

Patrones de oleaje a partir de un modelo óptico en la isla Cayos de Serranilla, Caribe colombiano

Wave patterns from an optical model on Serranilla Island Cays, Colombian Caribbean

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.603> Fecha de recepción: 2022-06-16 / Fecha de aceptación: 2022-08-02

Serguei Lonin¹; Rosana Adames²; José Luis Payares Varela³; Leonardo Marriaga Rocha⁴

CITAR COMO:

Lonin, S.; Adames, R. Payares Varela, J. L.; Marriaga Rocha L. (2022). Patrones de oleaje a partir de un modelo óptico en la isla Cayos de Serranilla, Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*; 41(1): 63-72. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.603>

RESUMEN

En este artículo se presenta la metodología utilizada para estimar batimetría sintética utilizando imágenes satelitales Worldview 2 de la isla Cayos de Serranilla, Caribe colombiano. La estimación se realizó para profundidades menores a 5 m. Para ello se efectuó una correlación de las bandas RGB con los datos batimétricos in situ, obtenidos con una ecosonda monohaz con mejor correlación para la banda roja. Lo anterior permitió generar datos batimétricos en las zonas poco profundas, facilitando así, el ingreso de datos para la implementación del modelo espectral de oleaje SWAN en tres dominios, con el fin de propagar el oleaje desde aguas profundas hasta la barrera arrecifal en inmediaciones de la isla Cayos de Serranilla, con lo cual fueron obtenidos los patrones de oleaje para la zona de estudio.

PALABRAS CLAVE: isla Cayos de Serranilla, modelo de propagación de luz, modelo espectral de oleaje, reflectancia, batimetría sintética.

ABSTRACT

This article presents the methodology used to estimate synthetic bathymetry using Worldview 2 satellite images of the Serranilla Island Cays Colombian Caribbean. The estimate was made for depths of less than five meters. For this, the RGB bands were correlated with in situ bathymetric data, obtained using a single beam echo sounder, with the best correlation found for the Red band. This allowed bathymetric data to be calculated for the shallow areas, thus facilitating the input of data for the implementation of the SWAN spectral wave model in three domains, used to propagate the waves from deep waters to the barrier reef in the vicinity of Serranilla Island Cays, with which the wave patterns for the study area were obtained.

KEYWORDS: *Serranilla Island Cays; light propagation model; spectral wave model, reflectance, synthetic bathymetry.*

¹ Orcid: 0000-0001-9561-0554. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla. Correo electrónico: slonin@costa.net.co

² Orcid 0000-0001-6290-2470. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla. Correo electrónico: rpadames@gmail.com

³ Orcid: 0000-0001-8215-0755. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla. Correo electrónico: jlpayares@enap.edu.co

⁴ Orcid: 0000-0001-5413-6163. Armada de Colombia. Correo electrónico: leomarriaga@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En el año 2000 el departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina fue declarada Reserva de la Biósfera Seaflower (RBS) por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco). Esta reserva cubre un área aproximada de 180 000 km², entre los 12° y 16° de latitud norte (N) y entre los 78 y 82° de longitud oeste (W) (CCO, 2015).

Desde el punto de vista hidrodinámico, el área de la RBS es muy activa, ubicándose allí una barrera de coral de gran relevancia para las redes tróficas del Caribe. Actualmente, la RBS es escenario de importantes proyectos de investigación que involucran esfuerzos interinstitucionales, como las recientes expediciones científicas Seaflower, convocadas por la Comisión Colombiana del Océano.

La isla Cayos de Serranilla corresponde a un atolón con un área aproximada de 1200 km² con diversas islas cayos de los que resalta cayo Beacon o cayo Serranilla (Coralina-Invemar, 2012). Este cayo está bordeado por una formación coralina emplazada sobre basamento volcánico, rodeada de aguas profundas (Correa, Valderrama y Montes, 1996), con una extensión aproximada de 40x40 km², que contribuye a la formación de la laguna arrecifal en su interior. Sin embargo, a la fecha no se ha estudiado en detalle la relación entre los parámetros de oleaje con las condiciones regulares y atípicas de la formación del atolón, para lo cual se requiere emplear modelos de oleaje que estén alimentados con datos de batimetría (profundidad) de esta zona de interés (Fig. 1).

La batimetría obtenida por el uso de sensores remotos pasivos se ha convertido en un método importante para obtener información acerca de la profundidad del agua debido a su amplia cobertura, rápido tiempo de actualización y bajo costo. El método de levantamiento batimétrico tradicional a bordo de un barco o de una lancha es preciso, pero no es aplicable en áreas a las que no pueden acceder las embarcaciones. La altimetría satelital suele ser usada para producir estimaciones de batimetría, pero puede ser muy imprecisa en aguas poco profundas (Lee *et al.*, 2010).



Figura 1. Área de estudio. Isla Cayos de Serranilla.

El sondeo lidar se puede utilizar para medir la profundidad del agua en áreas a las que los barcos no pueden llegar, como las regiones alrededor de islas y arrecifes, pero su uso es costoso y abarca pequeños rangos de medición (Zhang, Ma y Zhang, 2020).

En la zona costera, gracias a que la luz solar puede alcanzar el fondo, la batimetría es un parámetro fundamental que permite determinar la proporción de reflectividad debida al agua o al albedo del fondo que llegaría a un sensor remoto óptico pasivo, como los empleados en la mayoría de los satélites (Abasolo, 2016). Adicionalmente, en la costa el fondo se acopla a los procesos hidrodinámicos generados principalmente por la dinámica del oleaje.

Con el fin de validar las lecturas obtenidas a partir de imágenes satelitales en la isla Cayos de Serranilla, se planteó determinar las características de la reflectancia del fondo en aguas someras, que permitan inferir datos de batimetría donde no ha sido posible obtener datos de ecosonda, con lo cual se obtuvo el clima de oleaje y su propagación usando modelos espectrales de alta resolución espacial.

METODOLOGÍA

Batimetría sintética

Se realizó la caracterización de la reflectancia del fondo a partir de imágenes satelitales Worldview 2 (Tabla 1) con el fin de generar una batimetría sintética estimada de la zona de estudio.

Tabla 1. Características de las imágenes Worldview 2 usadas en el estudio.

| Nombre | ATCORCorrected_13NOV05160503-M2AS-054958618020_01_p001_083 |
|-------------------------|--|
| Resolución espectral | 7 (R, G, B, N, NDWI, NDVI, ICEDEX) |
| Resolución espacial | 2 m |
| Resolución radiométrica | 32 Bits |
| Resolución temporal | 1.1 día |
| Sistema de referencia | UTM 17 N |
| Datum | WGS84 |

Las imágenes fueron suministradas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) y el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (IGAC), previamente tratadas con corrección atmosférica mediante el Modelo Empírico Lineal (ELM, por sus siglas en inglés) (Baugh y Groeneveld 2008, Hadjimitsis *et al.* 2010; Schott, 1997) y el modelo ATCOR (Richter y Schläpfer, 2005), ambos con una alta capacidad para eliminar los efectos atmosféricos.

Para la corrección ELM, Ariza y Roa (2015) utilizaron firmas espectrales recolectadas en campo con un espectrorradiómetro HR4000 en formaciones coralinas, vegetación (palmas), arenas sumergidas y arenas secas, lo que permitió establecer una correlación superior al 90 % entre los datos *in situ* y valores de la imagen satelital para las bandas Red Green Blue (RGB, por sus siglas en inglés de).

Para identificar la banda del espectro visible que mejor se ajustaba a los datos batimétricos, se utilizó el software ArcGIS 10.5 para extraer la reflectancia de cada una de las bandas RGB y hacer la respectiva comparación, lo que permitió identificar la que mejor se ajustara a los datos *in situ* de batimetría para los primeros 5 m de profundidad.

Patrones de oleaje

Para establecer los patrones del oleaje se emplearon dos modelos espectrales de oleaje de tercera generación: WAVEWATCH III™ (WW-III) y Simulating Waves Nearshore (SWAN). Para ello se estableció el clima de olas en aguas profundas a partir de una boya virtual (el nodo de cálculo más cercano del modelo WW-III); luego se propagó el oleaje mediante el modelo SWAN, implementado tres dominios (mallas de nido en la Fig. 2) con condiciones de contorno del clima de olas: *i*) dominio extendido de 55 km x 46 km con una resolución espacial de 200 m; *ii*) dominio intermedio de 15 km x 11 km con una resolución espacial de 50 m y *iii*) dominio área de interés del estudio de 1554 m x 1400 m con una resolución espacial de 5 m x 5 m.

Para los dos primeros dominios se consideraron los datos batimétricos obtenidos con ecosondas por el CIOH hasta el 2017. Para modelar las condiciones en cercanías a la barrera arrecifal fue necesario generar previamente la batimetría en zonas someras, para lo cual se utilizó la batimetría sintética como insumo durante la simulación del oleaje en el tercer dominio de cálculo (Fig. 2).

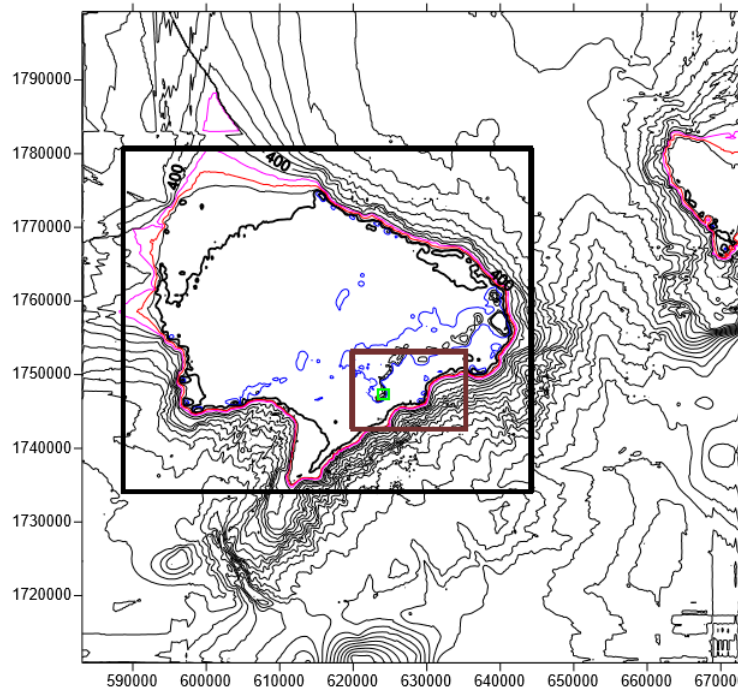


Figura 2. Selección de los tres dominios de cálculo: dominio extendido (negro), dominio intermedio (café) y dominio área de especial interés (verde).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades ópticas

Se realizó la validación de la información de reflectancia obtenida a través del tratamiento de las imágenes satelitales Worldview 2 y los datos batimétricos suministrados por el CIOH para el área de estudio, donde se evidenció que hubo una buena aproximación para profundidades menores a 5 m utilizando la reflectancia de la banda roja (R(630-690 nm)); mientras que las bandas azul (B(450-510 nm)) y verde (G(510-580)) no presentaron una buena correlación, como se observa en la Figura 3.

Lo anterior explica por qué en función de la transparencia del agua las ondas cortas del intervalo visible del espectro de luz alcanzan a llegar hasta la profundidad de la capa fótica, mientras que las bandas del infrarrojo cercano NIR y de rojo R se absorben en unos centímetros y los primeros metros de la columna del agua, respectivamente. Esto último explica por qué

la banda R es la que mejor se asocia a las profundidades de los primeros 3 m.

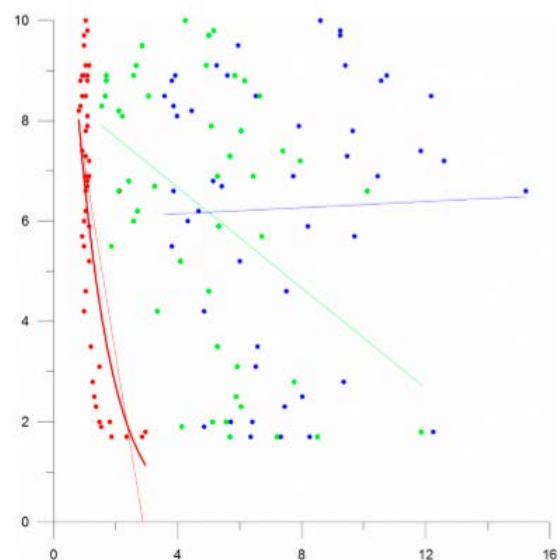


Figura 3. Correspondencia de la reflectancia RGB (eje vertical) vs. la profundidad en metros (eje horizontal). $RGB = f(h)$. Los colores corresponden a las respectivas bandas del visible: R (rojo), G (verde) y B (azul).

La Figura 4 muestra la cobertura de datos de reflectancia generada a partir de las imágenes satelitales para el área de estudio asociadas a profundidades entre 0 m y 5 m.

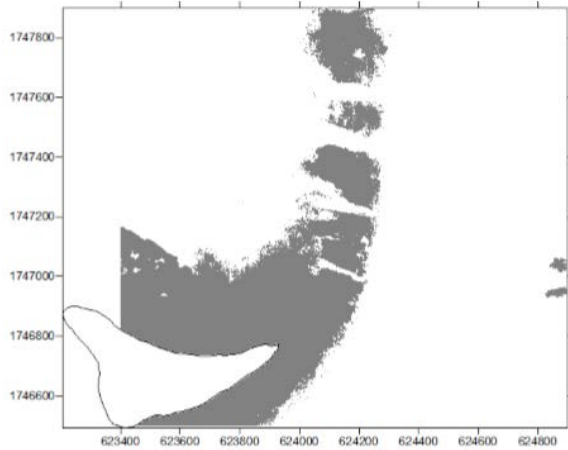


Figura. 4. Cobertura de píxeles de la imagen correspondientes a las profundidades menores a 5 m. Dominio de interés en la Figura 1.

Al analizar la correlación entre la profundidad hallada por la reflectancia de la banda R y la medida con la ecosonda (Fig. 5), se observa que hay dos tipos de curvas, aparentemente debido al sustrato del fondo (arena vs. coral). Esto conlleva a la necesidad de estudiar la dependencia de la reflectancia en función del tipo de fondo.

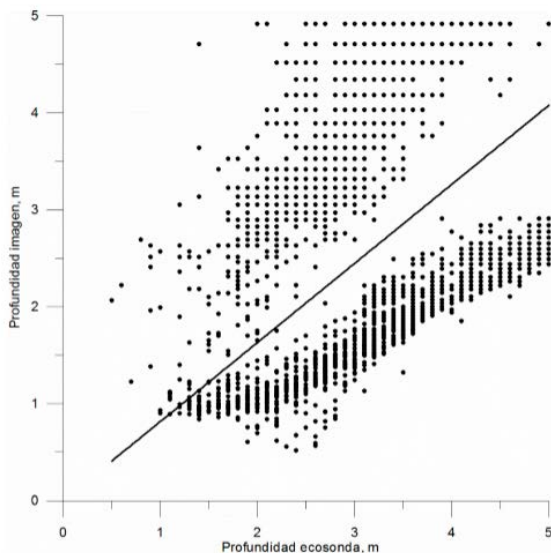


Figura. 5. Correlación entre la profundidad hallada por la reflectancia de la banda R y la medida con ecosonda.

La Figura 5 muestra la dependencia de la banda R para estos dos tipos de fondo. El ajuste de curvas corresponde a las siguientes expresiones:

Fondo de arenas:

$$\ln(\rho_R) = -0.963567 \ln(H) + 2.39366 \quad (1)$$

Fondo de coral:

$$\ln(\rho_R) = -0.89205 \ln(H) + 1.31259 \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2) ρ_R es la reflectancia en la banda Roja (0-255) y H representa la profundidad en metros. En ambos casos el ajuste es logarítmico. Sin embargo, el coral refleja con menor intensidad en comparación con las arenas para la misma profundidad.

En la Figura 6 se muestra la reflectancia de la luz para los dos tipos de fondo. Los mayores valores corresponden a las arenas blancas calcáreas en el fondo y los menores a las superficies de coral. Finalmente, en la Figura 7 se compuso el fondo sintético (profundidad en m) en cercanías de la barrera arrecifal, combinando la batimetría de ecosonda y las ecuaciones (1) y (2).

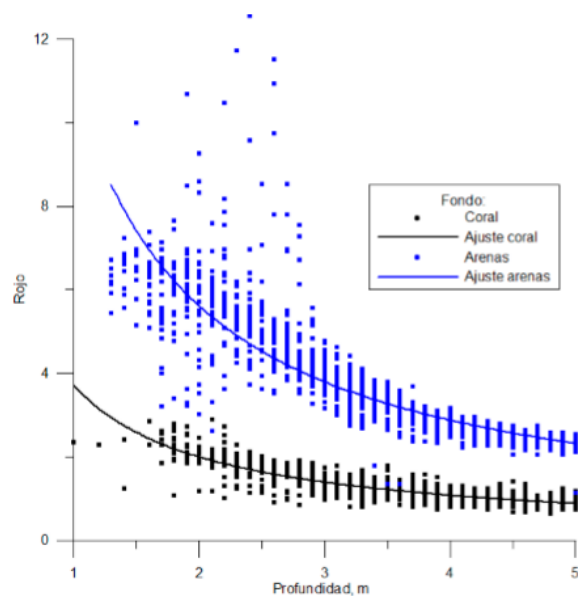


Figura. 6. Dependencia de la banda R de la profundidad para dos tipos del fondo.

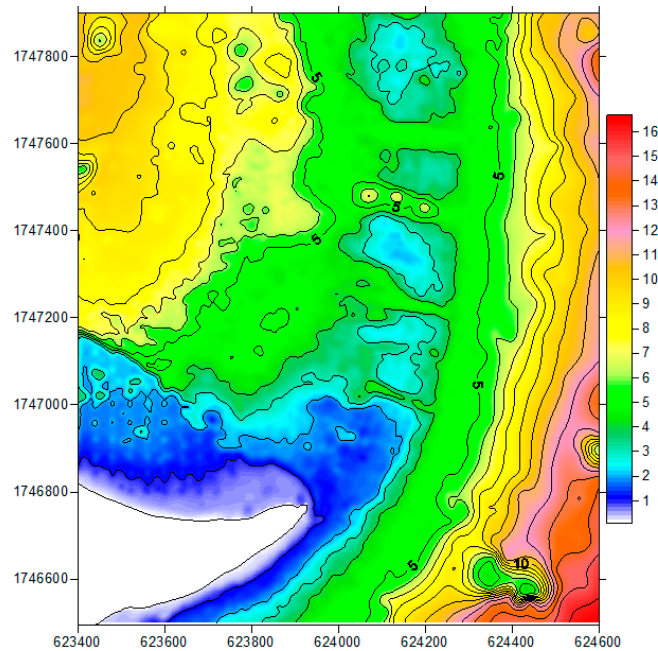
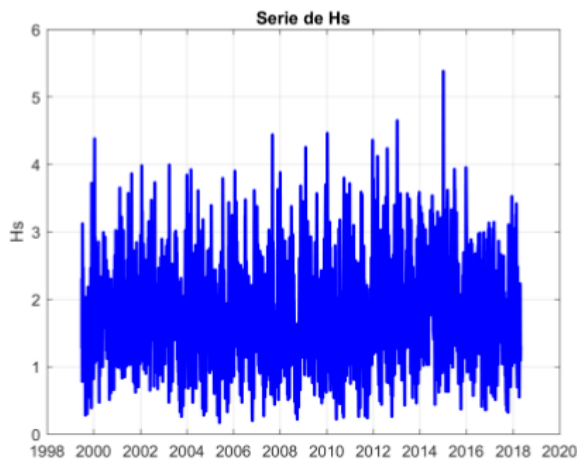


Figura 7. Fondo sintético (profundidad en m) restituido para el dominio anidado No. 3, con base en la imagen de Worldview 2 y datos de ecosondas (CIOH).

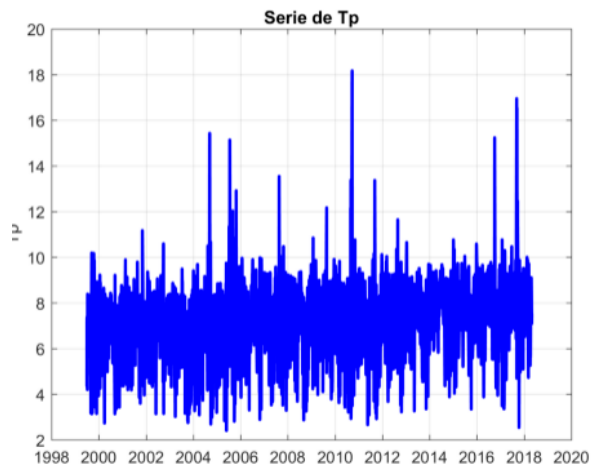
Patrones de oleaje

El comportamiento de los parámetros de oleaje proveniente de uno de los nodos más cercanos del cayo (correspondientes al área de estudio del modelo espectral) y usando pseudodatos de reanálisis del modelo WAVEWATCH III se encuentra en la Figura 8. Dentro de las estadísticas se consideran la altura de la ola significativa H_s

(Fig. 8a), el período pico T_p (Fig. 8b) y la dirección del oleaje (Fig. 8c) para los últimos 20 años. La ola del régimen (multianual) posee una altura significativa de 1.69 m, un periodo pico de 7.3 s y una dirección de 93° E. En cuanto al oleaje predominante (Fig. 8d) la dirección de mayor probabilidad es la del este (E) seguida de la este-sureste (ESE).



(a)



(b)

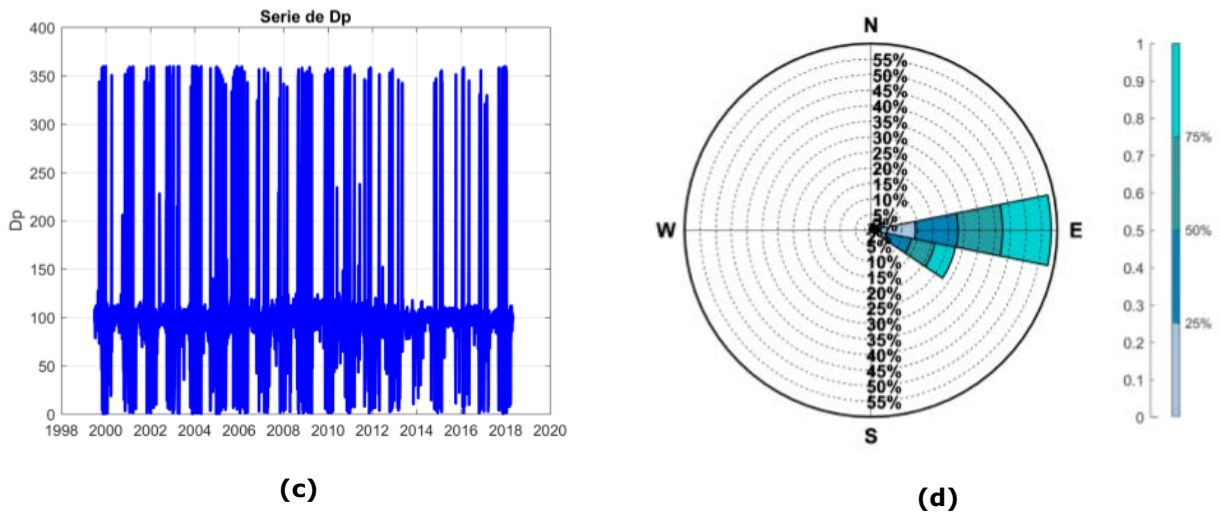


Figura 8. Serie de tiempo de: **(a)** Altura significativa (m), **(b)** Periodo pico (s), **(c)** Dirección náutica (grados) en aguas profundas en un nodo cercano al WWIII y **(d)** Rosa de oleaje calculada (altura significativa en m).

Las figuras de la 9 a la 11 ilustran las salidas del modelo SWAN para los dominios externo, intermedio y área de interés, respectivamente, considerando condiciones típicas del oleaje.

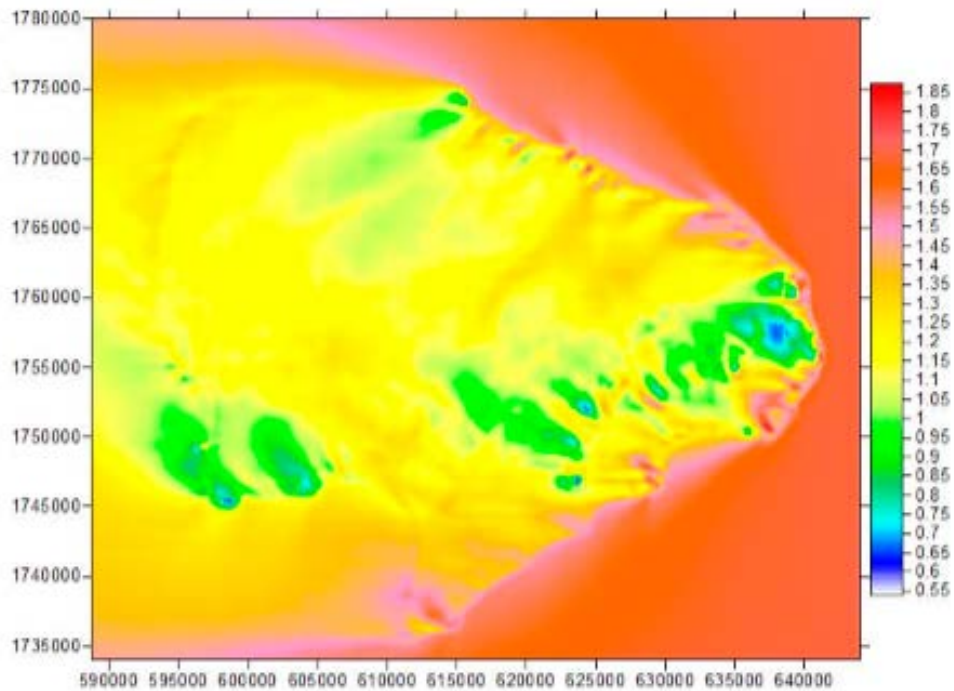


Figura 9. Propagación de oleaje (altura significativa en metros) para el dominio externo bajo las condiciones reinantes del clima, analizado con datos del modelo WWIII. Salidas del modelo SWAN.

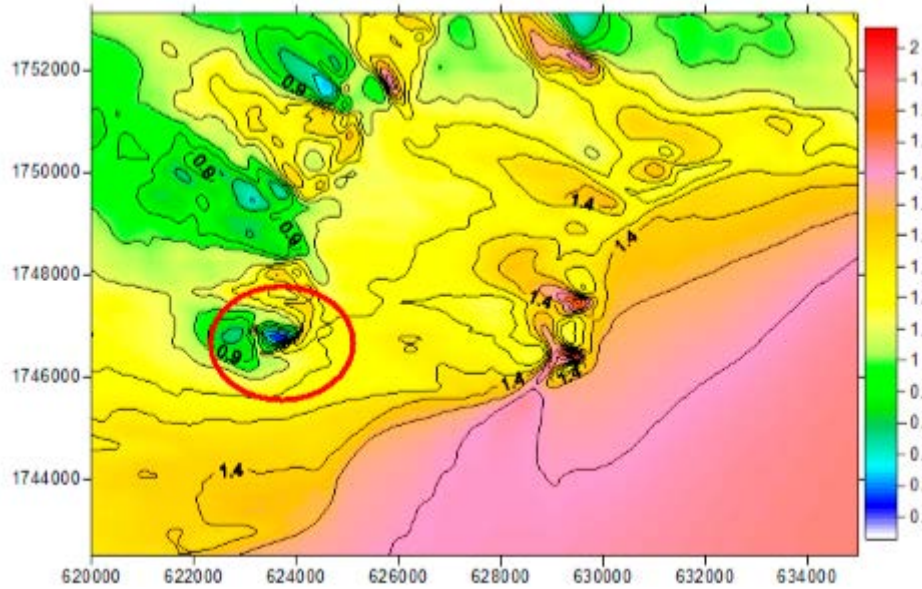


Figura 10. Propagación de oleaje (altura significativa en metros) para el dominio intermedio bajo las condiciones reinantes del clima, analizado con datos del modelo WWIII. Salidas del modelo SWAN. En el círculo rojo se encuentra la isla Cayos de Serranilla.

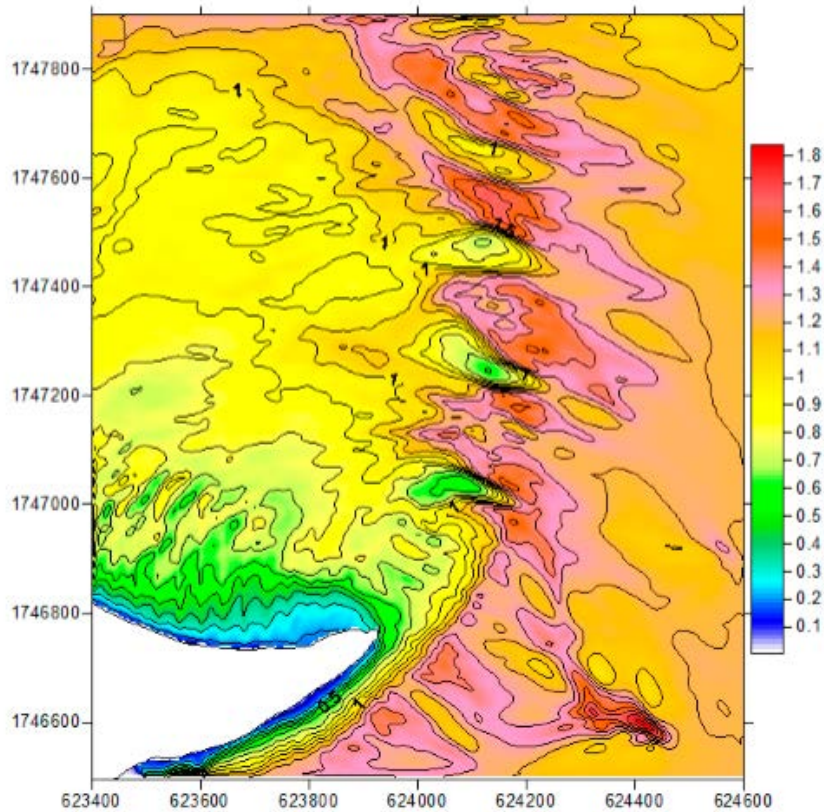


Figura 11. Propagación de oleaje (altura significativa en metros) para el dominio área de interés bajo las condiciones reinantes del clima, analizado con datos del modelo WW-III. Malla anidada del modelo SWAN.

De acuerdo con la Fig. 12, la dirección de oleaje en vecindad a la isla Cayos de Serranilla sufre el efecto de refracción en el relieve del fondo. El cálculo corresponde a la ola con altura de 1.69 m, período pico de 7.3 s y dirección en aguas profundas de 93° (E).

Se observa que dentro del atolón, en la parte norte de la isla, la ola incidente posee 10° - 20° (viene prácticamente perpendicular a la costa); mientras que en la parte sur el ángulo es de 130° - 140° (SE). Sin embargo, es de aclarar que

la dirección y longitud del oleaje sufrió un cambio significativo atravesando la barrera de coral y el oleaje que representa la Figura 11 (generalmente dentro del atolón, en la costa norte) ha disminuido atravesando el arrecife.

Por lo anterior, es importante considerar el ángulo "único" de la dirección media de energía de olas en aguas profundas (93°), hallado del clima de olas y correspondiente a las condiciones favorables para la formación de la barrera coralina en el pasado con su orientación actual.

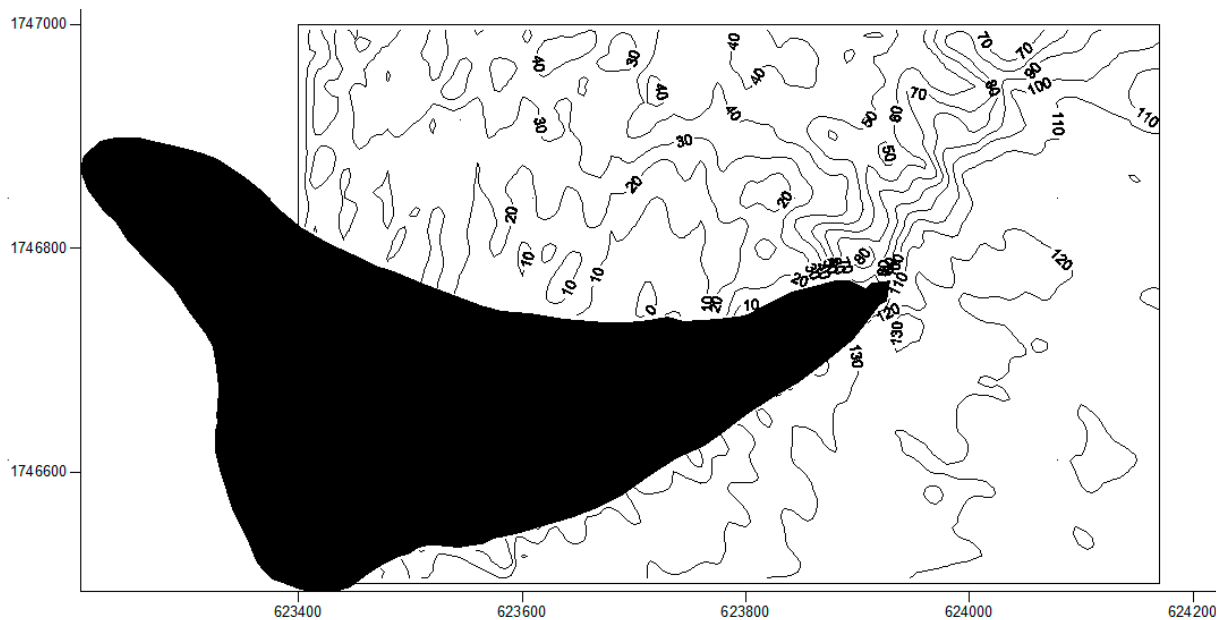


Figura 12. Dirección media (en grados) de propagación de oleaje de acuerdo con el patrón principal en aguas profundas.

Zambrano y Andrade (2011) realizaron la descripción del oleaje local en Cayos de Serranilla usando el módulo OLAS y realizando análisis espectral del oleaje a partir de datos *in situ*, obtenidos de sensores de presión fondeados a una profundidad entre 1.5 m y 2.0 m, por períodos de 6 horas cerca a la playa. Para ello clasificaron las playas del área de estudio por sectores, obteniendo que en el sector norte el oleaje característico predominante es del noreste-este (NEE), con una probabilidad de ocurrencia de 37.8 %.

Para la playa sur la dirección del oleaje característico es del este-sureste (ESE), con una probabilidad de ocurrencia del 32.8 %, y para la

playa Oeste predominan las direcciones noroeste (NW), con una probabilidad de ocurrencia del 1.1 % (Tejada, 2002). Considerando que en dicho estudio se analizó el oleaje local en la isla, dichas direcciones de oleaje muy probablemente correspondan a la refracción del oleaje predominante del área de estudio, que en efecto proviene del este.

CONCLUSIONES

A partir de la reflectancia de fondo obtenida por el tratamiento de las imágenes Wordview 2 de la isla Cayos de Serranilla, la banda R es la que mejor se asocia a las profundidades de los primeros 3 m. Correlacionando la reflectancia

de fondo con los datos *in situ* se obtuvieron perfiles logarítmicos para dos tipos de curvas, aparentemente asociadas al sustrato del fondo (arenas y coral). Se obtuvo el clima de olas para 20 años (hasta 2018), obteniendo una altura significativa de 1.69 m, un periodo pico de 7.3 s y una dirección de 93° E. En vecindades de Cayos de Serranilla se evidenció el efecto de refracción por el fondo y se pudo corroborar la dirección del oleaje respecto a la barrera de coral.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo de la Armada de Colombia, la Comisión Colombia del Océano, la Dirección General Marítima, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe y el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" en el marco del desarrollo de la Expedición Científica Seaflower 2017, isla Cayos de Serranilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasolo, J. (2016). *Implementación de algoritmos para la monitorización de calidad de aguas y de espacios costeros mediante la utilización de imágenes de teledetección satelital de muy alta resolución*. Tesis doctoral cibernética y telecomunicación. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Señales y Comunicaciones.
- Ariza, A.; Roa, O. (2015). *Informe técnico corrección atmosférica de imágenes Worldview-2 mediante el modelo empírico lineal*. Contrato No. 041 GINRED4/2015, suscrito entre el Ministerio de Defensa-Dirección General Marítima-Intendencia Regional Dimar y el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" (IGAC).
- Baugh, W.; Groeneveld, D. (2008). Empirical proof of the empirical line. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, Issue 3, pp. 665-672. <https://doi.org/10.1080/01431160701352162>
- Comisión Colombiana del Océano. (2015). *Aportes al conocimiento de la Reserva de Biósfera Seaflower*. CCO. Bogotá D.C. 108 pp.
- Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina-Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés". (2012). Gómez-López, D. I.; Segura-Quintero, C.; Sierra-Correa, P. C.; Garay-Tinoco, J. (Eds). *Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower*. Coralina-Invemar. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N°. 28. Santa Marta, Colombia, 180 pp.
- Correa, M.; Valderrama, J.; Montes, S. (1996). *Archipiélagos del Caribe Colombiano*. Cali: Banco de Occidente.
- Hadjimitsis, D.; Papadavid, G.; Agapoiu, A.; Themistocleus, K.; Hadjimitsis, M.; Retalis, A.; Michaelides, S.; Chysoilaskis, N.; Toullos, L.; Clayton, C. (2010). Atmospheric corection for satellite remotely sensed data intended for agricultural application: impacto on vegetation índices. *Natural HAZARDS and Earth System Sciences*. Vol. 10:89-95. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-89-2010>
- Lee, Z.; Hu, C.; Casey, B.; Shang, S.; Dierssen, H.; Arnone, R. (2010). Global Shallow-Water Bathymetry From Satellite Ocean Color Data. *AGU Advance Earth and Space Science*. Vol. 91, Issue 46, pp. 429-430. <https://doi.org/10.1029/2010EO460002>
- Richter, R.; Schläpfer, D. (2005). *Atmospheric/topographic correction for satellite imagery*. DLR report DLR-IB, 565-601. Recuperado de http://www.rese.ch/pdf/atcor3_manual.pdf
- Schott, J. (1997). Remote sensing. The image chain approach. *Geological Magazine*, 136(6): 697-711.
- Tejada, C. (2002). Desarrollo de un módulo informático para el manejo de datos de oleaje visual para las aguas jurisdiccionales colombianas. *Bol. Cient. CCCP*, 9:88-98. https://doi.org/10.26640/01213423.9.59_66
- Zambrano, J.; Andrade, C. (2011). Cambios en la línea de costa del Cayo Serranilla entre 1944 y 2009, Archipiélago de San Andrés, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*, 29:87-103. <https://doi.org/10.26640/22159045.231>
- Zhang, X.; Ma, Y.; Zhang, J. (2020). Shallow Water Bathymetry Based on Inherent Optical Properties Using High Spatial Resolution Multispectral Imagery. *Remote Sens*. 12(18), 3027. <https://doi.org/10.3390/rs12183027>