometrics, 2005), propiedad de la DIMAR. Este tiene un rango de detección amplio para materiales ferrosos de varios tamaños y una sensibilidad $<0.004 \text{ nT} / \pi\text{Hz rms}$, lo que aumenta la probabilidad de detección. Cuenta además con un diseño hidrodinámico que ayuda a disminuir la probabilidad de incrustación en rocas, y opera hasta aproximadamente 2750 m de profundidad, con temperaturas desde -35°C a 50°C . El sensor de vapor de cesio, se encuentra en la parte posterior del “pescado” en el cilindro que forma una T con el eje más largo (Fig. 3), en donde se puede modificar la orientación del sensor, que será vertical ya que el trabajo se llevará a cabo en latitudes ecuatoriales. Finalmente, el Intervalo de muestreo desde una (1) muestra cada 3 segundos, hasta veinte (20) muestras por segundo, con una exactitud absoluta de $<2 \text{ nT}$.



Fig. 3. Plataforma de investigación ARC Providencia, Magnetómetro marino Geometrics G-882, Winche de investigación geofísica de 2800 m a bordo del ARC Providencia.

Para salir a campo se debe tener en cuenta algunos elementos indispensables para llevar a cabo la

adquisición de una manera óptima. Por ejemplo, el sensor magnetométrico, el winche portable que cuenta con 300 m de cable de telemetría, que se adapta perfectamente para llevar a cabo la recolección de la información geofísica. Por otra parte, el buque ARC Providencia tiene una adaptación especial, ya que cuenta con un winche de 2800 m de cable de telemetría y una adaptación abordo en el laboratorio de geología (laboratorio del buque), en donde se encuentra el centro de cómputo, y en donde los datos magnéticos son visualizados y almacenados en tiempo real (Fig. 4).

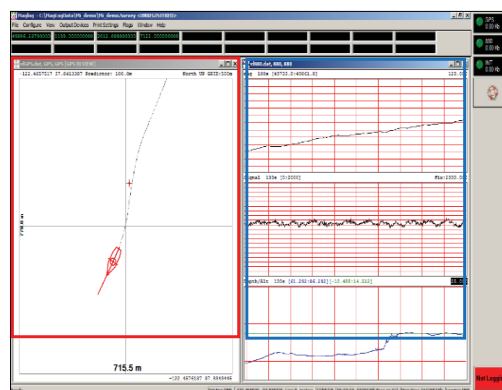


Fig. 4. Visualización en tiempo real de información geomagnética en el software MagLog.

La adquisición se realiza con ayuda del personal del buque, y teniendo en cuenta ciertos lineamientos, como por ejemplo una velocidad máxima de 5 nudos y una separación del sensor de por lo menos 3 veces, la eslora del ARC Providencia es de 50 m, por lo tanto la separación del sensor sería de 150 m, como mínimo. Importante tener en cuenta que debe de estar en modalidad arrastre por popa. Para la georreferenciación de los datos adquiridos se siguen las normas de la OHI (OHI, 2008) y también se ha tomado en cuenta la metodología propuesta por Jigena et al. (2016)

Las distintas etapas involucradas en la adquisición de información geomagnética marina, están sometidas a una serie de decisiones que pueden afectar radicalmente el resultado final de la investigación. Existen varios errores usuales que se pueden cometer a lo largo del proceso, los que se pueden dividir según la etapa de desarrollo en la que se encuentre el estudio. Existen, por lo tanto, errores frecuentes relacionados con la planeación, que involucran un mal diseño de las líneas a adquirir, en donde puede ser difícil discernir la forma exacta y tamaño de la anomalía; una medición tiene interés solamente si se conoce el margen de error que puede tener esta medida. Lo que se interpreta, es una colección de datos, por lo que el muestreo tiene que ser de acuerdo con la dimensión del objetivo a alcanzar. Otro tipo de errores están asociados con los equipos de medición,

que puede inducir a lecturas erradas, y afectar la calidad de los datos; errores de los operadores, errores de muestreo, y errores asociados a ruido ambiental, entre otros.

3. RESULTADOS

En el ejercicio de la aplicación metodológica, se presentaron algunos contratiempos en cuanto a lo planeado, esto debido a temas logísticos de la embarcación, también cabe mencionar que el levantamiento de información fue realizado a bordo del buque ARC Roncador con un winche portable de 300m. El arreglo geométrico tuvo que ser un poco menos extenso que el planeado originalmente como se observa en la figura 5.

El estudio geofísico comprende los datos recolectados entre los días 20 de Junio y 1 de Julio de 2018, en una zona al sur de la Isla San Andrés, con cuatro líneas perpendiculares a la dirección general de las estructuras geológicas, con una longitud máxima de 70,67 km, y cuatro líneas en sentido paralelo a dichas formaciones y 31 km de longitud máxima, se conserva un arreglo geométrico en forma de grilla que permita brindar una buena resolución para un estudio geológico regional.

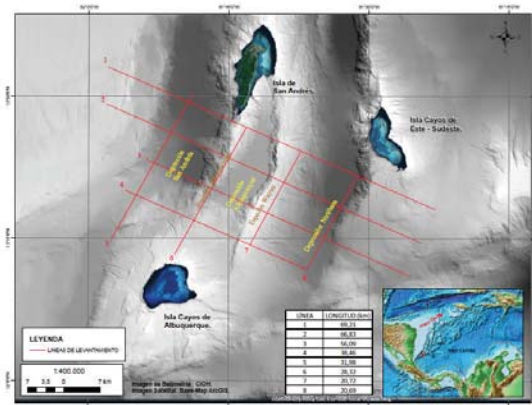


Fig. 5. Arreglo geométrico de la adquisición geomagnética..

Se presenta el mapa de campo total de los datos levantados (Fig. 6). Allí se observa la superficie magnética de los datos adquiridos luego de ser sometidos al procesamiento en donde tuvieron correcciones de variación diurna, retraso, orientación en grados y del modelo del campo geomagnético internacional (IGRF). Se observa una anomalía significativamente positiva en la zona este, sobre la Depresión Nutibara. Las variaciones en nanoteslas se visualizan en un rango de (-170.48nT a 159.37nT)

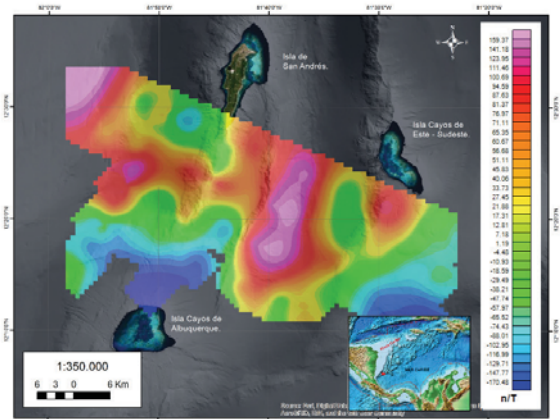


Fig. 6. Superficie geomagnética del campo total con correcciones.

4. CONCLUSIONES

- La metodología para la adquisición geomagnética marina se convierte en el primer precedente de investigación geofísica marina al servicio de la soberanía colombiana.
- Aunque la exploración geofísica es dominada por empresas extranjeras consolidadas, la DIMAR, ahora se encuentra en la capacidad de ofertar servicios geofísicos de magnetometría.
- Luego de muchos esfuerzos y pruebas de campo en el Caribe Colombiano, se logra obtener la estandarización del procedimiento de adquisición geomagnética como un producto metodológico que ofrece una obtención de información geomagnética marina de alta calidad

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto “Geomagnetismo Marino” de la Dirección General marítima y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, a quienes los autores agradecen por todo el apoyo prestado en dicha labor, también se reconoce la excelente labor del personal del buque oceanográfico ARC Roncador por su entrega y profesionalismo.

REFERENCIAS

- Anon. (1988). 1987 International geoscience and remote sensing symposium - IGARSS '87 - Remote sensing: Understanding the earth as a system. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26(5), 502–698.
- Ariffin, K. S. (1879). Geophysical Surveying Using Magnetism Methods. Geofizik Carigali, 1–35.

- Carvajal, L. C., & Mann, P. (2015). Petroleum System Analysis of the Nicaraguan Rise and Colombia Basin: A Regional Overview from Seismic and Well Data *. Search and Discovery, 10736.
- Carvajal-Arenas, L. C., & Mann, P. (2018). Western Caribbean intraplate deformation: Defining a continuous and active microplate boundary along the San Andres rift and Hess Escarpment fault zone, Colombian Caribbean Sea. AAPG Bulletin, 102(8), 1523–1563.
- Concha, A. E., & Macía, C. (1993). Caracterización y Clasificación geoquímica de las Rocas volcánicas de Providencia en el Caribe colombiano. Geología Colombiana, 18, 137–142.
- Couch, R., & Woodcock, S. (1981). Gravity and structure of the continental margins of southwestern Mexico and northwestern Guatemala. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 86(B3), 1829–1840.
- De Albornoz, F. J. P. C. (2002). El Instituto Hidrográfico de la Marina. Arbor, 173(682), 365–883.
- Denver Processing Center Inc. (1979). Los Cayos area of Caribbean Sea.
- DIMAR, Peláez, J., & Oviedo, K. (2015). Manual de adquisición y procesamiento de información geomagnética. 180.
- Ecopetrol. (1984). Interpretación geológica preliminar de la información sísmica del programa Los Cayos - 82". 52 p.
- Gallego, J. M., Jaramillo, H., & Patiño, A. (2015). Servicios intensivos en conocimiento en la industria del petróleo en Colombia. Servicios Intensivos En Conocimiento En La Industria Del Petróleo En Colombia.
- García, J. I., García-varón, J., & León, H. (2018). SUBMARINE GEOMORPHOLOGY AND GEOTECTONIC CONTEXT OF AN INTRAPLATE VOLCANIC PROVINCE IN WESTERN COLOMBIAN CARIBBEAN.
- Geotem. (n.d.). Geotem - Magnetometría Marina. Retrieved June 9, 2020, from <http://www.geotem.com.mx/marinos4.php>
- Geister, J., & Díaz, J. (2002). Ambientes arrecifales y geología de un archipiélago oceánico: San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Mar Caribe, Colombia (Guía de Campo). INVEMAR, Santa Marta.
- Geister, J. (1992). Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western Caribbean Sea, Colombia). Facies, 27(1), 1.
- Graterol, V. (2005). Basic principles and applications of the Gravity and Magnetic Exploration methods.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B., & Saad, A. H. (2013). Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. Cambridge University Press.
- Hernandez, O. (2006). Tectonic analysis of northwestern South America from integrated Satellite, airborne and surface potential field anomalies. The Ohio State University.
- Holcombe, T. L., Ladd, J. W., Westbrook, G. K., & Edgar, N. T. (1990). Caribbean marine geology; ridges and basins of the plate interior. The Caribbean Region, The Geology of North America, Vol. H, Geological Society of America, 231–260.
- Introcaso, A., Ghidella, M. E., Ruiz, F., Crovetto, C. B., Introcaso, B., & Paterlini, C. M. (2008). Métodos gravi-magnetométricos modernos para analizar las características estructurales de la plataforma continental argentina. Geoacta, 33, 1–20.
- Jigena, Bismarck; Berrocoso, Manuel; Torrecillas, Cristina; Vidal, Juan; Barbero, Ignacio and Fernandez-Ros, Alberto. 2016. Determination of an experimental geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. Antarctic Science, Vol 28(4), pp 277–292, doi:10.1017/S0954102015000681
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). An Introduction to Exploration Geophysics. In Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mochales, T. (2006). Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza. 222.
- Nabighian, M. N. (1984). Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations. Geophysics, 49(6), 780–786.
- NOAA, N. C. for E. I. (n.d.). Magnetic Declination, Models, Data and Services | NCEI.
- OHI (Organización Hidrográfica Internacional). 2008. Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos. Publicación Especial No. 44, 5a Edición, Febrero 2008, Publicado por el Bureau Hidrográfico Internacional, Mónaco.