

ARTÍCULO

## Aplicación de la señal 3D analítica en procesamiento de datos magnéticos marinos para un naufragio en el Caribe colombiano

### 3D analytical signal application in magnetic marine data processing for a shipwreck in the Colombian Caribbean

Fecha recepción: 2009-08-29 / Fecha aprobación: 2009-10-28



Andrés Cárdenas Contreras, acardenas@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Proyecto Curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia.

Juan Carlos Acosta Chady, j.acosta@dimar.mil.co,

José Arturo Arias Cardozo, jarias@cioh.org.co

Alex Ferrero Ronquillo, jefc5klo@dimar.mil.co,

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH

Sary Aived Téllez Moncada, tellez.sary@gmail.com

Lina Marcela Fibra Camacho, lina.fabra@gmail.com

Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

### Resumen

En un crucero de adquisición de datos magnéticos, a bordo del buque A.R.C “Providencia” se realizó simultáneamente el levantamiento magnético y batimétrico, en el área delimitada por las coordenadas geográficas 10°20'50” N - 10°21'30” N de latitud y 75°35'40” W - 75°36'20” W de longitud, cerca a la isla Tierra Bomba. Dada la alta susceptibilidad magnética del naufragio Ex A.R.C “Pedro de Heredia” y con el objetivo de identificar su respuesta anómala, se diseñaron dos áreas de investigación: una general y otra detallada, cubriendo un área de 2,25 km<sup>2</sup> con 22 líneas separadas 50 m y un área de 0,08 km<sup>2</sup> con 8 líneas separadas 20 m respectivamente, en dirección Norte – Sur. Realizando así, el primer crucero de investigación utilizando el magnetómetro marino Geometrics G-882. Una vez adquiridos los datos, se obtuvieron los mapas de las anomalías magnéticas, a los cuales se les realizaron las correcciones por variación diurna y anomalía regional correspondiente al modelo IGRF 2005. Como el propósito del proyecto de investigación fue identificar la fuente anómala, en el procesamiento de datos se utilizó la técnica de señal analítica 3D para los valores de las anomalías del campo magnético total, cuyos resultados muestran con precisión la localización y profundidad del naufragio, demostrando que este método, permite identificar la fuente magnética y discriminarla de otras geofomas obtenidas con batimetría.

**Palabras claves:** Anomalía magnética, magnetómetro, señal analítica, naufragio.

### Abstract

On a cruise for magnetic data gathering, aboard the ship A.R.C “Providencia” the magnetic and bathymetric survey was carried out simultaneously within the area delimited by the geographic coordinates 10°20'50” N - 10°21'30” N latitude and 75°35'40” W - 75°36'20” W longitude, close to the Tierra Bomba island. Given the shipwreck Ex A.R.C “Pedro de Heredia” high magnetic susceptibility and with the purpose of identifying its anomalous response, two research areas were designed, a general one and a detailed one, covering an area of

2.25 km<sup>2</sup> with 22 lines separated 50 m and an area of 0.08 km<sup>2</sup> with 8 lines separated 20 m respectively in the North – South direction. This way, the first research cruise using the marine magnetometer Geometrics G-882 had taken place. Once the data had been gathered, the magnetic anomaly charts were obtained to which the corresponding corrections for daytime variation and regional anomaly to model IGRF 2005 were made. Since the purpose of the Research was to identify the anomaly source, in the data processing, the 3D analytical signal technique was used, for the values of the total magnetic field anomalies, whose results show accurately the location and depth of the shipwreck, showing that this method permits the identification of the magnetic source as well as discriminating it from other geo-forms obtained through bathymetry.

**Key words:** Magnetic anomalies, analytic signal, magnetometer, shipwreck.

## Introducción

En 1989, el Instituto de Investigación Oceanográfica del Reino Unido “Charles Darwin”, con el buque “NH Kenyon”, realizó una campaña geofísica, en el área de estudio correspondiente al Caribe colombiano localizada entre 9° 30' y 13° N de latitud y entre 73° y 77° W de longitud. En este estudio se obtuvieron datos magnéticos y batimétricos, los primeros fueron adquiridos con magnetómetro de protón de precisión VARIAN V75 de tipo análogo; mientras que para los datos batimétricos se usó la Ecosonda IOS MK3 también análoga. Para este estudio, se diseñó una grilla de 1 minuto y se utilizó el modelo IGRF 1985. Base de datos disponible en internet URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html>.

La Agencia Nacional de Hidrocarburos realizó el estudio New Magnetic Anomalies Colombia MAM – 2008, obtenido a través de datos magnéticos de firmas multinacionales. Los valores de la intensidad magnética total fueron corregidos por variaciones diurnas y por el modelo IGRF 2005, con lo que se obtuvo la anomalía magnética total, para el país. Los rangos de las anomalías fueron normalizados para todo el país por diferencias de alturas y presentan variaciones entre -113nT y +104 nT, incluyendo algunas zonas de las plataformas oceánicas del Caribe y el Pacífico colombianos. La zona del Caribe correspondiente al proyecto de investigación, muestra

valores de 10 nT a -30 nT estudiada previamente por Briceño, *et al.* [1] y sirvió como un estudio de referencia en términos de los valores que se esperaban en la zona de investigación.

Los reportes de aplicación de geomagnetismo en Arqueología en el ámbito internacional son escasos, aún es una técnica de investigación en auge. En 2007 se realizó un proyecto de los ríos Mississippi y Missouri, dado que durante los comienzos y mediados del siglo XVIII fue el apogeo de la navegación por vapor en estos ríos y cientos de barcos se perdieron y fueron sepultados por los sedimentos debido a fallas técnicas, explosiones y colisiones. Entonces se utilizó un magnetómetro terrestre y un GPS diferencial, cubriendo un área de aproximadamente 370 hectáreas, en una zona muy cerca de la desembocadura del río Missouri. Se realizaron grillas separadas 20 m y en algunas zonas se requirió una evaluación más detallada, utilizando 5 m de espaciamiento. La anomalía reportada, corresponde con un naufragio enterrado a 13 metros y corresponde con un barco entre 8 a 10 toneladas estudiado por Larson, *et al.* [2].

Recientemente en agosto de 2009, se publicaron los resultados de las investigaciones arqueológicas en el sitio de naufragio *Queen Annes Revenge* que fue descubierto el 21 de noviembre de 1996. Con los debidos permisos, un grupo interdisciplinario conformado por estudiantes de State of North Carolina y la empresa Army Corps of Engineers, buscaron los restos del naufragio. Los resultados del proyecto han proporcionado una amplia y completa de base de datos que determinó la localización de los restos, y analizó el conjunto de artefactos recuperados de un naufragio. El trabajo de campo soportado en técnicas de percepción remota, permitió localizar el naufragio en la proximidad del sitio conocido como Beaufort Intet en la ciudad de Morehead Harbord, en la carta náutica No 11547 de NOAA (National Ocean and Atmospheric Administration). En el trabajo de campo se utilizó un magnetómetro marino, con el que se determinaron las anomalías magnéticas causadas por metales no ferrosos, lo que permitió definir que el naufragio tenía una longitud de 180 m fue estudiada previamente por Wilde-Ramsing, *et al.* [3].

El Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC y la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL, han sido las entidades responsables de

adquirir y compilar los datos magnéticos desde mediados del siglo pasado y más recientemente desde su creación en el 2004. La Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, a través del Servicio de Información en Exploración y Producción EPIS, ha clasificado y almacenado la información. Desde la aparición de la ANH, compañías internacionales especialmente Carson Aerogravity, han realizado adquisiciones aeromagnéticas del territorio nacional estudiada previamente por Briceño, *et al.* [1] cuyas bases de datos se encuentran disponibles en la Bases de Datos Magnéticos de Colombia COLMAG.DAT. Sin embargo las adquisiciones de datos magnéticos marinos realizadas por compañías multinacionales no se encuentran disponibles.

La Dirección General Marítima DIMAR, garantizó las condiciones para realizar el presente estudio entre profesionales del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en un área cercana a la isla de Tierra Bomba en Cartagena de Indias, en el cual se realizó el levantamiento magnético y batimétrico del naufragio del Ex A.R.C “Pedro de Heredia”, zona de interés de investigación dada su alta susceptibilidad magnética,  $\chi = 2500$ , basados en experiencias internacionales de adquisición estudiadas por Boyce, *et al.* [4], a bordo de la plataforma de investigación oceanográfica A.R.C. “Providencia”, con el Magnetómetro Geometrics G-882 y el sistema Multihaz Atlas Hydrosweep MD 2/30, se adquirieron los datos en dos zonas de investigación una general y otra detallada.

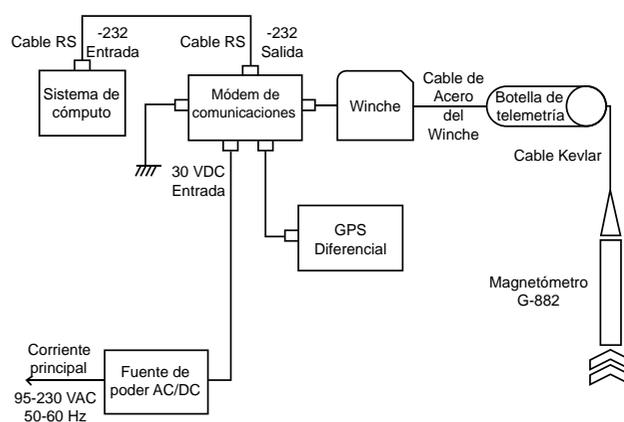
Además de la adquisición de datos, el propósito de este estudio fue aplicar en el procesamiento de datos magnéticos los análisis realizados por Nabighian [5], Roest *et al.* [6], MacLeod, *et al.* [7], con respecto a la señal analítica 3D, cuyos resultados fueron precisos para la identificación de la fuente anómala producida por el naufragio.

## Materiales y métodos

### Datos magnéticos y batimétricos

El A.R.C “Providencia” se encuentra dotado con el magnetómetro marino Geometrics G-882, tiene un principio de funcionamiento de rayo dividido de vapor de cesio auto oscilante (no radiactivo) y puede realizar la adquisición de datos por arrastre de nariz o

centro de gravedad, para este proyecto se realizó por centro de gravedad, dado que garantiza la seguridad del equipo en áreas más someras. El equipo está compuesto como se muestra en la figura 1: sistema de cómputo, módem de comunicaciones, botella de telemetría, winche, GPS diferencial, magnetómetro y fuente de poder. La adquisición de datos se realizó a una tasa de muestreo de 100 Hz, obteniéndose 112.993 registros para las dos zonas del estudio. Cada registro tiene: coordenadas geodésicas en WGS84 (latitud, longitud y altura elipsoidal), señal, tiempo universal, altitud y profundidad obtenida con el sensor, línea de adquisición a la que pertenece y distancia a la que se encuentra el sensor. En el levantamiento hidrográfico, se utilizó el sistema Multihaz Atlas Hydrosweep MD 2/30, equipo de baja frecuencia (24/28 KHz) y muy alta resolución ideal para la caracterización de la morfología submarina en aguas relativamente profundas, con un rango de profundidad comprendido entre los 10 m y los 5.000 m y una precisión vertical de  $0.3 \text{ m} \pm 0.2\%$ .



**Figura 1.** Esquema de conexión del magnetómetro marino G-882.

El buque zarpó el 17 de mayo de 2009 y durante tres días se adquirieron los datos magnéticos e hidrográficos en cercanías de la isla de Tierra Bomba entre las siguientes coordenadas:  $10^{\circ}20'50''$  N -  $10^{\circ}21'30''$  N latitud y  $75^{\circ}35'40''$  W -  $75^{\circ}36'20''$  W de longitud (figura 2). En la primera y segunda grilla de campo se modeló la respuesta anómala magnética del naufragio. Primero se definió un área de  $2.25 \text{ km}^2$  con 22 líneas, con una separación de líneas entre sí de 50 m, grilla denominada Pedro de Heredia General,

PHG, con la cual se buscaba identificar el comportamiento de la fuente anómala en un área de investigación mayor, simulando condiciones reales de adquisición geomagnética, en las cuales no se conoce el objetivo. También se realizó una investigación más detallada sobre el naufragio, cubriendo un área de 0.08 km<sup>2</sup> con 8 líneas de adquisición a un intervalo de muestreo de 100 Hz y una separación de líneas entre sí de 20 m, esta grilla se denominó Pedro de Heredia Detallado, PHD.

### Anomalías magnéticas

El campo magnético observado, no distingue entre las diferentes fuentes que lo componen según

Campbell [8] y en los estudios con fines de prospección geofísica, se definen en general tres fuentes de acuerdo a Rodríguez [9]. La primera y principal fuente es el núcleo de la Tierra, que cambia lentamente con el tiempo, lo que se conoce como variación secular, y corresponde con el modelo IGRF, la segunda son las variaciones externas causadas principalmente por el Sol, cuya principal fuente es la variación diurna; y la tercera es la causada por heterogeneidades de la corteza que son pequeñas variaciones (anomalías) del campo magnético de la Tierra y son denominadas campo anómalo de la Tierra. Esta última fuente magnética es la de interés en el presente estudio.

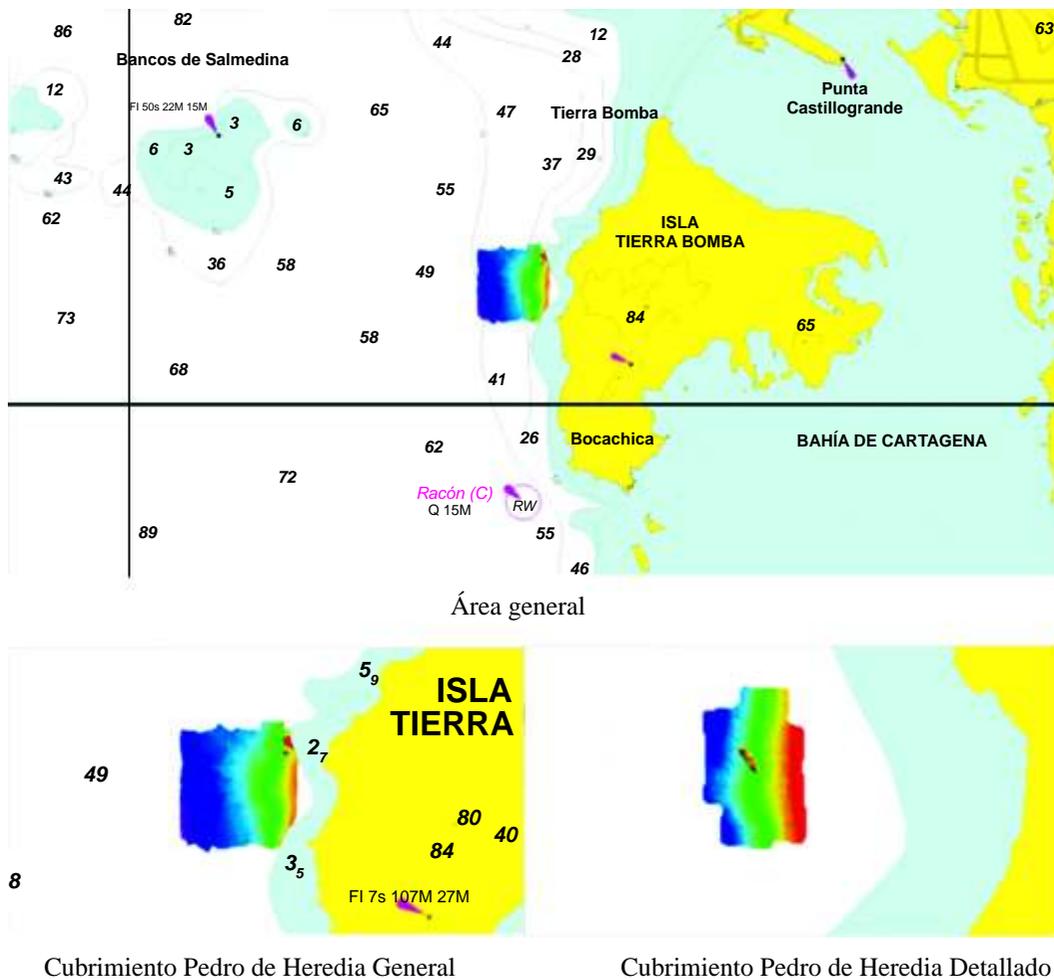


Figura 2. Área de estudio.

Se define una anomalía del campo magnético ( $B$ ), de acuerdo a la siguiente relación:

$$B = B_{observ} - B_{IGRF} - B_{ext} \quad (1)$$

Donde  $B_{observ}$  corresponde al campo magnético observado,  $B_{IGRF}$  es el campo magnético normal obtenido mediante el modelo IGRF 2005 y  $B_{ext}$  es el campo magnético externo debido al Sol y corresponde con la variación diurna.

El IGRF (International Geomagnetic Reference Field) es un modelo matemático, conocido como el campo magnético normal de la Tierra y su porcentaje anual de cambio (variación secular). En regiones libres de fuente como por encima de la superficie, el campo magnético  $B$  está definido como un gradiente de potencial escalar negativo. En términos de la siguiente ecuación de acuerdo a Campbell [8].

$$B(r, \theta, \lambda) = -V(r, \theta, \lambda) \quad (2)$$

Donde  $r, \theta, \lambda$  son coordenadas geocéntricas  $r$  es la distancia al centro de la Tierra,  $\theta$  la colatitud, ( $90 - \theta$ ), y  $\lambda$  la longitud), cuya solución en armónicos esféricos se resuelve a través de la siguiente relación:

$$V(r, \theta, \lambda) = a \sum_{n=1}^{n_{max}} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos(m\lambda) + h_n^m(t) \sin(m\lambda)) P_n^m(\theta) \quad (3)$$

Donde  $a$  es el radio magnético de referencia (6378.137 m);  $g_n^m(t)$  y  $h_n^m(t)$  son los coeficientes Gaussianos definidos por IAGA (Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía) en el tiempo  $t$  y  $P_n^m(\theta)$  son las funciones Schmidt Semi normalizadas asociadas de Legendre de grado  $n$  y orden  $m$ .

El modelo IGRF utiliza  $n_{max}=10$  (120 coeficientes) como nivel de truncamiento interno de la expansión, evitando posibles errores propios del campo magnético de la corteza. Los coeficientes del campo principal se redondean al entero más cercano en nanoteslas ( $nT$ ) que corresponden al límite de la resolución de la disposición los datos. Es decir, el cambio es asumido como lineal en intervalos de 5

años, para la aproximación de los 5 años siguientes, en donde el porcentaje de cambio es dado por la predicción de los coeficientes de variación secular obtenidos. El modelo IGRF predictivo para la variación secular se trunca en  $n_{max}=8$  (80 coeficientes). En este caso, los coeficientes son redondeados a la aproximación de  $0,1 nT/año$ , para reducir el efecto de los errores acumulados por redondeo según menciona Manda, *et al.* [10].

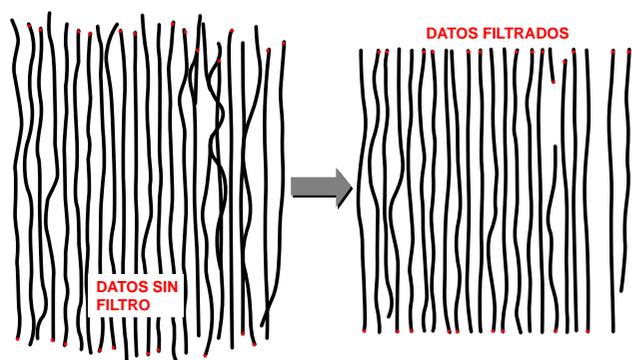
En el software Oasis Montaj® de Geosoft, se realizó la corrección del modelo IGRF 2005 correspondiente al modelo matemático o campo magnético normal de la Tierra. Para determinar la variación del campo magnético externo o variación diurna, se utilizó como estación base de referencia San Juan (Puerto Rico) de la red INTERMAGNET disponible en internet en el URL: (<http://www.intermagnet.org>), conocida como la Red Global de Monitoreo del Campo Magnético de la Tierra, que cuenta con estaciones en varios países del mundo. Esta estación tiene los estándares de USGS (United States Geological Survey) y sus coordenadas geodésicas son  $18^{\circ}6' N$  de latitud y  $66^{\circ}12' W$  de longitud, que reporta las componentes horizontal, vertical y total del campo a un intervalo de muestreo de 1 minuto, el cual fue normalizado para que coincidiera con el muestreo de las áreas de investigación.

## Resultados y discusión

### Análisis estadístico de datos

Los datos magnéticos y batimétricos, fueron adquiridos en coordenadas geográficas datum WGS84, pero como el análisis estadístico requiere de la distancia en metros, fue necesario realizar la transformación a coordenadas planas UTM, zona 18 norte, datum WGS84.

En las dos zonas se adquirieron 112.993 registros, después de realizar los gráficos descriptivos como: data-posting, histogramas y diagramas de caja que permitieron evidenciar la presencia de atípicos (ya sea por ruido, por cercanía del magnetómetro en los virajes al buque A.R.C "Providencia" u otras causas) y definir áreas simétricas, fueron eliminados 28.302 registros, que representan el 25% del total de los registros magnéticos observados, resultando 84.691 registros (figura 3), con los cuales se realizó la interpolación de información para obtener los mapas.



**Figura 3.** Filtro de datos del levantamiento Pedro Heredia nivel General.

El método de Kriging ordinario, es un método de interpolación que define el valor desconocido como una variable regionalizada, suponiendo que funciones de correlación espacial pueden explicar en su totalidad o parcialmente la variación espacial de ésta, que es la variable estimada a representar a través de funciones homogéneas que se deducen de toda el área de análisis los valores próximos de  $Z$ . Estas funciones homogéneas son derivadas teniendo en cuenta la distancia que existe entre los datos medidos a través de la semivarianza, analizando así la correlación espacial entre ellos en función y estimando la media ponderada.

$$Z_o^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (4)$$

Donde un conjunto de  $n$  datos se sitúan en torno del punto interpolado y  $\lambda_i$  representa los pesos asignados a cada uno de ellos. La ventaja del método es el criterio de asignar a cada valor su valor ponderado junto a la asignación de un valor de error a cada punto interpolado, permitiendo aplicar criterios estadísticos de forma amplia dada una buena definición del área de análisis. Este método supone que la altitud en un punto está determinada por los valores de los puntos más próximos, distribuidos a distancias variables que en función de ellas habrá una mayor o menor inferencia, de acuerdo a Lertxundi [11].

La predicción mediante métodos estadísticos permite generar intervalos y superficies de confianza, haciendo posible obtener información sobre el nivel

de incertidumbre y garantiza la minimización del error medio cuadrático, utilizándose el método de interpolación Kriging según el estudio realizado por Fabra, *et al.* [12].

### Pedro de Heredia General

Una vez determinada la anomalía de cada punto muestreado, para obtener los mapas 2D y 3D (figura 4 y figura 5) de la anomalía de Pedro de Heredia General, se realizó la interpolación de los datos utilizando con un tamaño de celda de 20 m, y se procedió a eliminar las frecuencias altas mediante la continuación analítica hacia arriba, lo que permite definir adecuadamente el comportamiento de los estratos del subsuelo según Gómez, *et al.* [13]. Después de realizar pruebas a 50 m, a 100 m y a 25 m, que garantizaran la calidad de los datos se definió un valor de 25 m, como la altura de continuación que mejor precisó la zona de interés. Los valores obtenidos en el mapa de anomalía magnética se encuentran entre -16 y 62 nT y se identifican dos áreas de interés por sus altos contrastes anómalos, efectivamente una de las áreas corresponde con la localización del naufragio, en la cual se identifican valores de -10 a 56 nT, sin embargo también se identifica otra zona en la cual hay valores entre -16 a 55 nT, que podría ser el indicio de otra fuente anómala. Sin embargo, los mapas de anomalías de campo magnético total no son establecidos en la definición de fuentes, es decir requieren de la realización de un procesamiento a los datos o alguna técnica en especial, para identificarlas con precisión.

### Señal analítica 3D

La técnica de señal analítica 2D para procesamiento de anomalías magnéticas desarrollado por Nabighian, (1972 y 1974) [14] [15], que después fue generalizado por Roest *et al.* [6] para señales 3D, muestra que el valor absoluto de la amplitud, conocida la localización  $(x, y)$  puede ser obtenido a partir de los tres gradientes ortogonales del campo magnético total, como lo muestra la expresión:

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

Donde  $|A(x, y)|$  = amplitud de la señal analítica en  $(x, y)$ ,  $F$  = campo magnético total observado corregido en  $(x, y)$ . De esta expresión se puede ver que la señal

analítica es una medida directa del gradiente total del campo magnético total. Esta ecuación corresponde a una función que depende de la distancia la fuente magnética y la intensidad de magnetización. En otras palabras, por regla general, cuanto más cerca de la fuente, mayor es el campo anómalo y mayor la señal analítica. La anomalía de la señal analítica 2D para un contacto magnético situado en  $(x = 0)$  y a una profundidad  $h$  es descrito por la expresión:

$$|A(x, y)| = \alpha \frac{1}{(h^2 + x^2)^{1/2}} \quad (7)$$

Donde  $\alpha$  = factor de amplitud, que se define como  $\alpha = M \sin d (1 - \cos^2(I) \sin^2(A))$ ,  $h$  = es la profundidad a la parte superior del contacto,  $M$  = es la fuerza de la magnetización,  $d$  = buzamiento del contacto,  $I$  = es la inclinación del vector de magnetización,  $A$  = es la dirección del vector de magnetización. Del mismo modo, se puede demostrar que la señal analítica de la anomalía magnética 2D para una lámina horizontal o dique, puede ser descrita por la expresión:

$$|A(x)| = \alpha \frac{1}{(h^2 + x^2)} \quad (8)$$

La señal analítica de la anomalía en todos los casos es una campana de forma sencilla en la cual todos los términos direccionales están contenidos en el factor de amplitud  $\alpha$ , que es una constante. Por lo tanto, la amplitud de la señal analítica sólo depende de la profundidad, según lo menciona Keating *et al.* [16]. La señal analítica es sensible a los gradientes regionales en los datos y las anomalías que se superponen y en general mejora la definición de la estructura regional y los bordes de las anomalías en una grilla, en especial porque las fuentes anómalas siempre son positivas, de hecho generalmente produce una buena localización horizontal de los contactos y las fuentes geológicas, mencionado en el estudio de Phillips [17].

El mapa de señal analítica 2D y 3D del área general (figura 6 y figura 7), muestra valores en un rango de 0.0677 a 1.1737 nT y es evidente que de las campanas obtenidas, la zona donde se localiza el naufragio, es la que muestra el máximo valor, mientras que las demás áreas de interés mostradas en el Mapa de Anomalía Magnética, no son fuentes anómalas.

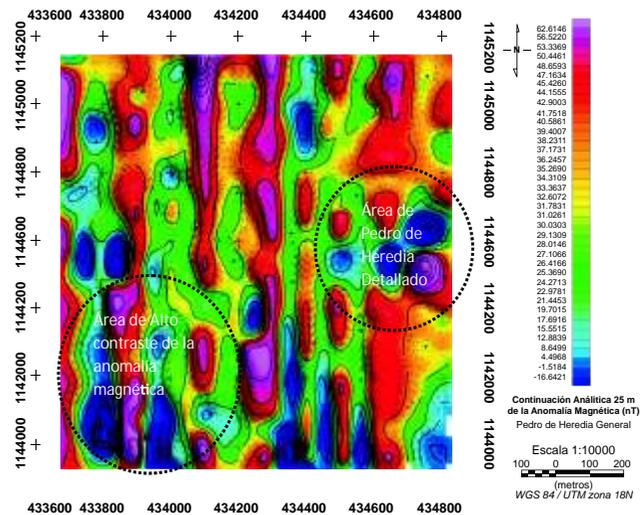


Figura 4. Mapa Anomalía Magnética Pedro de Heredia General.

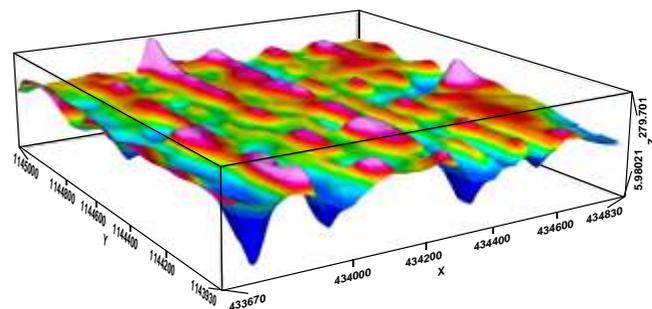


Figura 5. Mapa Anomalía Magnética 3D Pedro de Heredia General.

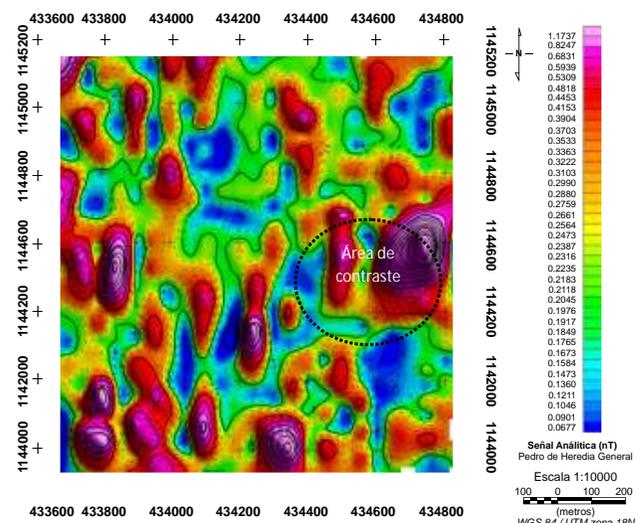


Figura 6. Mapa Señal Analítica Pedro de Heredia General.

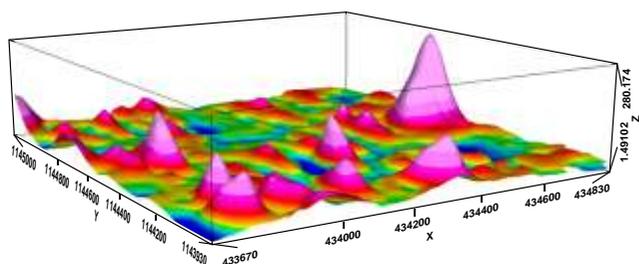
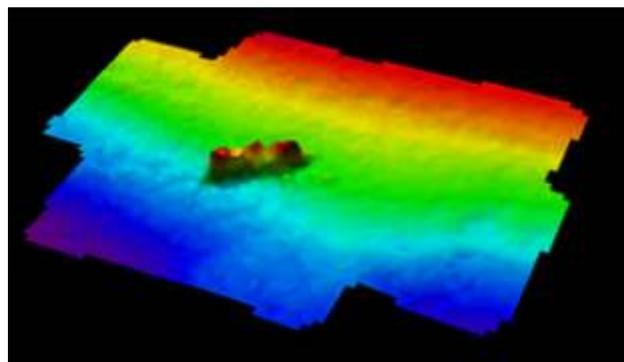
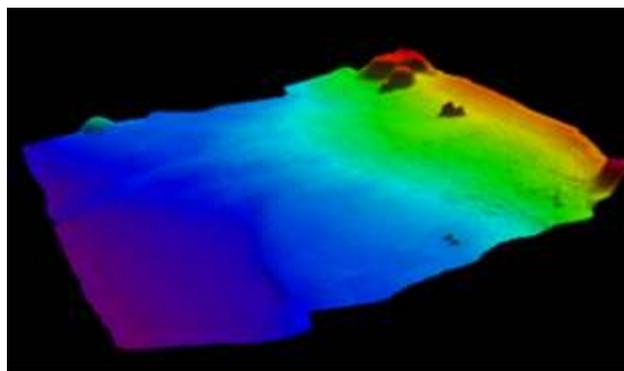


Figura 7. Mapa 3D señal analítica Pedro de Heredia General.

A diferencia de la información batimétrica mediante la cual se observa la existencia de una anomalía en el fondo marino, pero sin identificar si esta corresponde a una geoforma submarina natural o un elemento introducido por el hombre en el ambiente. Con el procesamiento de los datos obtenido a través del magnetómetro marino se puede obtener una mejor aproximación para la identificación de la forma, al contar con una lectura del campo magnético que genera un alto contraste anómalo.



PHD



PHG

Figura 8. Levantamiento batimétrico área de estudio.

### Pedro de Heredia Detallado

Las irregularidades magnéticas ocurren porque en la corteza terrestre hay variaciones del porcentaje de magnetita ( $Fe_3O_4$ ) o porque existen fuentes anómalas de materiales altamente ferrosos como buques, gasoductos, anclas y restos arqueológicos que han sido descubiertos por trabajos magnéticos de este tipo, de acuerdo a lo escrito por Campbell [8]. Sin embargo la detección de los mismos requiere de un adecuado diseño de la geometría de adquisición, que en la mayoría de los casos requiere mejorar la precisión de la grilla de adquisición según los resultados de Wilder-Ramsing, *et al.* [3]. Basados en estos criterios, en el estudio se realizó una la adquisición de datos detallada que buscada entender el comportamiento del campo magnético total, y la respectiva anomalía (1) sobre el naufragio, encontrándose que para la zona de adquisición detallada, en la cual se disminuyó el espaciamiento del interlineado de 50 m a 20 m, se logró obtener para el mapa de anomalía magnética “Pedro de Heredia Detallado 2D y 3D” (figura 9 y figura 10), una variación significativamente mayor a la reportada pasando del rango de -16 a 62 nT al rango de -279 a 465 nT y cuyo forma coincide con la obtenida para un prisma regular enterrado tal como es un buque, según se menciona en Campbell [8], que en este caso 50 m de longitud y 1.000 toneladas de desplazamiento.

De acuerdo a MacLeod, *et al.* [7], la forma de la señal analítica puede ser utilizada para determinar la profundidad de las fuentes magnéticas y de la ecuación (8), se puede deducir para una lámina la siguiente relación  $h = \frac{x_{1/2}}{2}$ , donde  $h$  =es el tope la zona de contacto y  $x_{1/2}$  =es la mitad de la amplitud, con el mapa de señal analítica (figura 9 y figura 11) se determinó un  $x_{1/2} = 25.15$  m promedio, obteniéndose  $h = 12.6$  m, según los datos batimétricos el buque está a 18 m de profundidad, como tiene una altura de 5 m, se concluye que la técnica es muy precisa, no sólo para determinar las fuentes anómalas (que en la gráfica 3D, muestra por la forma de la campana la localización del naufragio), sino para determinar la profundidad.

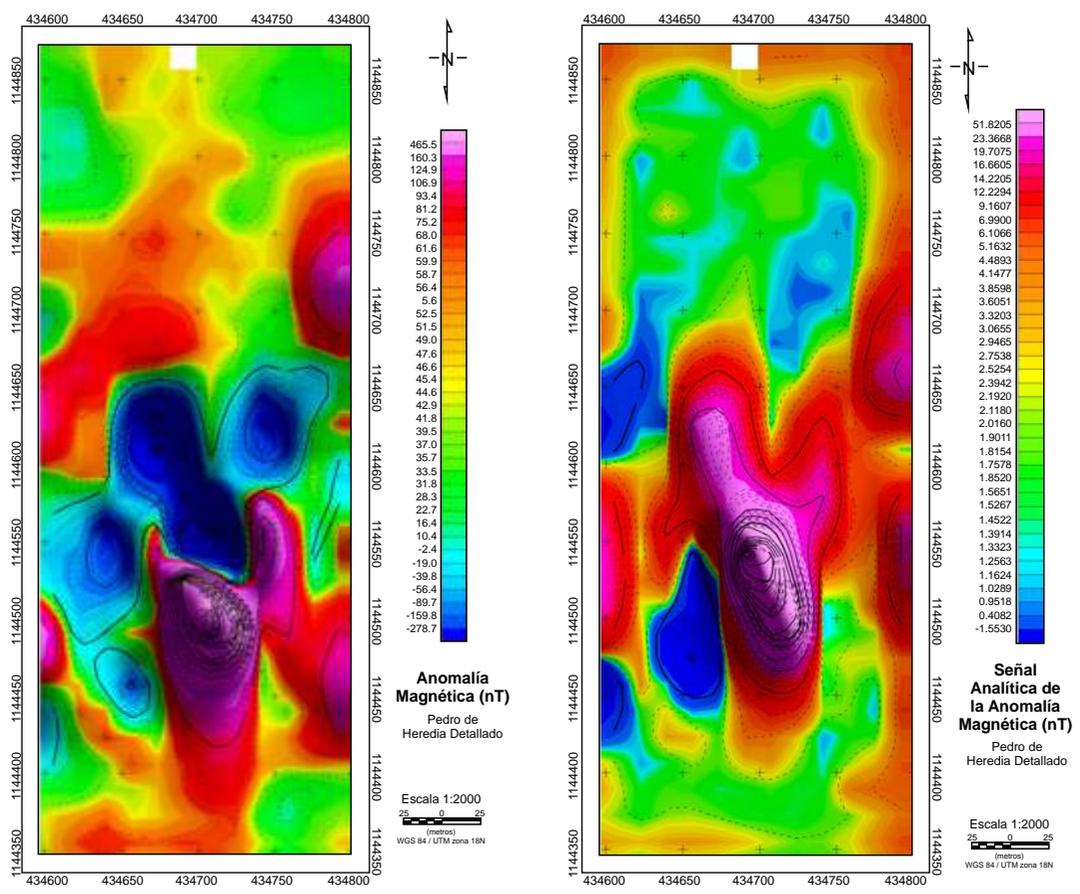


Figura 9. Mapas Anomalia Magnética y Señal Analítica. Pedro de Heredia Detallado.

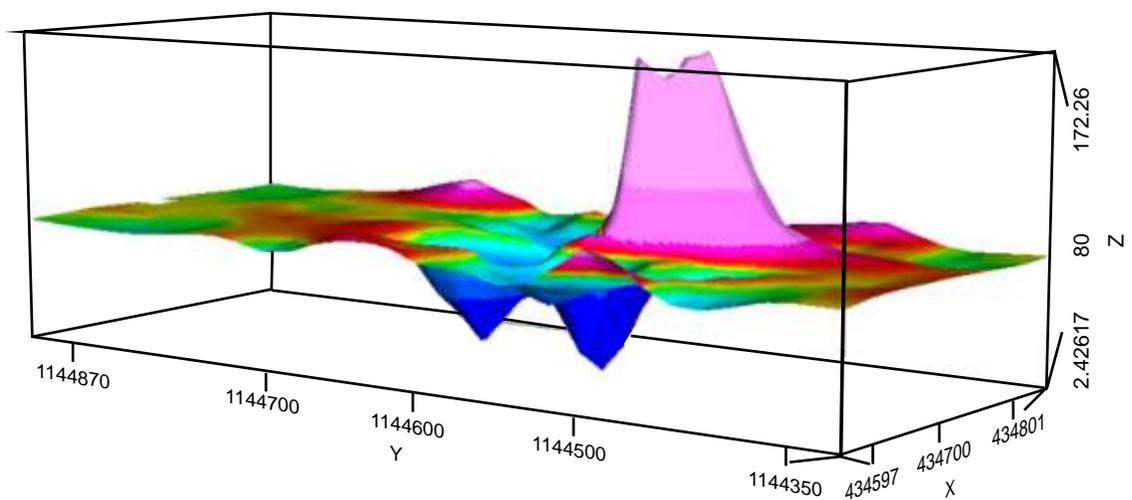
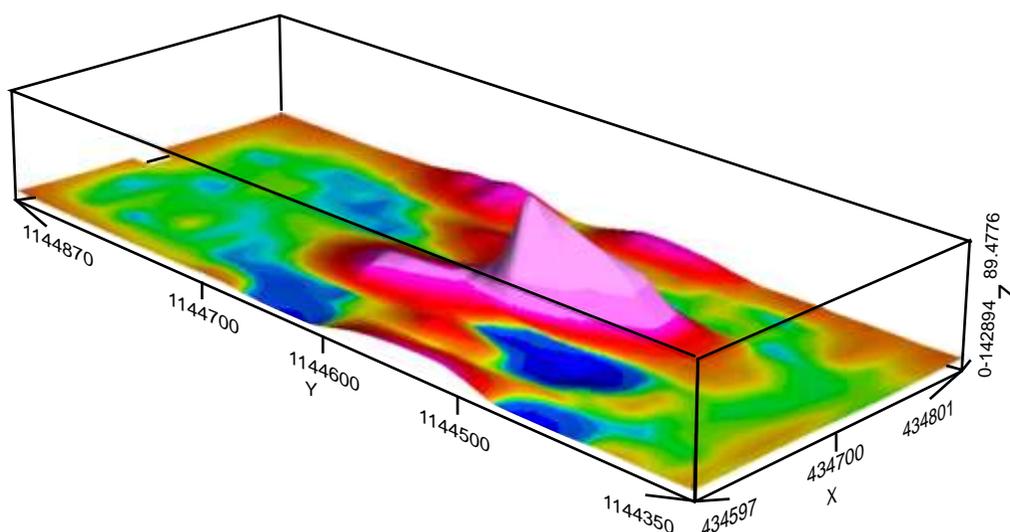


Figura 10. Mapa 3D Anomalia Magnética. Pedro de Heredia Detallado.



**Figura 11.** Mapa 3D Anomalía Magnética. Pedro de Heredia Detallado.

Realizar la interpretación de las anomalías magnéticas es un proceso complicado debido a la naturaleza dipolar del campo magnético, es difícil diferenciar las verdaderas fuentes anómalas de interés según lo menciona MacLeod, *et al.* [7], eso se evidencia en los mapas de anomalías magnéticas obtenidos (figuras 4, 5, 9 y 10). Lo que lleva a utilizar técnicas de procesamiento de datos magnéticos especializadas como la señal analítica que proporciona resultados exactos de los parámetros de magnetización.

Se encontró que el mapa de señal analítica 3D, es preciso en la búsqueda de fuentes anómalas y muestra claramente que la forma de la amplitud de los picos de señal analítica sobre los bordes del modelo se fusionaron, con lo que se puede inferir que áreas de máximos de señal analítica están localizadas en lugares altamente magnéticos. El comportamiento de la señal analítica, es una técnica efectiva en la interpretación de los datos magnéticos, en especial en lo que respecta a la definición de las fuentes magnéticas conocidas o desconocidas.

Por su parte la comparación de las áreas de investigación PHG y PHD, permite comprobar que para la obtención de anomalías magnéticas de naufragios es muy importante la definición adecuada de la geometría de adquisición de los datos, su tasa de muestreo, el procesamiento geoestadístico de los datos y por su puesto la resolución espacial de los

datos, dado que cuando se utilizó un espaciamiento de 50 m, la variación máxima de la anomalía fue de -16 a 62 nT, para el mapa de anomalía magnética, con continuación analítica hacia arriba de 25 m, en cambio cuando se utilizó un espaciamiento de 20 m, entre líneas se encontró que para el área de investigación detallada, se obtuvo un alto contraste de la anomalía llegándose a una variación de -278.7 y 465.5 nT.

Es notable la diferencia percibida en las dos escalas y se concluye que dicha diferencia es producto de la geometría de muestreo, es decir, en el levantamiento de escala general el magnetómetro no pasó por las zonas de mayor susceptibilidad magnética por los materiales ferrosos del naufragio Ex A.R.C “Pedro de Heredia”, mientras que en la densificación de dicho muestreo si pasó, notándose en la mayor variación del campo magnético. De esta manera y con más levantamientos se puede generar un modelo estándar del comportamiento de las anomalías magnéticas de los naufragios, que se utilizará como una información muy valiosa para futuros proyectos de investigación.

## Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Dirección General Marítima y a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su valioso apoyo y colaboración en el desarrollo del proyecto

“Metodología de Adquisición y Procesamiento de Datos Geomagnéticos Marinos”, y a Diana Rodríguez, geofísica de la Universidad Nacional.

## Referencias bibliográficas

[1] Briceño L A, Rey C, Hernandez O, Zamora J.A, New Magnetic Anomalies Map of Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 2008; 12:7-12.

[2] Larson T, Norris T. Champaign Magnetometer survey for buried steamboats near the mouth of the missouri river. *Illinois State Geological Survey, IL US and Army Corps of Engineers*, [online] 2007. Disponible en internet: URL <http://www.xcdtech.com/SAGEEP08/pdfs/69.pdf>.

[3] Wilde-Ramsing M, Arqueological Investigations at the Queen Anne's Revenge Shipwreck Site. Research report and bulletin series QAR-R-09-03. Underwater Archaeology Branch. Office of State Archaeology. Department of Cultural Resources State of North Carolina. [online] 2009. Disponible en internet URL: <http://www.qaronline.org/techSeries/QAR-R-09-03.pdf>.

[4] Boyce J, Reinhardt E, Raban A, Pozza M. Marine Magnetic Survey of a Submerged Roman Harbour. *The International Journal of Nautical Archaeology*. 2004; 33.1: 122–136.

[5] Nabighian, M N, Toward the three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations *J. Geophysics*, 1984; 53: 957-966.

[6] Roest, W E, Verhoef, J, Pilkington M. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *J. Geophysics*, 1992; 57: 116-125.

[7] MacLeod I, Jones K, Dai T. 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*. 1993; 24: 679-688.

[8] Campbell W H. *Introduction to Geomagnetic Fields*, England: Cambridge University Press; 2003.

[9] Rodríguez D M. Modelo de la Falla de Soapaga a partir de la Correlación Espectral de Campos Potenciales. Tesis Maestría en Ciencias – Geofísica. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia; 2008.

[10] Manda M and Macmillan S. International Geomagnetic Reference Field—the eighth generation. *Earth Planets Space*., 2000; 52: 1119–1124.

[11] Lertxundi A. Métodos de Estadística Espacial para evaluar la Influencia de Factores Medio Ambientales sobre la Incidencia y Mortalidad por Cáncer. Tesis, Universidad de Girona. Girona, España; 2006. Disponible en internet: URL [http://www.tdr.cesca.es/TESIS\\_UdG/AVAILABLE/TDX-0313107-114758/talm.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UdG/AVAILABLE/TDX-0313107-114758/talm.pdf).

[12] Fabra Camacho L M, Tellez Moncada S A. Determinación de la Anomalia Magnética Marina para una zona piloto de estudio en

el Caribe colombiano. Trabajo de Ingeniería Catastral y Geodesia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia; 2009.

[13] Gómez F & Sandoval J. Estudio Geofísico Integrado en la Zona Yumare - Aroa, Estados Yaracuy y Falcón. Trabajo de Grado de Ingeniería Geofísica, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela; 2008.

[14] Nabighian, M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal crosssection: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *J. Geophysics*, 1972; 37: 507-517.

[15] Nabighian, M N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section, *J. Geophysics*, 1974; 39:85-92.

[16] Keating P, Sailhac P. Use of the analytic signal to identify magnetic anomalies due to kimberlite pipes. *J. Geophysics*, 2004; 69: 180–190.

[17] Phillips D J. Locating magnetic contacts: a comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. [online] 2000. Disponible en internet: URL [ftp://ftpext.usgs.gov/pub/cr/co/denver/musette/pub/outside\\_pubs/jeff/Phillips\\_SEG2000.pdf](ftp://ftpext.usgs.gov/pub/cr/co/denver/musette/pub/outside_pubs/jeff/Phillips_SEG2000.pdf).