



MODELO BATIMÉTRICO DE PLAYA BACURANAO OBTENIDO A PARTIR DE BATIMETRÍA DERIVADA DE SATÉLITES.

BATHYMETRIC MODEL OF BACURANAO BEACH OBTAINED FROM BATHYMETRY DERIVED FROM SATELLITES.

MS.c. Armando Díaz Rodríguez. (1)

Ing. Lorraine Pérez Espinosa. (2)

DrC. Alberto Rodríguez Anaya 3)

MS.c Javier Alejandro Corcho Amador. (4)

1. Geocuba Investigación y Consultoría. Cuba. mandy890713@gmail.com
2. Empresa Geocuba Estudios Marinos. Cuba. lorraine@nauta.cu.
3. Geocuba Investigación y Consultoría. Cuba. anaya@uct.geocuba.cu
4. Academia Naval “Granma”. Cuba. javico0511@gmail.com

RESUMEN: En los últimos diez años se ha impulsado el uso de la Batimetría Derivada de Satélite (BDS), arrojando resultados satisfactorios en cuanto al impacto económico, sobre la base de que permite un ahorro considerable de recursos humanos y financieros. No obstante, existen varias limitaciones en Cuba, que imposibilitan que este método sea empleado en la producción de cartas náuticas.

En el presente trabajo los autores abordan la importancia que tiene el empleo de este método en los levantamientos batimétricos en aguas someras con fines cartográficos, o bien sean utilizados como herramientas alternativas que le permitan a los hidrógrafos tener una información preliminar de una zona de estudio. El objetivo que se pretende con su elaboración es presentar los trabajos realizados para obtener un modelo batimétrico de la playa Bacuranao, a partir del empleo de la Batimetría Derivada de Satélites. Para ello se utilizó una imagen de satélite Sentinel-2 de 10 m, de resolución espacial y el procesamiento de la misma fue realizado con el programa SNAP. El modelo matemático empleado para la determinación de las profundidades fue el desarrollado por Stumpf. La exactitud obtenida en la determinación de las profundidades es de +/- 40.3 cm, valor que está dentro del rango permisible según las normas técnicas para los levantamientos batimétricos de Orden 1a), según la Organización Hidrográfica Internacional (OHI).

Palabras Claves: Aguas someras; Batimetría Derivada de Satélite (BDS); modelo batimétrico.

ABSTRACT: In the last ten years, the use of Satellite-Derived Bathymetry (BDS) has been promoted, yielding satisfactory results in terms of economic impact, on the basis that it allows

considerable savings in human and financial resources. However, there are several limitations in Cuba, which make it impossible for this method to be used in the production of nautical charts.

In this work, the authors address the importance of the use of this method in bathymetric surveys in shallow waters for cartographic purposes, or to be used as alternative tools that allow hydrographers to have preliminary information about a study area. The aim of its preparation is to present the work carried out to obtain a bathymetric model of Bacuranao beach, based on the use of Bathymetry Derived from Satellites. To this end, a 10 m Sentinel-2 satellite image, with spatial resolution, was used and its processing was carried out with the SNAP program. The mathematical model used for the determination of the depths was the one developed by Stumpf. The accuracy obtained in the determination of depths is +/- 40.3 cm, a value that is within the permissible range according to the technical standards for bathymetric surveys of Order 1a) according to the International Hydrographic Organization (IHO).

Keywords: Bathymetry Satellite Derived; bathymetric model; shallow water.

Recibido: 14/10/2024

Aprobado: 10/12/2024

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas de la plataforma marina y las regiones litorales del país sufren cambios continuos en cuanto a sus características. Estos están relacionados directamente con la incidencia de fenómenos naturales, tales como: la escorrentía fluvial, las marejadas, las lluvias torrenciales, los ciclones y otros eventos hidrometeorológicos, además de la influencia de los efectos antropogénicos. Teniendo en cuenta la posición espacial que ocupa Cuba, en su condición de estado insular, enclavada en una zona geográfica que es azotada todos los años por eventos meteorológicos extremos, es preciso el empleo de nuevas alternativas para el monitoreo de los estos.

Los efectos del cambio climático, consecuencia de la actividad desmedida y despiadada del hombre con su entorno natural, provocan transformaciones considerables en la plataforma marina cubana y el litoral costero, modificando los ecosistemas que se encuentran en estas zonas de nuestra plataforma insular. Teniendo en cuenta que Cuba, es un pequeño país del mar Caribe, víctima de un férreo bloqueo económico y financiero impuesto por más de sesenta años por el imperialismo norteamericano, se entorpece la adquisición del equipamiento necesario para la realización de los trabajos hidrográficos y oceanográficos, además de su encarecimiento. Es evidente el empleo de métodos operativos y periódicos, para la obtención de datos batimétricos a fin de dar las respuestas correctas a los cambios ocurridos en la zona costera. De aquí que sea menester emplear la Batimetría Derivada de Satélites, como herramienta alternativa, para dar respuesta al volumen de trabajos que se pueden generar.

El presente trabajo tendrá como objetivo general de su elaboración mostrar los trabajos realizados para la obtención de un modelo batimétrico de la playa Bacuranao. También se pretenden enunciar las potencialidades de este tipo de técnica, como un sistema no acústico de determinación de las profundidades marinas.

1.1 Batimetría derivada de satélite

El empleo de la BDS se apoya en la existencia de diversos criterios y es precisamente la exactitud de las mediciones su talón de Aquiles, no obstante, se presenta en todos los casos como una alternativa para la obtención de datos hidrográficos en zonas poco profundas, donde resulta inaccesible el empleo de los sistemas tradicionales (sistemas acústicos).

La batimetría derivada de satélite (BDS), es una herramienta de reconocimiento útil que se puede utilizar para ejecutar la batimetría cerca de la costa, caracterizar un área costera y monitorear los cambios en el fondo marino que pueden haber ocurrido desde que se realizó el último levantamiento hidrográfico [I], [II]. Su principio de funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la radiación de onda corta en el espectro electromagnético que tiene una gran capacidad de penetración (de acuerdo a la transparencia en la columna de agua). A medida que la radiación solar incidente se propaga a través del agua, se dispersa, es absorbida y los componentes en suspensión causan que esta vaya dejando energía variada para ser retrodispersada y registrada en imágenes de percepción remota.



Figura 1. Cobertura de la BDS. [III]

Esta técnica ha mostrado gran impacto en la obtención de profundidades marinas en aguas poco profundas, permitiendo una gran cobertura areal, puesto que las imágenes permiten abarcar una mayor extensión de territorios, posibilitando un ahorro considerable de recursos humanos y financieros.

1.2 Potencialidades del empleo de la BDS en Cuba.

Cuba es un estado insular con una plataforma marina extensa que cubre una superficie de aproximadamente 70 000 km², donde el 70 % de la misma está compuesta por zonas bajas que oscilan de 0.5-8 m de profundidad, en las que en muchos casos existen peligros para la navegación (bajos fondos, barreras de arrecifes, cayos y cayuelos) y zonas de difícil acceso. Sus aguas circundantes poseen una alta transparencia y un alto contraste con el fondo marino.



Figura 2. Superposición de la carta náutica-imagen.

En la Figura 2 se pueden identificar varios elementos del fondo marino e incluso identificar peligros a la navegación, sobre todo en zonas donde el fondo predominante es arena. En estudios realizados por el Dr.C Álvarez Portal (2016), se ha podido comprobar que en determinadas zonas del país la transparencia es alta, pudiéndose identificar el fondo hasta profundidades superiores a los 20 m. Es por ello que, para el caso de los estudios de impacto ambiental u otros que no requieran un nivel de exactitud elevado el empleo de la BDS, para determinar las profundidades marinas tiene un gran impacto económico. Por otra parte, pudieran emplearse para tener una información preliminar de la zona de estudio, permitiendo a los hidrógrafos obtener datos de interés para la planificación del sondeo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Imágenes empleadas.

La imagen empleada fue del programa de observación de la tierra Sentinel-2, con una resolución espacial de 10 m. Este programa es administrado por la Agencia Espacial Europea y provee a los usuarios de imágenes gratuitas en el sitio web <https://scihub.copernicus.eu/>. El Sentinel-2 posee 12 bandas con diferentes resoluciones espaciales, no obstante, las bandas que se emplearon para la obtención del modelo batimétrico fueron las: B-2, B-3, B-4 y B-8, todas con una resolución espacial de 10 m.

Tabla 1. Metadatos de la imagen.

No.	Parámetros	Datos
1	Fecha de obtención	7 febrero del 2022
2	Resolución espacial	10 metros
3	Datum	WGS-84
4	Bandas espectrales empleadas	Infrarrojo, verde, azul y roja

Fuente: Elaboración propia

Además, la resolución temporal permite desarrollar estudios espacio-temporales de los litorales costeros, tales como: la erosión de las playas y zonas costeras, variación de la línea de costa y otros

estudios encaminados a determinar la influencia de los eventos meteorológicos extremos y el cambio climático en el medio marino. En la figura 3 se observan las frecuencias de revisitas que son de 5 a 10 días, destacadas por zonas verdes y amarillas respectivamente.

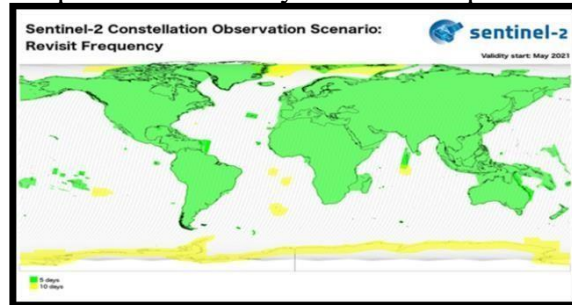


Figura 3. Frecuencias de revisitas [IV].

El empleo de las imágenes Sentinel-2 tiene un gran impacto, a partir de que su resolución temporal permite la realización de estudios espaciotemporales, pudiéndose obtener en un mes hasta seis imágenes. No obstante, en caso de que los trabajos exijan un mayor grado o nivel de detalle será necesario migrar a otra plataforma, ya que la resolución espacial es una limitante en ese sentido.

2.2 Otros materiales empleados.

Para la realización de los trabajos de campo y gabinete se emplearon el mapa topográfico a escala 1:25 000 (3785-III-b) y la carta náutica correspondiente a la ensenada de Bacuranao (Hoja- 15834). Además, se realizó en días previos a la obtención de la imagen un levantamiento batimétrico puntual, empleando la regla graduada para la determinación de las profundidades y un receptor GNSS para el posicionamiento.

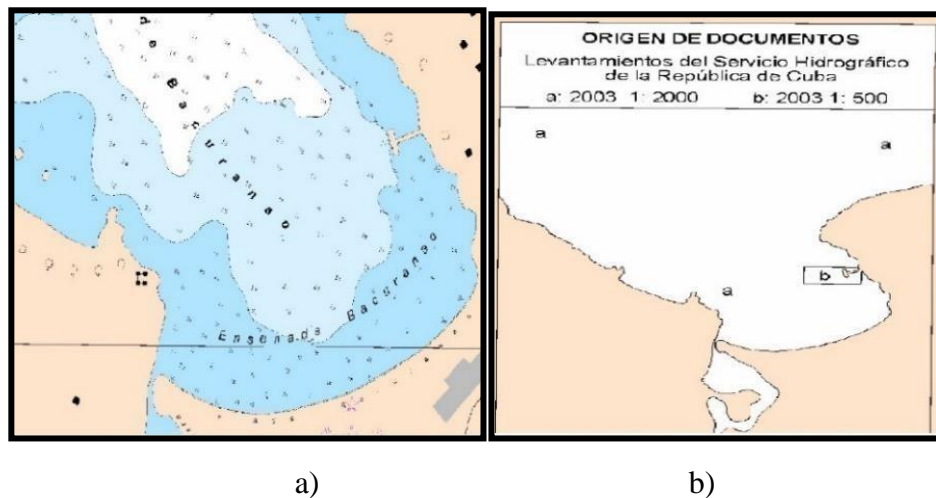


Figura 4. Captura en pantalla de la carta náutica (a) y esquema del origen de documentos (b). Véase en la figura 4 que las profundidades en la zona de estudio fueron obtenidas con levantamientos batimétricos convencionales, realizados en el año 2003 a escala 1:2 000, lo que la hace estar desactualizada, atendiendo a los 20 años de diferencia en la información.

Tabla 2. Metadatos de la carta náutica

No.	Parámetros	Datos
1	Numeración	Hoja- 15834
2	Datum	WGS-84
3	Fecha de edición	1ro mayo del 2014
4	Escala	1:2000
5	Obtención de las profundidades	Año 2003

Fuente: Elaboración propia

2.3 Modelo de Stumpf (*Band-Ratio Model*).

El algoritmo matemático empleado fue el de Stumpf. El mismo se desarrolló sobre la base del principio básico de absorción en la columna de agua para cada una de las bandas. Tal y como es sabido, cada una de las bandas capta la energía proveniente del objeto en diferentes longitudes de onda, por tanto, este nivel de diversidad de absorción en la columna de agua teóricamente generará un cambio simultaneo cuando varíe la profundidad.

$$z = m_1 \left(\frac{\ln(nRw(\lambda_i))}{\ln(nRw(\lambda_j))} \right) - m_0 \quad (1)$$

Donde:

z- Profundidad a determinar
 m_1 - Valor de Ganancia o Sesgo
 m_0 - Compensación
 λ_i - Banda Azul
 λ_j -Banda Verde

La OHI en su publicación B-11 *IHO-IOC GEBCO Cook Book*, desarrolla un procedimiento para la determinación de las profundidades marinas. Este modelo se ha empleado para realizar batimetrías en aguas someras, a partir de imágenes *Landsat 8* y se ha validado correlacionándolo con datos de profundidades extraídas de cartas náuticas y datos de levantamientos batimétricos con diferentes tecnologías, arrojando resultados prometedores hasta profundidades cercanas a los 20 m. La aplicación de la relación de banda (*Band-Ratio Model*), ha mejorado los resultados en la determinación de profundidades en los modelos empíricos. Este es muy útil en zonas donde las características del fondo son uniformes, obteniéndose los mejores resultados en zonas donde el tipo de fondo es de arena, y sus pendientes son más suaves, como es característico en la mayoría de las playas y zonas costeras en Cuba.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .

Una vez previstos todos los materiales de apoyo y de consulta se procede a obtener los principales resultados, los que serán debidamente analizados. Como se adelantó en epígrafes anteriores, se dispuso de un levantamiento realizado en la zona previo a la realización de la BDS, la que se realizó siguiendo los pasos descritos en el procedimiento que aparece en el *IHO-IOC GEBCO Cook Book*:

1. Preprocesamiento: Las imágenes satelitales se descargan en función de la ubicación y de las condiciones ambientales (nubosidad, ángulo de incidencia solar, etc.).
2. Separación del agua: La tierra seca y la mayor parte de la cobertura nubosa es eliminada.
3. Filtrado especial: Se elimina el ruido de las imágenes.
4. Correcciones radiométricas de la nubosidad y el destello mediante el algoritmo de Hedley.
5. Aplicación del algoritmo de batimetría de Stumpf.
6. Identificación de la profundidad de extinción: Se calcula el límite de profundidad óptica para la inferencia batimétrica.
7. Referencia vertical: Análisis estadístico entre los valores obtenidos y los sondeos realizados en la zona.

3.1 Obtención de un modelo batimétrico a partir del procesamiento de la data obtenida del levantamiento batimétrico convencional.

Se realizó un levantamiento batimétrico de forma puntual con el empleo de una regla graduada, determinándose las profundidades existentes en un total de 49 puntos con una separación entre ellos de 20-30 m, en sentido longitudinal y transversal (Fig. 5). El rango de profundidad medida se comportó entre los 0.9-6 m. La determinación de la posición se realizó empleando el GNSS GARMING ETREX 20.

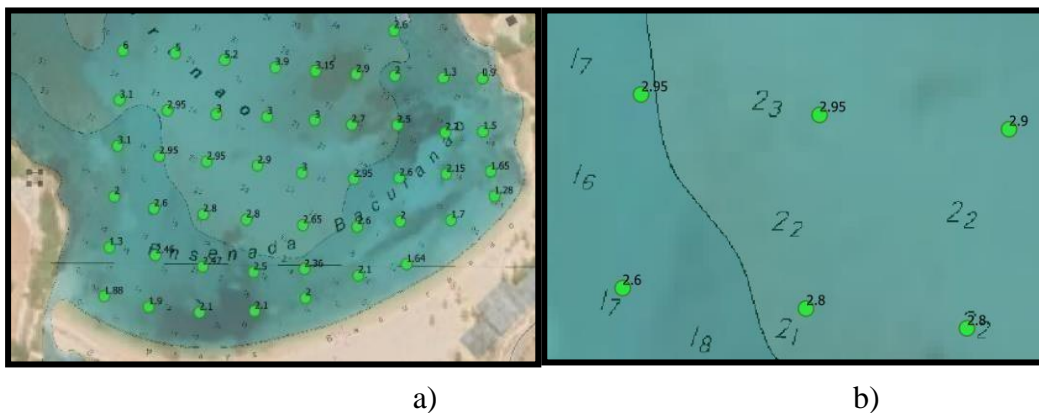


Figura 5. Resultados del levantamiento batimétrico puntual (a) y comparación con las profundidades de la carta náutica (b).

Tal como se puede apreciar en la Figura 5 (b) existe una diferencia entre los datos que se superponen, lo que presupone la desactualización de la carta náutica en lo referente a las profundidades marinas, puesto que la información de las mismas se obtuvo en levantamientos

realizados en el año 2003, existiendo una diferencia de 20 años, entre uno y otro. También se debe tener en cuenta la presencia en la zona de estudio de la desembocadura del Río Bacuranao, elemento geográfico que provoca el transporte de sedimentos a la playa, lo que puede condicionar conjuntamente con la incidencia de los eventos meteorológicos atmosféricos extremos- una leve variación de las profundidades marinas. Ello resalta la necesidad de realizar un análisis más profundo e intencionar el empleo de la BDS en el proceso productivo de la actualización de estas.

3.2 Obtención del modelo batimétrico, a partir de la BDS.

La zona donde se realizaron los trabajos fue en playa Bacuranao, ubicada dentro de la Boca de Bacuranao, municipio Habana del Este, enmarcada en la provincia de La Habana. Es un tramo de playa que abarca una superficie de 40 000 m², que contiene, además la desembocadura del Río de Bacuranao. Está ubicada específicamente entre los 23°10'00" y 23°15'00" de latitud norte y los 82°15'00" y 82°7'30" de longitud oeste.

Se empleó el programa QGIS 3.16, para la obtención del modelo batimétrico y aunque estos autores se limitaron solamente a la obtención genérica del modelo propiamente, las imágenes multiespectrales, con un trabajo mejor orientado pueden generar otros productos cartográficos de interés a la Hidrografía referidos a: pendientes y tipos de fondos, identificación de peligros a la navegación, determinación de la línea costera y obras civiles u obras hidrotécnicas ubicadas cerca de la zona costera.

3.2.1 Correlación de los valores de reflectancia y las profundidades de la carta náutica.

Se establece la relación entre los valores de reflectancia mediante un análisis estadístico con el objetivo de obtener los valores de ganancia o sesgo m_1 y el valor de compensación m_0 , mediante una Regresión Lineal Simple, empleando el programa *Statgraphic*. Se realizó el análisis para una profundidad máxima a medir de 6 m empleando un número de 12 observaciones.

Tabla 3. Resultados de la Regresión Simple para 6 m.

No.	Estadígrafos	Valores
1	Coeficiente de Correlación	-0,854406
2	R ₂	73,0 %
3	R ² ajustado	70,301 %
4	Error estándar	0,967733
6	Error absoluto medio	0,665409
7	Estadístico Durbin-Watson	0,707405 (P=0,0010)

El coeficiente de determinación R^2 indica que el modelo ajustado explica el 73,0% de la variabilidad en Profundidad, lo cual para nosotros no es lo suficientemente fuerte. El coeficiente de correlación es igual a -0,854406, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Tabla 4. Coeficientes.

<i>Mínimos Cuadrados Estándar Estadístico</i>				
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	148,922	28,0129	5,31619	0,0003
Pendiente	-145,489	27,9796	-5,19984	0,0004

De la tabla 4 obtenemos los valores de intercepto y pendiente para construir la fórmula del modelo que relaciona la profundidad con los valores de reflectancia.

$$\text{Profundidad} = 148,922 - 145,489 * \text{Reflectancia} \quad (2)$$

No obstante, se realizó nuevamente el análisis para una profundidad máxima de 4 m con la intención de contrastar los resultados obtenidos.

Tabla 5. Resultados de la Regresión Simple para 4 m.

No.	Estadígrafos	Valores
1	Coeficiente de Correlación	-0,97493
2	R_2	95,0489
3	R^2 ajustado	94,2237
4	Error estándar	0,284881
6	Error absoluto medio	0,219043
7	Estadístico Durbin-Watson	3,0196 (P=0,8989)

Como se puede apreciar en la tabla 5 los resultados son satisfactorios, lo que supone una fortaleza de este modelo para profundidades no mayores de 4 m en la que estos datos muestran una mejora significativa. El uso de la BDS, permite obtener en menor tiempo y con mayor periodicidad la información de las profundidades en zonas aisladas de difícil acceso y donde la navegación para las embarcaciones puede constituir un peligro. **3.2.2 Evaluación de la exactitud del modelo.**

Una vez obtenidos los valores de ganancia o sesgo y compensación, se procede a realizar la referencia vertical, logrando representar finalmente el modelo batimétrico (Fig. 6).

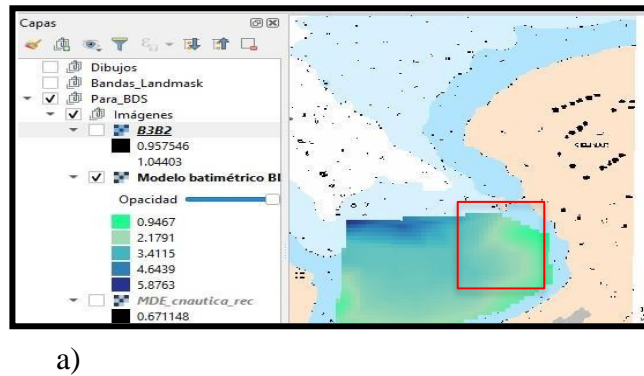


Figura 6. Modelo batimétrico obtenido por BDS (a) y superposición del modelo en la carta náutica (b).

Para la evaluación de la exactitud del modelo obtenido se emplearon 10 puntos de control que fueron distribuidos uniformemente por la zona que cubre el mismo. Estos puntos fueron determinados por métodos convencionales, constituyendo así los datos de validación.

Tabla 6. Puntos de control.

No.	X	Y	Z	Z BDS
1	23.17494	82.2465661	5.2	5.8
2	23.175219	82.249921	2.1	1.6
3	23.174801	82.246553	2.5	2.1
4	23.175254	82.242235	2.8	2.6
5	23.175411	82.245968	2.9	2.5
6	23.174766	82.243674	3	3.8
7	23.174731	82.246535	3.9	3.5
8	23.174207	82.246544	2	2.2
9	23.174443	82.246308	2.36	2.4
10	23.175472	82.246291	2.65	2.16

La tabla 6 muestra las coordenadas X, Y de los puntos de control en decimas de grados y la profundidad obtenida por métodos convencionales (Z) y mediante la BDS (Z BDS). Para la

determinación del Error Medio Cuadrático (EMC), se tiene en cuenta lo establecido en las Normas de la OHI, para los Levantamientos Hidrográficos, Publicación Especial S-44. Las mismas constituyen una serie de estándares desarrollados por la Organización Hidrográfica Internacional, para ayudar a mejorar la seguridad a la navegación. En ella se establece la clasificación de los levantamientos hidrográficos, así como la incertidumbre en la determinación de la profundidad y el posicionamiento.

$$EMC = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta Z^2}{n}} \quad (3)$$

Primeramente, se determina la incertidumbre vertical esperada para una profundidad mínima a medir de 1 m, empleando lo establecido en las S-44, mediante la expresión:

$$\pm \sqrt{a^2 + (b * d)^2} \quad (4)$$

Donde:

a- Representa la porción de la incertidumbre que no varía con la profundidad. b- Es un coeficiente que representa la porción de la incertidumbre que varía con la profundidad.

d- Es la profundidad b*d- Representa la porción de la incertidumbre que varía con la profundidad. Tabla 7. Cálculo de la incertidumbre vertical.

No.	Clasf. del levantamiento	a	b	d (m)	Incertidumbre vertical
1	Orden Especial	0.25	0,0075	1	0,25 m
2	Orden 1 ^a	0.5	0.013	1	0,50 m

El EMC, con el cual se determinaron las profundidades marinas mediante la BDS, fue de 40.3 cm. Haciendo un análisis *a priori* se puede afirmar que: la incertidumbre vertical máxima esperada para 1 m de profundidad en el Orden Especial es de 0.25 m y el EMC, obtenido en la determinación de los puntos de control es de ± 40.3 cm, por tanto no satisface las exigencias que demandan este tipo de levantamiento. Sin embargo, para la misma profundidad la incertidumbre máxima esperada para los levantamientos hidrográficos de Orden 1^a es de 0.50 m, para la cual el EMC calculado está dentro del permisible. El mismo puede variar en dependencia de las imágenes a utilizar, atendiendo a que mientras mayor sea la resolución espectral y espacial de la imagen mejor se ajustará el modelo obtenido.

4. CONCLUSIONES.

Si se analiza el volumen de los trabajos investigativos que se están realizando en Cuba, con la intención de minimizar los efectos del cambio climático -los cuales necesitan datos de las

profundidades marinas- y la insuficiencia tecnológica que poseen las empresas que se dedican a esta actividad, se puede afirmar que:

- La BDS, puede brindar una información preliminar de las profundidades marinas en áreas de interés, con un ahorro considerable de recursos materiales.
- Los resultados obtenidos en el presente trabajo afirman las potencialidades de este tipo de procedimiento y pueden tenerse en cuenta para los procesos de actualización cartográfica.
- El modelo obtenido se obtuvo con una exactitud de 40.3 cm, valor que está dentro del permisible establecido por la OHI para los levantamientos de Orden 1^a.

5. REFERENCIAS.

1. Manessa, M. D. M., Kanno, A., Sekine, M., Haidar, M., Yamamoto, K., Imai, T., & Higuchi, T. (2016). Satellite-derived bathymetry using random forest algorithm and worldview-2 Imagery. *Geoplanning J Geomatics Plan*, 3(117), 117-126.
2. Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T., & Yamanokuchi, T. (2019). Satellite derived bathymetry using machine learning and multi-temporal satellite images. *Remote Sensing*, 11(10), 1155.
3. Said, R. C. N. M., Mahmud, M. R., & Hasan, R. C. (2018). *Evaluating satellite-derived bathymetry accuracy from Sentinel-2A high-resolution multispectral imageries for shallow water hydrographic mapping*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
4. Álvarez Portal, R. Aplicaciones de las cámaras fotográficas aéreas en los estudios de la plataforma marina y zonas costeras; uso de otros sensores de percepción remota: 1-401, 2016.
5. Sitio web de la Agencia Espacial Europea.
6. Manual de Hidrografía. Publicación C-13. 1 ed. Mónaco: Bureau Hidrográfico Internacional; 2005.
7. Internacional OH. Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos Academia de las FAR Máximo Gómez. 2008;5(Publicación Especial No. 44):32.
8. IHO (2014). The IHO-IOC GEBCO Cook Book._____