

Artículo de Investigación

MODELOS DIGITALES BATIMÉTRICOS GENERADOS POR MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN IDW, KRIGING, SHEPARD Y B-SPLINE EN EL ARCHIPIÉLAGO DE ISLAS DEL ROSARIO

Bathymetric digital models generated by interpolation methods IDW, Kriging, Shepard and B-Spline in the archipelago of Rosario islands

Denisse Scarly Álvarez Osorio^{1}, Jhon Camilo Matiz León^{2†} y Andrés Cárdenas Contreras^{3‡}*

¹ Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), ² Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC),

³ Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”

\Correspondencia: * skarly.alvarez@gmail.com † ing.camilo.matiz@gmail.com ‡ acardenas@udistrital.edu.co

Recibido: 29 de julio de 2011 Aceptado: 21 de septiembre de 2011

Resumen

La Armada Nacional, en su buque ARC Providencia, cuenta con el magnetómetro G-882, con el cual se obtuvieron los datos de profundidad del lecho marino de la falla Rocha inferida en islas del Rosario, puntos que fueron representados por métodos de interpolación geoestadísticos como el IDW, Kriging, Shepard y B-Spline, que generaron los modelos digitales batimétricos correspondientes, basados en las correcciones asociadas a las mareas y alturas elipsoidales. Partiendo de ello, se evaluó que el fondo marino no influye de una forma sustancial en la bondad de ajuste del modelo generado, de ahí que fue preciso identificar los diversos cambios del relieve submarino para escoger los datos necesarios en la representación del modelo batimétrico y así realizar la selección del mejor método a través de la evaluación y comparación del error medio cuadrático (EMC), y evaluar la calidad del modelo, a través de los criterios de calidad de validación cruzada, la exactitud altimétrica y la incertidumbre total vertical.

El resultado del estudio permitió establecer la confiabilidad del magnetómetro G-882, como herramienta admisible para representar las profundidades marinas.

Palabras clave: batimetría, exactitud altimétrica, geoestadística, incertidumbre total vertical, métodos de interpolación, validación cruzada.

Abstract

The National navy's ship providence ARC has the G-882 magnetometer, from which extracted data from the seafloor depth of the fault inferred Rocha Rosario islands, points were represented by geostatistical interpolation methods such as IDW, Kriging, Shepard and B-Spline that generated the corresponding Bathymetric Digital Models based on the corrections associated with the tides and ellipsoidal heights. On this basis, it was assessed that the seafloor is not a substantial influence on the goodness of fit of the model generated, hence it was necessary to identify the various changes of undersea to choose the necessary data on the bathymetric model representation and so the selection of the best method through the assessment and comparison of Root Mean Squared (EMC), the criteria of quality and cross validation, accuracy and uncertainty total altimeter vertical.

The result of the study allowed to establish the reliability of G-882 magnetometer as a tool to represent the allowable depths.

Key words: Bathymetry, altimetry accuracy, geostatistics, vertical total uncertainty, interpolation methods, cross-validation.

Introducción

Los levantamientos hidrográficos han experimentando cambios fundamentales en la obtención de la información debido al avance tecnológico en los sistemas de medición, como por ejemplo los sistemas multihaz acústicos y láser aerotransportados, que proporcionan cobertura y medición casi total del fondo marino, en comparación con muestreos hechos por perfiles batimétricos. Así, la selección de datos se encuentra condicionada directamente a la distribución y densidad de los mismos, los cuales son tomados a través de las sondas monohaz, multihaz y sondas de barrido lateral, estas últimas se usan para definir áreas que requieren más detalle y exactitud, representando en los levantamientos batimétricos la obtención del posicionamiento vertical (Z) y el posicionamiento horizontal (X,Y) a través del Global Positioning System (GPS), que es realizado *in situ* y de forma concreta para cada punto, estando el modelo limitado por su escala y software empleado, donde el resultado del modelo digital batimétrico (MDB) para la misma área puede variar según los parámetros de control seleccionados que permitan establecer el cálculo del error entre el modelo generado y la superficie real.

En el procesamiento de datos de la profundidad del mar se deben tener en cuenta las correcciones por mareas y alturas elipsoidales que afectan el posicionamiento vertical y horizontal de las muestras obtenidas, para una posterior representación espacial. Para la interpolación de este tipo de datos que contienen el atributo altitud se implementaron los métodos convencionales geoestadísticos IDW, Kriging, Shepard y B-Spline, aplicando el error medio cuadrático y criterios de calidad como la validación cruzada, la exactitud altimétrica y la incertidumbre total vertical en la generación y selección del mejor MDB, el cual fue interpolado por el método B-Spline, arrojando una representación de la superficie del lecho marino más “fiel” a la realidad.

Batimetría

La batimetría se define como el “estudio de las profundidades oceánicas, lacustres y corrientes de agua continuas como ríos, mediante el trazado de mapas de isóbatas” (Real Academia de la Lengua Española, 2001); sin embargo, algunos autores la definen como ciencia y otros como una técnica de medición que facilita la obtención de valores de profundidad del agua, ya sea marina, lacustre o fluvial, determinando la topografía del fondo subacuático.

La batimetría requiere la elección de un sistema de referencia que precise y defina la ubicación de un punto en el plano x, y, z (Martínez y Sánchez, 2005), donde de la verdadera cota del punto levantado se determina a partir diferentes correcciones que permiten reducir los sondeos al datum o cota de referencia.

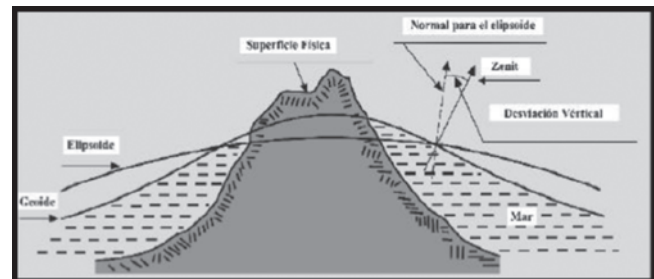


Figura 1. Superficies de referencia en alusión al mar

Fuente: OIH (2005).

Los levantamientos batimétricos se diferencian de los terrestres porque los primeros no cuentan con una estabilidad para los instrumentos durante la observación, ni tampoco para estacionar una y otra vez en un determinado punto debido al movimiento de la masa de agua. Por esta razón, el avance de la tecnología en las metodologías, técnicas e instrumentos para la determinación de la profundidad del lecho marino han facilitado que las mediciones sean más precisas y fundamentales para el desarrollo de estudios batimétricos.

En la actualidad se cuenta con los sistemas de haz simple provenientes de los sonares militares, que se han venido desarrollando hasta los sistemas acústicos multihaz (MBES) y los sistemas láser aerotransportados (ALS), que proporcionan una mayor precisión en la medición de la profundidad y una cobertura total del fondo marino. Estos avances han proporcionado una calidad de datos aceptable para la representación de los MDB, siendo la ecosonda multihaz la herramienta insignia del país para la toma de datos batimétricos y el magnetómetro G-882 (Geometrics, 2005) el instrumento ideal para la toma de datos del campo magnético terrestre, dado que posee un altímetro en su sensor, el cual registra la profundidad del lecho marino, instrumentos utilizados para este proyecto.

Correcciones de cota

El término *marea* se conoce como el cambio periódico y alternativo de ascenso y descenso que posee el nivel del agua producido por distintos fenómenos tales como fuerzas gravitacionales, presión atmosférica o efectos locales en los niveles de agua los cuales, dependiendo de si hay una acción acumulativa de fuerzas, se produce una *pleamar* o *marea alta* o, por el contrario, cuando existe un alejamiento compensando de las aguas, se produce lo que se conoce como *bajamar* o *marea baja*.

El datum de nivel de agua es un plano local de elevación que se aplica solamente en el área específica donde se han hecho las mediciones de nivel del agua. Bien sea de marea o no debido a esta, es permanentemente referido a la tierra al nivelar el medidor del nivel de agua a una red local de marcas de nivelación (OHI 2005).

Teniendo en cuenta lo anterior, y debido a que no existe estabilidad en la masa acuática que permita determinar fácilmente la verdadera cota de la superficie subacuática, se hace imprescindible realizar correcciones como la de mareas o la de alturas, que tienen por objeto establecer una corrección, la cual se aplica a los datos de profundidad y con ello se obtiene el valor real de la misma.

Modelo digital batimétrico (MDB)

Un modelo es considerado como una abstracción aproximada que busca la simplicidad de la realidad y se establece mediante la aplicación de unos supuestos, los cuales determinan qué tipo de propiedades son relevantes (Felicísimo-Pérez, 1994), que en el caso de los MDB es la profundidad. Esta variable continua, y distribuida espacialmente mediante un conjunto de datos, es la distancia que se encuentra entre el nivel medio del mar y el fondo acuático, que permite establecer la topografía de las profundidades marinas.

Este tipo de modelos se describen como una función bi-variable continua $P = f(x, y)$, donde P es la profundidad en un punto de coordenadas (x, y) .

Métodos de predicción espacial

Los métodos de predicción espacial se fundamentan en el procedimiento que permite calcular el valor de una variable y su posición a partir de valores muestreados de la misma

variable en otras posiciones del espacio, a través de algoritmos matemáticos que facilitan el cálculo de los mismos. En el presente estudio se trabajaron como métodos de predicción espacial los métodos IDW, Kriging, Shepard y el B-Spline, con el objeto de predecir áreas sin información.

Método ponderación de la distancia inversa (IDW)

El IDW se fundamenta en asignar pesos a los datos muestreados que van a ser interpolados para determinar el dato central en función inversa a la distancia que los separa (Giraldo-Henao, 2003). La fórmula general es:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i \quad (1)$$

Donde \hat{Z}_j es el valor estimado para el punto j , n , el número de puntos necesarios para la interpolación, z_j el valor en el punto i -ésimo y k_j el peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j . Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato y la suma total de ellos es la unidad.

La función de proporcionalidad entre el peso y la distancia se muestra en la siguiente fórmula:

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_i \frac{z_i}{d_{ij}^p}}{\sum_i \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (2)$$

Siendo la fórmula del peso $k_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^p}$ y un exponente de ponderación que controla la forma en la que el peso asignado al dato disminuye con la distancia, es decir, que si el exponente o la potencia van disminuyendo los pesos asignados serán menores, por el contrario, si la potencia aumenta la diferencia en los pesos será mayor (Droj, 2008).

Método Kriging

Este método de interpolación define la altitud como una variable regionalizada, suponiendo que funciones de correlación espacial pueden explicar en su totalidad o parcialmente la variación espacial de esta, que es la variable estimada que se va a representar a través de funciones homogéneas que se deducen de toda el área de análisis, es decir, los valores próximos de Z (Giraldo-Henao, 2003).

Estas funciones homogéneas son derivadas teniendo en cuenta la distancia d que existe entre los datos medidos

a través de la semivarianza, analizando así la correlación espacial entre ellos en función de d y estimando una media ponderada:

$$\hat{Z}_{x,y} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot z_i \quad (3)$$

Donde un conjunto de k datos se sitúan en torno del punto interpolado y λ representa los pesos asignados a cada uno de ellos. La ventaja del método es el criterio de asignar a cada dato su valor ponderado junto a la asignación de un valor de error a cada punto interpolado, lo que permite aplicar criterios estadísticos brindando una buena definición del área de análisis.

Los supuestos estimados en este tipo de métodos suponen que la altitud en un punto esté determinada por los valores de los puntos más próximos distribuidos a distancias variables, y que en función de ellas habrá una mayor o menor inferencia.

Método Shepard

El método de Shepard utiliza el método de distancia inversa a través de mínimos cuadrados ponderados, dado que su uso elimina o reduce el “ojo de buey”, que son contornos generados dentro del modelo. La ecuación utilizada en este método es la siguiente:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i \quad (4)$$

Donde \hat{Z}_j es el valor estimado para el punto j , n el número de puntos necesarios para la interpolación, Z_i el valor en el punto i -ésimo, y k_{ij} el peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j . La ecuación del peso es:

$$k_{ij} = \frac{h_{ij}^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_{ij}^{-p}} \quad (5)$$

Donde P es un número real positivo arbitrario, llamado el exponente de ponderación, que controla la forma en la que el peso asignado al dato disminuye con la distancia, donde generalmente se deja el 2 como valor predeterminado, aunque este puede ser modificado; h_{ij} es la distancia desde el punto de dispersión hasta el punto de interpolación,

donde la suma de pesos sea igual a la unidad (Gordon y Wixon, 1978).

$$h_i = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (6)$$

Aunque la función de peso arriba indicada es la forma clásica de la función de peso en la interpolación de la distancia inversa ponderada, a partir de ella se deduce la siguiente ecuación:

$$k_{ij} = \frac{\left[\frac{R - h_{ij}}{Rh_i} \right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R - h_{ij}}{Rh_i} \right]^2} \quad (7)$$

Donde h_{ij} es la distancia desde el punto de interpolación para esparcir el punto interpolado, R es la distancia desde el punto de interpolación hasta el punto de dispersión más distante, y n es el número total de puntos de dispersión. Esta ecuación se ha encontrado para dar resultados superiores a la ecuación clásica.

En tres dimensiones (x, y, z) el método de las ecuaciones de Shepard es idéntico a las ecuaciones en dos dimensiones (x, y), solo que se le adiciona la coordenada z , la cual es la *variable altura* (h) por interpolar, y se calcula de la siguiente forma:

$$h_i = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2} \quad (8)$$

Donde (x, y, z) son las coordenadas del punto de interpolación y (x_j, y_j, z_j) son las coordenadas de cada punto de dispersión.

Método B-Spline

Al ingresar un conjunto de datos dispersos al algoritmo, el método arroja como resultado un tensor producto de las superficies B-Spline, siendo estos algoritmos los *esquemas básicos B-Spline*.

Los algoritmos de una aproximación B-Spline (BS – por sus siglas en inglés) generan una compensación existente entre la “forma” suavizada y la precisión de la función de aproximación. Para superar dicha compensación, los algoritmos de aproximación multinivel B-Spline (MBA – por sus siglas en inglés) son introducidos en la ejecución del método (Lee *et al.*, 1997). El algoritmo hace uso de una

jerarquía de control de *latices* para generar una secuencia de funciones f_i y la función final de aproximación f , que es definida como la suma de las funciones f_i .

$$f = \sum_{i=1}^k f_i \quad (9)$$

Para optimizar este proceso, el *refinamiento B-Spline* es usado para reducir la suma de estas funciones dentro de una función B-Spline equivalente. El algoritmo MBA sirve de resultado como una aproximación inicial suave $f_0 \rightarrow \Delta^0 P = P$ definido en el control latice menos “refinado” $\Phi_0 = \Phi$, aplicando el algoritmo MBA. Para continuar hacia el nivel más “fino”, la primera aproximación posible deja grandes discrepancias en los puntos (datos) en P, en particular f_0 deja una desviación:

$$\Delta^1 z_i = z_i - f_0(x_i, y_i) \quad (10)$$

El siguiente control latice más fino F_1 , el que se utiliza para obtener la función f_1 aproxima las diferencias a $\Delta^1 P = \{(x_i, y_i, \Delta^1 z_i)\}$.

Entonces, la suma de $f_0 + f_1$ produce una menor desviación para cada (x_i, y_i) en

$$D^2 z_i = z_i - f_0(x_i, y_i) + f_1(x_i, y_i) \text{ para } 0, \dots, n. \quad (11)$$

En general, para cada nivel k en la jerarquía, el punto de ajuste $\Delta^k P = \{(x_i, y_i, \Delta^k z_i)\}$ es aproximado por una función f_k definida sobre el control de latices F_k , donde:

$$\Delta^k z_i = z_i - \sum_{j=0}^{k-1} f_j(x_i, y_i) = \Delta^{k-1} z_i - f_{k-1}(x_i, y_i) \quad (12)$$

Y $D^k z_i = z_i$. Este proceso empieza desde el latice menos refinado f_0 y continúa incrementalmente hacia el latice más fino f_k , con el conjunto de vectores nodos son definidos por las siguientes ecuaciones:

$$T_x = \left\{ -d \frac{h_x}{2^k}, \dots, 0, \frac{h_x}{2^k}, \dots, 2^k n_x \frac{h_x}{2^k}, (2^k n_x + d) \frac{h_x}{2^k} \right\} \quad (13)$$

$$T_y = \left\{ -d \frac{h_y}{2^k}, \dots, 0, \frac{h_y}{2^k}, \dots, 2^k n_y \frac{h_y}{2^k}, (2^k n_y + d) \frac{h_y}{2^k} \right\} \quad (14)$$

La función final de aproximación f es definida como la suma de las funciones. Debido al sistema de jerarquías que maneja el método B-Spline para generar las funciones más aproximadas a la función de ajuste de la superficie, se

obtiene una aproximación desde la curva de interpolación B-Spline más “rugosa y dura” para representar la superficie hasta la más fina de las funciones de interpolación para representar la suavidad de la misma. Mientras la jerarquía avanza de nivel, el control latice aplicado por cada multinivel, suaviza e interpola el conjunto de puntos que componen la superficie generando una representación aproximada de la realidad. En los modelos digitales batimétricos, el algoritmo se comporta de tal manera que cada ajuste $D^k z_i$ que se realiza a cada punto interpolado, permite que dicho control aplicado a la distancia entre datos sea lo suficientemente pequeño con relación a la distribución de los datos, debido a que cada nivel jerárquicamente posicionado “suaviza” o “robustece” cada red de datos interpolada por el método B-Spline (Lee *et al.* 2005).

Metodología

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona continental del norte de Colombia (Zona UTM 18 norte), departamento de Bolívar, Cartagena, ubicada en el archipiélago de Islas del Rosario, en el sector cercano a Punta Gigante, sobre la Falla Rocha inferida, entre las coordenadas 10°06'30" N y 10°16'30" N de latitud y 75°52'00" W 75°38'00" W de longitud, la cual cubre una área de 5 km² de lecho marino.



Figura 2. Zona piloto específica Falla Arroch

Fuente: OIH 2008

Adquisición de los datos

La adquisición de la información comienza bajo el proyecto de investigación denominado “Metodología de adquisición

y procesamiento de datos geomagnéticos marinos”, en un convenio interadministrativo entre el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional y la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, que permitió adquirir los datos con el magnetómetro G-882, sobre la plataforma ARC providencia, buque que posee la infraestructura para realizar este tipo de tareas científico-marinas.

El magnetómetro G-882, equipo diseñado para detectar anomalías del campo magnético (generadas por cuerpos que posean material de hierro), recibe los datos geográficos con el GPS doble frecuencia que posee el buque para detectar en tiempo real la medición en posición. Los datos tomados por el magnetómetro son enviados a través de un cable a una botella telemétrica garantizando que la información sea grabada en tiempo real; la información se envía a un módem para que la codifique y luego la grabe en un computador para su posterior procesamiento e interpretación, mediante el software MagLog Magnetometer Logging (Geometrics, 2005).

De la información adquirida se seleccionaron como atributos primordiales para generar las correcciones y los modelos batimétricos la longitud, latitud, fecha, hora, profundidad (profundidad del magnetómetro, medida desde el winche que lo sostiene hasta el magnetómetro), altura (altura del magnetómetro con respecto al lecho marino) y altura GPS (altura medida GPS, conocida como la altura elipsoidal h del punto capturado por el magnetómetro).

Tratamiento de los datos

El magnetómetro G-882 tomó inicialmente 174.830 puntos; al ser evaluados con estadística descriptiva se percibió la presencia de datos atípicos que infirieron directamente en la normalidad de la variable. La desviación estándar dio como resultado 99,5, la varianza 9901,62, una Kurtosis de 29595,6, el dato mínimo fue de -47,0 m y el máximo alcanza aproximadamente 25,4, corroborando este último que fueron datos arrojados por el sensor como un error del mismo en la medición.

Al proceder con la eliminación de los atípicos se suprimieron aquellos datos no representativos para el área de estudio, pues el terreno se caracterizó por poseer una tendencia plana, excepto en dos áreas que hacen que los datos con menor profundidad sean considerados como atípicos, lo

que implica una cuidadosa eliminación de los mismos. Al ser evaluada nuevamente la tabla de datos sin los atípicos, mediante estadística descriptiva, la distribución no fue normal; sin embargo, fue esta base de datos la que se utilizó para el proyecto, que incluyó un total de 171.854 datos (figura 3).

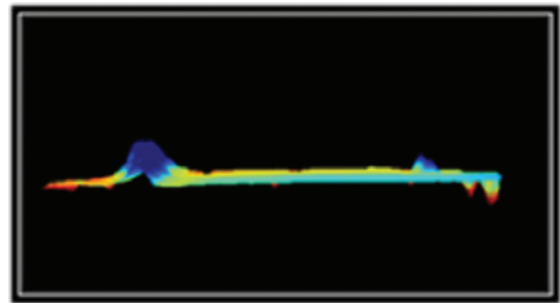


Figura 3. Modelo general sin atípicos en 3D

De este modo, se generaron los diferentes modelos con los 171.854 datos, a través de diversos métodos de interpolación, sin embargo, al ser la base de datos tan grande, se decidió trabajar al tiempo con una de 17.181 datos, es decir, casi el 10% de los datos originales, con el objetivo de percibir si existiría algún mejoramiento o empeoramiento en el resultado de los métodos de interpolación.

Para el estudio se aplicaron las correcciones tanto de mareas y de alturas a los datos de profundidad, con el objeto de verificar cuáles diferencias se podrían establecer entre las mismas y así discernir qué corrección fue mejor o más aceptable para nuestro caso de estudio. En consecuencia, los datos resultantes de cada corrección fueron la base para aplicar los métodos de interpolación como los IDW, Kriging, Shapard y B-Spline, que permitieron generar los modelos correspondientes y establecer la particularidades o semejanzas de los mismos.

Resultados

Evaluación de la calidad del MDB La calidad constituye la aptitud de uso de un producto o la utilidad del mismo para satisfacer una necesidad (Corrales y Martínez 2000), la cual está medida por la diferencia entre los datos existentes y los verdaderos, a esto se le conoce como error.

A fin de evaluar la exactitud vertical, esta se hace por separado para establecer elevaciones precisas; esta situación se torna

un poco más complicada para verificar la batimetría de un área debido a su naturaleza por la dificultad para gestionar un levantamiento evaluatorio y sus costos. De manera que la forma como se evaluó los MDB, fue con los 1500 datos tomados por la ecosonda multihaz que fueron adquiridos simultáneamente con los datos magnéticos en campo. Además, se utilizaron los criterios de validación cruzada, evaluación de la exactitud altimétrica e incertidumbre total vertical (TVU).

Validación cruzada. Al generar los diferentes modelos digitales batimétricos por los métodos de interpolación, más

adelante descritos, con la base de datos final, se determinó el mejor modelo de cada método a partir del *coeficiente de determinación* (R^2) o *validación cruzada*, que permite evaluar la correlación de cada modelo con el fenómeno, a través de la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{SCM}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (15)$$

Como resultado de este parámetro, en las tablas 1 y 2 se relacionan los modelos por correcciones de marea y altura, donde el mejor modelo por corrección de marea fue el IDW con un $R^2 = 86,81$, y por corrección de alturas fue el B-Spline con un $R^2 = 86,40$.

Tabla 1. Varianzas y coeficiente de determinación de los métodos de interpolación, por corrección de mareas.

Método	No. de datos	Varianza datos medidos	Varianza datos predichos	r2
IDW	17,18	54,88	49,98	86,81
KRIGING ORDINARIO	17,18	54,88	48,07	89,19
KRIGING UNIVERSAL	171,82	54,88	50,01	89,09
SHEPARD	17,18	54,88	2508645936,84	0,01
B-SPLINE	17,18	54,88	48,92	89,43

Fuente: cálculos de los autores

Tabla 2. Varianzas y coeficiente de determinación de los métodos de interpolación, por corrección de alturas.

Método	No. de datos	Varianza datos medidos	Varianza datos predichos	R2
IDW	17,181	54,84	49,98	86,29
KRIGING ORDINARIO	17,181	54,84	48,01	89,18
KRIGING UNIVERSAL	17,181	54,84	50,32	89,39
SHEPARD	17.181	54,84	1327644,51	00.00
B-SPLINE	17,181	54,84	48,88	89.40

Fuente: cálculos de los autores

Evaluación de la exactitud altimétrica. En busca del mejor modelo que represente el fondo marino fue necesario comparar la diferencia de la información del modelo interpolado con el de la ecosonda, el cual fue considerado como el modelo que representaba la realidad de la batimetría del lecho marino del área de estudio; de manera que a partir del error medio cuadrático (EMC) se evaluó la precisión de los mismos, dado que este caracteriza las propiedades espaciales como la rugosidad, característica fundamental en los modelos digitales de terreno y, en este caso, de los MMDB; el EMC se describe según la siguiente fórmula.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z)}{n} \quad (16)$$

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z)^2}{n}} \quad (17)$$

Donde z_i es la profundidad estimada por los métodos de interpolación y z es la profundidad ya determinada.

Posteriormente, se realizó un análisis de los $EMCZ_b$ para determinar si los mapas batimétricos finales cumplían con los requisitos mínimos de exactitud altimétrica según los estándares del IGAC, mediante la siguiente relación:

$$EMC_{\text{maximo para la exactitud altimetrica IGAC}} = 0,3 * \text{Intervalo de curva} \quad (18)$$

Para la escala de los productos finales (escala 1:20.000) las curvas de nivel y batimétricas se definieron cada 20 metros, para el caso de estudio, quedando un $EMC_{\text{max}} = 6,0$ m.

En las tablas 3 y 4 se muestran los resultados de la exactitud altimétrica para cada uno de los modelos con su respectiva corrección, en donde se establece que para las dos correcciones el método Shepard es el único que no cumple con el parámetro de la exactitud altimétrica.

Tabla 3. Relación de los $EMCZ_{\text{MDB}}$ de cada MDB frente al estándar de exactitud altimétrica para la corrección de mareas

MDB	EMC_{max}	$EMCZ_{\text{MDB}}$	Parámetros	Exactitud altimétrica
IDW	6,0 m	3,88	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 10 Ponderado: 2	Sí cumple
OK	6,0 m	3,74	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 10	Sí cumple
UK	6,0 m	4,07	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 10	Sí cumple
Shepard	6,0 m	8,40	Datos: muestra del 10% Vecinos cuadráticos: 30 Vecinos de peso: 20	No cumple
B-Spline	6,0 m	3,68	Datos: muestra del 10% Nivel: 11 Threshold Error: 0,0001	Sí cumple

Fuente: cálculos de los autores

Tabla 4. Relación de los EMCZMDB de cada MDB frente al estándar de exactitud altimétrica para la corrección por alturas

MDB	EMC _{max}	EMCZ _{MDB}	Parámetros	Exactitud altimétrica
IDW	6,0 m	2,742028556	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 8 Ponderado: 2	Sí cumple
OK	6,0 m	2,43633122	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 8	Sí cumple
UK	6,0 m	2,52317182	Datos: muestra del 10% Radio: 100 metros Vecinos: 8	Sí cumple
Shepard	6,0 m	7,40553418	Datos: muestra del 10% Vecinos cuadráticos: 22 Vecinos de peso: 30	No cumple
B-Spline	6,0 m	3,41060476	Datos: muestra del 10% Nivel: 12 Threshold Error: 0,0001	Sí cumple

Fuente: cálculos de los autores

Incertidumbre total vertical (TVU). Este criterio de evaluación se aplica a los datos geográficos adquiridos en campo (datos crudos), los cuales no se encuentran exentos de errores, ya que estos pueden presentarse desde la captura, el procesamiento y la representación de los datos. La Organización Internacional de Hidrografía (OIH) desarrolló como método para clasificar los datos batimétricos las zonas de confianza (ZDC), las cuales identifican varios niveles de confianza, donde se establece que: “la exactitud de la posición y de la profundidad especificada por cada ZDC se refiere a los errores contenidos en la representación final del sondeaje que incluye no solo los errores del levantamiento sino también cualquier otro error introducido en el proceso de producción de la carta” (OIH, 2005). Para nuestro caso la ZDC se clasificó dentro de la categoría A2 (tabla 5).

La incertidumbre vertical se entiende como aquella de las profundidades reducidas, debido a esto se suman todos los errores cometidos en la determinación de la profundidad para conseguir la incertidumbre total vertical (TVU) con

un 95% de confianza, que según la OIH (2005) se expresa de la siguiente manera:

$$\pm \sqrt{a^2 + (b * Z_b)^2} \quad (19)$$

Donde a representa la parte de la incertidumbre que no varía con la profundidad, b es un coeficiente que representa la parte de la incertidumbre que varía con la profundidad Z_b es la profundidad. a y b son constantes determinadas por los estándares de la OIH según el orden del levantamiento.

Para este parámetro los resultados establecieron que el método Shepard es el que menos datos incluye dentro del intervalo mostrado en las tablas, pues en la corrección por mareas el 93% de los datos no se incluyen dentro del intervalo y en la corrección de alturas el porcentaje es del 79% indicando la alta concentración de errores en la interpolación de los valores calculados para la superficie modelada por este método.

Tabla 5. Categoría de la zona de confianza para la zona piloto de estudio

1	2	3	4	5
ZDC	Exactitud de posición	Exactitud de profundidad	Fondo marino	Características de un levantamiento típico
		= 1,00 + 2% d		
		Profundidad (m)	Exactitud (m)	
A2	±20 metros	10 30 100 1.000	±1,2 ±1,6 ±3,0 ±21,0	Levantamiento sistemático y controlado, la exactitud de posición y profundidad es menor a la lograda con el ZDC A1, y se usa una ecosonda moderna y un sistema sonar o de barrido mecánico

Fuente: OHI (2005).

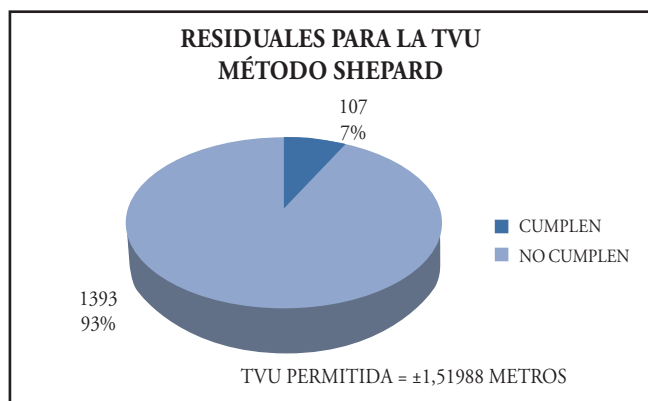


Figura 4. Residuales del método Shepard para la corrección por mareas

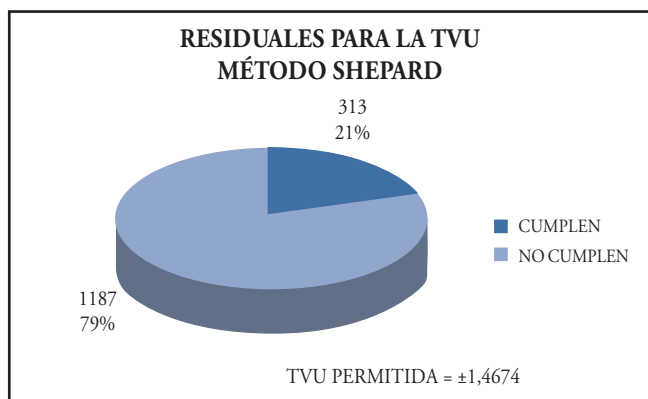


Figura 5. Residuales del método Shepard para la corrección por alturas

Conclusiones

Al evaluar la calidad de los MDB generados por cada método y para cada una de las correcciones tanto por mareas como por alturas, los criterios de la validación cruzada o coeficiente de determinación R^2 , error medio cuadrático (EMC), estándar de calidad mínimo e incertidumbre total vertical (TVU), además de comprobar visualmente la superficie interpolada que más se ajustó a la realidad, establecieron que el método B-Spline cumplió con estos parámetros en las dos correcciones a pesar de la extrapolación que realiza (figuras 6 y 8). Contrario a lo que sucedió con el método Shepard, lo que se ratificó en la interpolación de la superficie de los dos métodos (figuras 7 y 9).

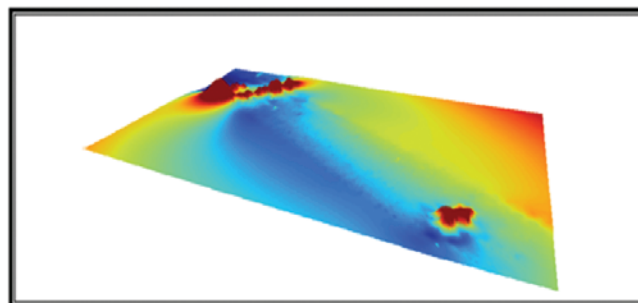


Figura 6. Modelo batimétrico interpolado por el método B-Spline por corrección de alturas

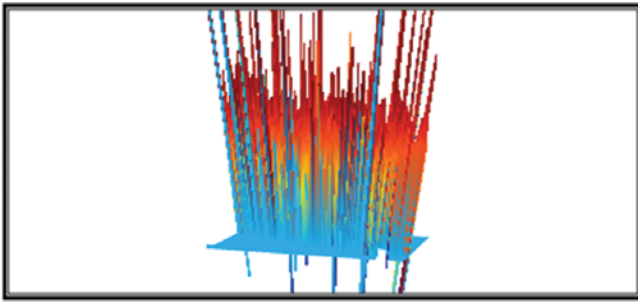


Figura 7. Modelo batimétrico interpolado por el método Shepard por corrección de alturas

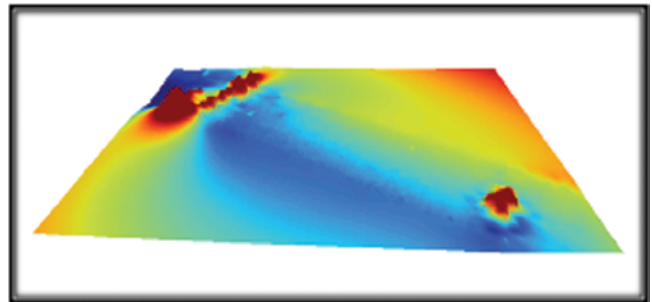


Figura 8. Modelo batimétrico interpolado por el método B-Spline por corrección de mareas

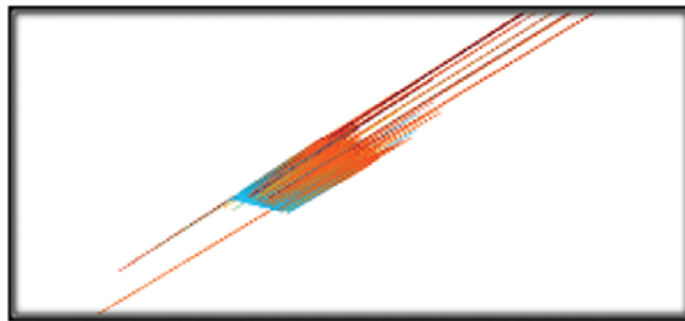


Figura 9. Modelo batimétrico interpolado por el método Shepard por corrección de mareas

Al ser evaluada la base de datos total por cada uno de los métodos se percibió que no había una buena ajustabilidad de la superficie a la realidad, de manera que al tomarse el 10% de la muestra (17.181 datos) para evaluar qué tanto mejoraban los resultados, se observó una clara diferencia en los resultados obtenidos corroborando la influencia que la densidad de puntos ejerce en el requerimiento computacional y estudio de la superficie. Por ello, los métodos en general modelaron de mejor manera la superficie con la muestra más pequeña.

El visualizar el resultado de los modelos generados por el método B-Spline (figuras 6 y 8), IDW (figuras 10 a y d), Kriging Ordinario (figura 10 b y e) y Kriging Universal (figura 10 c y f) por cada corrección nos permitió establecer que los métodos convencionales geoestadísticos se convierten en una poderosa herramienta para la estimación de superficies interpoladas a partir de los datos del magnetómetro G-882 debido a su portabilidad, reducción de costos, fácil accesibilidad e interoperabilidad en el formato de datos capturados y el uso interdisciplinar del sensor para fines diferentes al magnetismo terrestre.

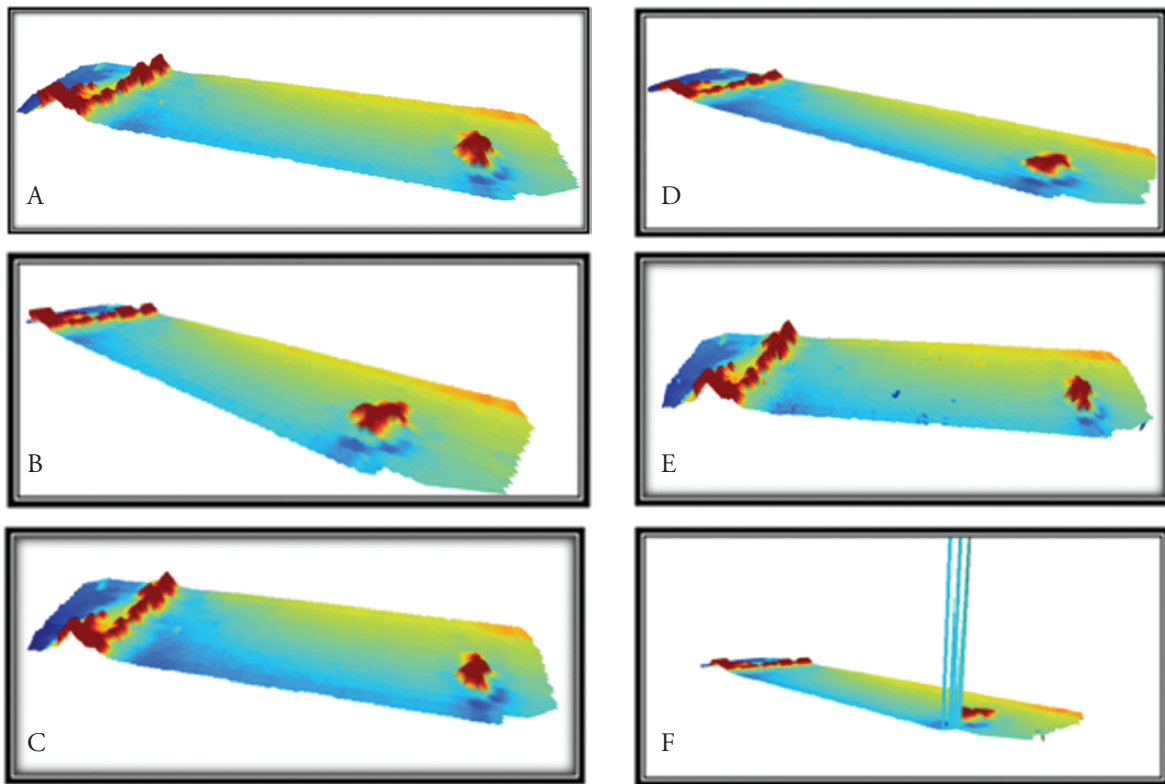


Figura 10. Modelo batimétrico interpolado por diferentes métodos: a) IDW por corrección de mareas; b) Kriging ordinario por corrección de mareas; c) Kriging universal por corrección de mareas; d) IDW por corrección de alturas; e) Kriging ordinario por corrección de alturas; f) Kriging universal por corrección de alturas

Referencias bibliográficas

- Corrales, C. C. y Martínez, S. Á. (2000). *Calidad de datos y propagación de errores en la elaboración de modelos digitales de elevación (propuesta metodológica)*. Bogotá: Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.
- Droj, G. (2008). *Improving the Accuracy of Digital Terrain Models*. Vol. LIII. Babes-Bolyai: Studia Universitaea.
- Felicitísimo-Peréz, Á. M. (1994). *Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Geometrics (2005). *Operation Manual: G-882 Cesium Marine Magnetometer Data Sheet*. California: Geometrics Inc.
- Giraldo-Henao, Ra. (2003). *Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística.
- Gordon, W. J. y Wixon, J. A. (1978). Shepard’s method of “metric interpolation” to bivariate and multivariate interpolation. *Mathematics of Computation*, 32 (141), 253-264.
- Lee, B. G., Lee, J. J. y Kwon, K. R. (2005). *Quasi-interpolants based multilevel B-Spline surface reconstruction from scattered data*. Singapore: Universal; International Conference on Computational Science and Its Applications.
- Lee, S., Wolberg, G. y Shin, S. Y. (1997). Scattered data interpolation with multilevel B-Splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3 (3), 228-244.
- Martínez, W. y Sánchez, L. (2005). *Hacia un nuevo sistema vertical de referencia en Colombia*. Bogotá-Munich: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Organización Hidrográfica Internacional (OHI) (2005). *Manual de Hidrografía*. Monaco: Bureau Hidrográfico Internacional, Principado de Mónaco.