

Interacción entre playas y rompeolas emergidos: comparación con rompeolas sumergidos

Luis F. Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae)

e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Kenia Hernández Valdés

Inversiones Gamma S.A. Calle 14 N° 308 entre 3ra y 5ta ave. Playa. La Habana, Cuba.

e-mail: kenia@div.gamma.com.cu

Héctor Benítez Cristiá

Centro de Investigaciones Hidráulicas.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae)

RESUMEN

Conocer el comportamiento de la interacción entre el oleaje y las estructuras de protección costera, como alternativa a emplear para la recuperación de playas, adquiere cada día mayor importancia. El presente trabajo evalúa la capacidad del modelo matemático XBeach de simular la interacción oleaje-rompeolas emergido, evaluando el comportamiento de un conjunto de variables tanto hidrodinámicas como morfológicas. Se compara el desempeño funcional de estas obras con el de los rompeolas sumergidos.

Palabras clave: modelación matemática, procesos morfológicos, rompeolas emergidos y sumergidos.

Interaction between beaches and emerged breakwaters: comparison with submerged breakwaters

ABSTRACT

To know the behavior of the interaction between the surf and the structures of coastal protection, as an alternative to use for the recovery of beaches, acquires every day greater importance. The present work evaluates the capacity of the mathematical model XBeach for simulating the interaction waves- emerged breakwaters, simulating the behavior of a group of hydrodynamic as well as morphological variables. The functional performance of emerged breakwaters is compared with submerged breakwaters.

Keywords: mathematical model, morphological processes, emerged and submerged breakwaters.

INTRODUCCIÓN

Cuba es afectada anualmente por numerosos eventos climatológicos, entre los que se destacan los frentes fríos, las bajas extra tropicales y las tormentas tropicales, que provocan severos daños en las zonas costeras y las playas (Córdova 2014). Bajo el contexto del actual cambio climático, numerosos factores asociados con el calentamiento atmosférico y el ascenso del nivel medio del mar han dado lugar a un aumento de la incidencia y la intensidad de las tormentas que afectan el área geográfica, así como a la generalización de los problemas erosivos. Con el interés de detener este proceso, se aplican en muchos casos complejas y costosas soluciones, que lejos de alcanzar sus objetivos aceleran la pérdida de arena, debido al desconocimiento de las causas que lo generan y a la incorrecta selección de las soluciones que se aplican.

Los rompeolas son obras de protección que se han venido empleando de manera generalizada desde la década de los años setenta en países como Estados Unidos, España, Israel e Italia, inspiradas en el funcionamiento de formaciones naturales paralelas a la costa existentes en el litoral como arrecifes o pequeñas islas, que resguardan de la acción del oleaje un determinado sector de costa y son capaces de crear zonas de acreción. A pesar de las ventajas que presentan, existe la necesidad de comprender el comportamiento hidráulico de los complejos mecanismos de interacción que ocurren entre estas obras y el oleaje, con el objetivo de predecir los fenómenos morfológicos que se generan en las playas causados por los diferentes procesos que tienen lugar.

En este sentido, el grupo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas, desarrolló una investigación con el objetivo principal de evaluar el comportamiento de los rompeolas tanto emergidos como sumergidos en la protección de playas, empleando el modelo morfológico XBeach (Roelvink et al. 2009) debido a su capacidad de simular la hidrodinámica y la morfología en la interacción oleaje-estructuras costeras, lo que constituye una herramienta de diseño para proponer actuaciones en el manejo integrado de la zona litoral. El presente trabajo refleja los principales resultados obtenidos de la modelación de los rompeolas emergidos y su comparación con los rompeolas sumergidos desde el punto de vista funcional. El caso de los rompeolas sumergidos ha sido descrito y puede ser consultado en (Córdova et al. 2016).

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Establecimiento de la malla de trabajo y variables a estudiar

Para conocer la capacidad de evaluar el comportamiento hidrodinámico y morfológico del modelo ante la presencia de los rompeolas emergidos, se realizaron una serie de simulaciones utilizando una malla regular de 900 x 900 m de longitud, con resolución de 5 m en la dirección perpendicular a la costa (dx) y de 10 m a lo largo de la costa (dy), la cual presenta batimetrías rectas y paralelas con pendientes suaves y cotas que transitan desde la profundidad de 7,6 m hasta los 5,3 m por encima del nivel medio del mar. En la investigación se estableció una altura de ola de 1,5 m, período 9 seg, dirección del oleaje incidente de 270^0 sin variación del nivel medio del mar y material de fondo arena, con un tamaño de grano D_{50} de 0,25mm. La malla permitió visualizar los procesos ocurridos en cada simulación, contando con un área de estudio de 810 000 m², lo que puede apreciarse en la figura 1.

Los rompeolas estudiados presentan un dimensionamiento de 10 m de ancho y 100 m de longitud, de sección trapezoidal con talud 1:1,5 no rebasables, ubicados a diferentes distancias de la costa, cumpliendo con la condición de encontrarse dentro de la zona de rotura y que muestren diferentes respuestas morfológicas (formación de tómbolos, salientes y sin sinusoidad), atendiendo a los criterios dados por Pope and Dean (1986) y Suh and Dalrymple (1987). En la tabla 1 y en la figura 1 se refleja la ubicación de los rompeolas emergidos y sus características.

Tabla 1. Simulaciones realizadas

Caso	Longitud (m)	Ancho (m)	Cota coronación (m)	Distancia a la costa (m)
1	100	10	2,0	50
2	100	10	2,0	90
3	100	10	2,0	350

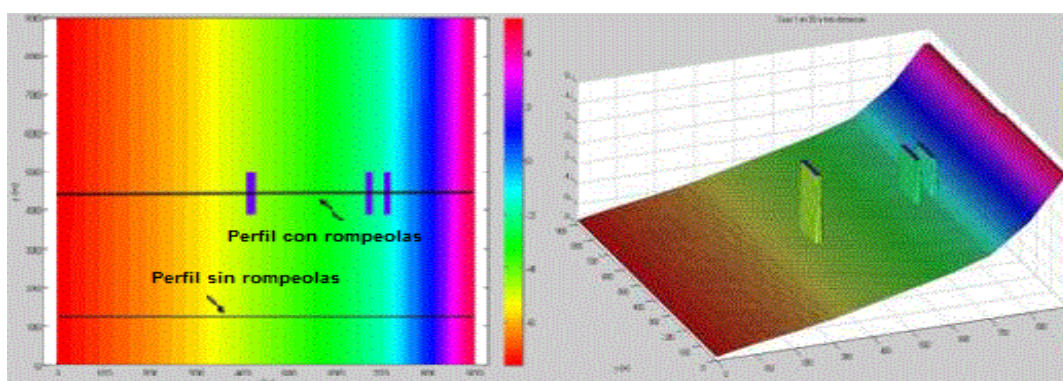


Figura 1. Malla de trabajo y ubicación de los rompeolas estudiados

Con el objetivo de evaluar las simulaciones realizadas por el modelo matemático Xbeach en los diferentes casos de estudio, se seleccionaron para su análisis un conjunto de variables tanto hidrodinámicas como morfológicas, las que se muestran en la tabla 2. Para realizar la comparación de las variables seleccionadas ante la presencia y en ausencia de la estructura, fueron analizados dos perfiles, uno que se ubica en el centro del rompeolas y el otro alejado del rompeolas y de su área de influencia, los cuales se muestran en la figura 1.

Tabla 2. Variables hidrodinámicas y morfológicas analizadas

Variables	Descripción	Unidades
Variables Hidrodinámicas		
H	Altura de ola	m
u	Velocidad en el eje x en el centro de la celda	m/s
v	Velocidad en el eje y en el centro de la celda	m/s
Zs	Nivel de agua	m
Sxx	Tensiones de radiación	N/m
Variables Morfológicas		
Zb	Nivel de fondo	m
Sutot	Transporte de sedimento total en eje x	m ² /s
Svtot	Transporte de sedimento total en eje y	m ² /s
Sedero	Sedimentación/erosión	m

COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS

Altura de ola

Para el caso 1 con una distancia a la costa $X_b=50$ m, la altura de ola prácticamente se hace cero y la zona de difracción provocada por el rompeolas alcanza la línea de costa. En los casos 2 y 3, con distancias a la costa de 90 m y 350 m, la zona de difracción no abarca toda el área entre la línea de costa y la estructura, observándose en la figura 2 un incremento de los valores de altura de ola por efecto del asomeramiento y la refracción, que llega a alcanzar los 0,75 m para el tercer caso.

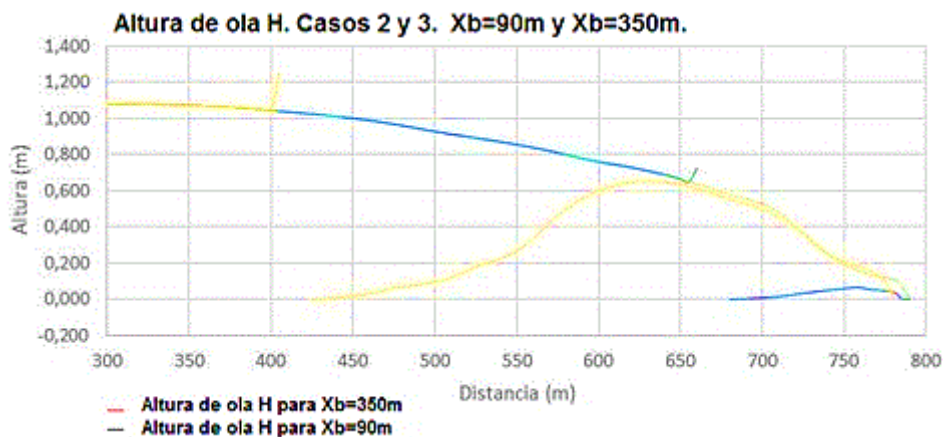


Figura 2. Alturas de ola para los casos 2 y 3 ($X_b=90$ m y $X_b=350$ m)

Velocidades de las corrientes

Para las condiciones de estudio establecidas en la investigación, las corrientes son producidas únicamente por el oleaje. En el caso 1 con una distancia a la costa $X_b=50$ m, se simulan las corrientes que transportan sedimentos desde la zona adyacente hacia la zona protegida, donde son acumulados, debido fundamentalmente a los gradientes de altura de ola, alcanzando valores de velocidad cercanos a los 0,3 m/s, lo que se observa en la figura 3.

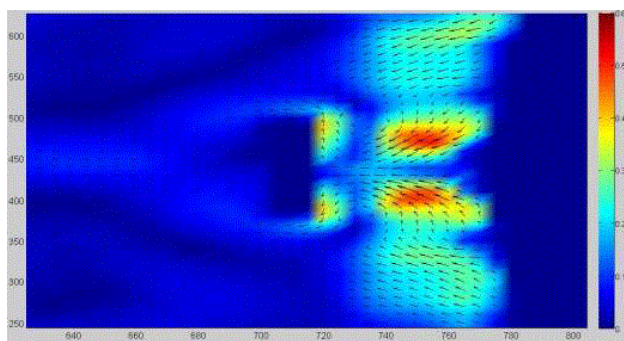


Figura 3. Patrón de corrientes para el caso 1 con distancia a la costa $X_b=50$ m

Los casos 2 y 3 muestran claramente la aparición de dos celdas de circulación simétricas que se generan desde la parte posterior del rompeolas y se mueven hacia el frente, debido a la generación de gradientes por la diferencia de altura de olas entre la zona protegida y la no protegida, que alcanzan valores de hasta 0,6 m/s para el caso 2 como se aprecia en la figura 5. En el caso 3 estas celdas presentan una mayor longitud, existiendo un área de influencia por efecto del rompeolas mucho mayor y mostrando valores que no sobrepasan los 0,5 m/s, lo que se confirma en la figura 4.

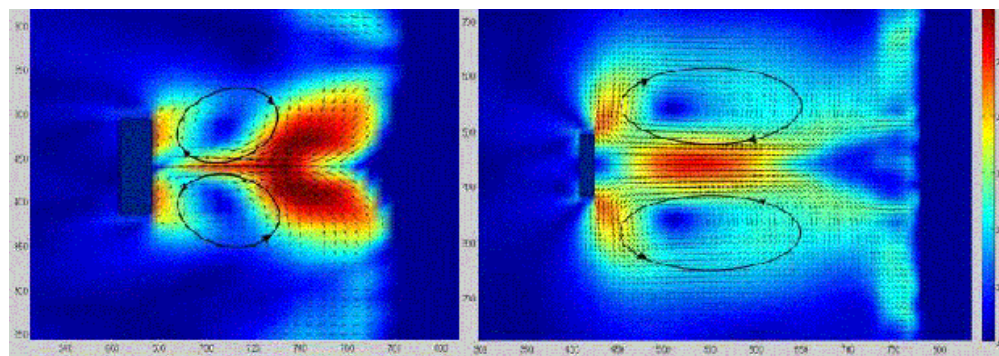


Figura 4. Patrón de corrientes para casos 2 y 3 c /distancia a la costa $X_b=90$ m y $X_b=350$ m

Los resultados coinciden con lo planteado por Gourlay (1976), Cáceres et al. (2005), Woodroof (2012), quienes muestran cómo los rompeolas emergidos no sobrepasados propician un patrón hidrodinámico de circulación “cerrado”, caracterizado por dos vórtices o corrientes circulatorias en celdas generadas en cada extremo del rompeolas, que convergen a sotavento de la estructura. Estas corrientes ponen el sedimento en suspensión para luego depositarlo centralmente detrás de cada rompeolas a lo largo de la costa, lo que conduce a la formación de salientes o tómbolos, en dependencia de la geometría del rompeolas con relación a la costa y la disponibilidad de suficiente sedimento.

Tensiones de radiación

En cuanto a esta variable, para el primer caso las tensiones de radiación son nulas debido a que la altura de ola se hace cero por efecto del rompeolas así como el transporte de sedimentos perpendicular a la costa, lo que hace posible que las partículas de arena que son arrastradas a la zona de sombra no sean removidas con posterioridad, acumulándose en el área. El aumento de las tensiones que se generan frente al rompeolas es pequeño, por lo que la erosión que se presentará al pie del rompeolas será leve. En la figura 5 se observa el comportamiento de las tensiones de radiación tanto en el perfil que pasa sobre el rompeolas como en el perfil que pasa alejado de su zona de influencia, lo que permite establecer el desempeño de la obra.

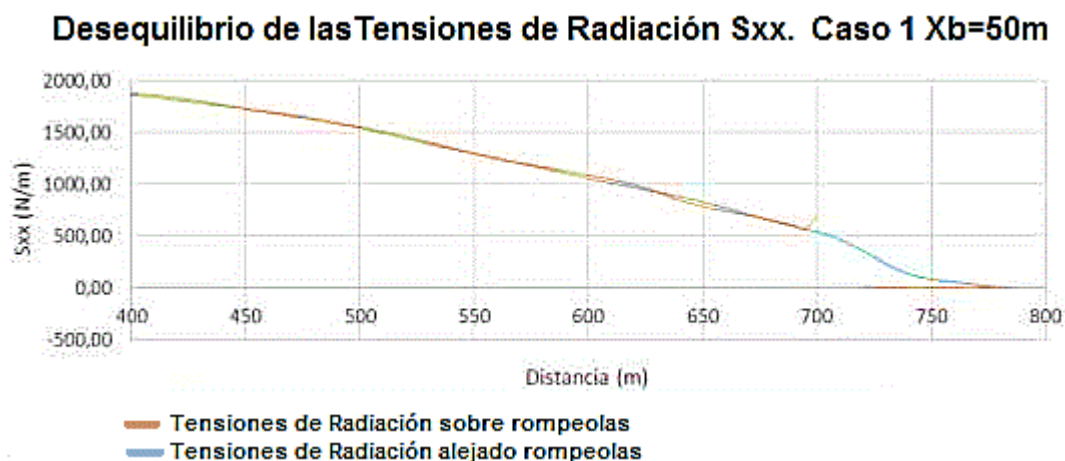


Figura 5. Tensiones de radiación para el caso 1 con distancia a la costa $X_b=50$ m

En el segundo caso, donde el rompeolas se ubica a una distancia a la costa de 90 m, se

presenta un ligero aumento de las tensiones de radiación, lo que permite un pequeño transporte de sedimentos en la zona, dando lugar a la formación de un saliente. En comparación con el caso anterior, la figura 6 refleja el incremento de las tensiones de radiación frente al rompeolas, las que aumentan casi al doble, por lo que se producirá una mayor erosión en su talud.

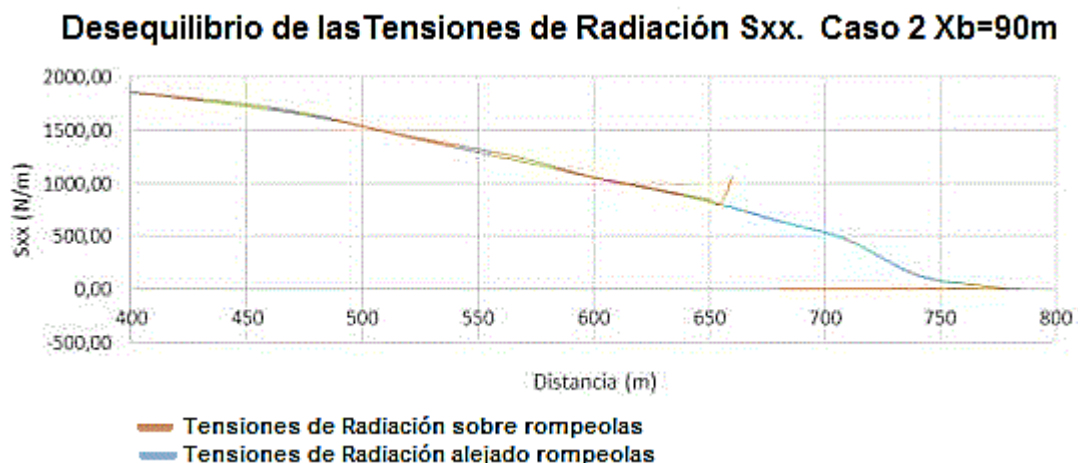


Figura 6. Tensiones de radiación para el caso 2 con distancia a la costa Xb=90 m

Por su parte, el tercer caso reflejado en la figura 7, muestra un incremento en las tensiones de radiación mucho mayor que en los descritos con anterioridad, aumentando su valor en dirección a la costa donde se alcanza un máximo de 750 N/m, lo que trae aparejado una intensificación del transporte de sedimentos. Las tensiones frente al rompeolas llegan a alcanzar los 2750 N/m, provocando una fuerte erosión en su talud.

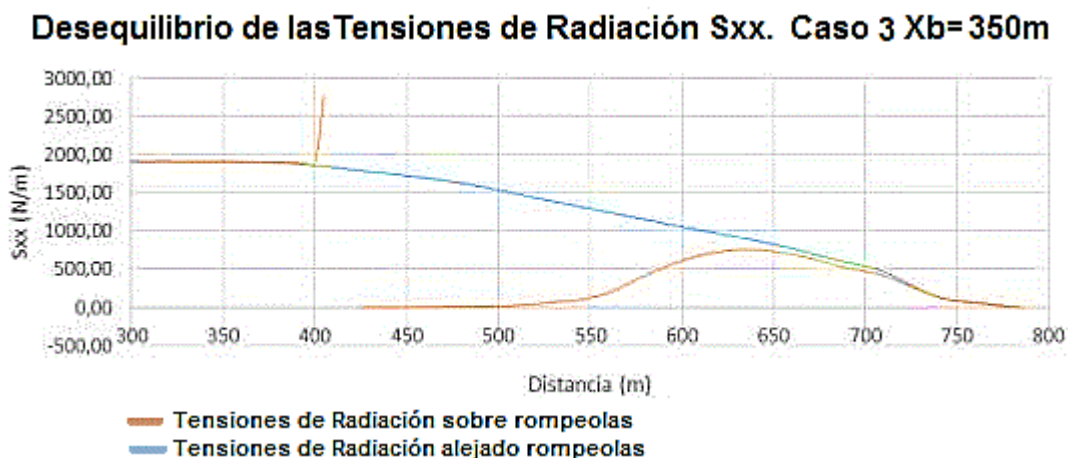


Figura 7. Tensiones de radiación para el caso 3 con distancia a la costa Xb=350 m

Niveles en la superficie

En el caso 1 con una distancia a la costa de 50 m, el valor máximo de los niveles en la superficie excede los 0,05m detrás del rompeolas, debido a la sobreelevación que se produce por la rotura del oleaje. En la zona de sombra el nivel decrece en dirección a la costa, debido a que los valores de la altura de ola se hacen cero. La figura 8 muestra el comportamiento de los niveles de la superficie tanto en el perfil que pasa sobre el rompeolas como en el perfil que pasa

alejado de su zona de influencia, lo que permite establecer el desempeño de la obra.

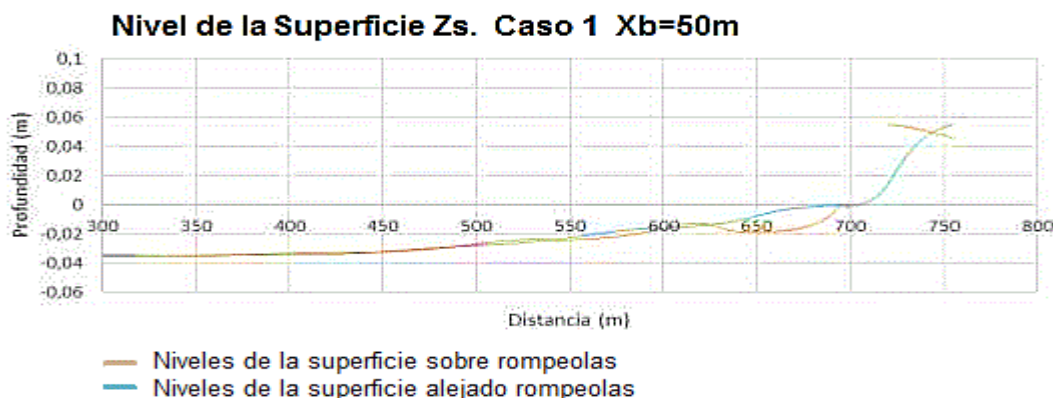


Figura 8. Nivel de la superficie para el caso 1 con distancia a la costa Xb=50 m

El caso 2 distante de la costa Xb=90 m muestra un comportamiento similar, incrementándose los niveles detrás del rompeolas, los que llegan a alcanzar valores de 0,06 m. Próximo a la costa en la zona de sombra también se aprecia un aumento en los niveles, debido al asomeramiento y la rotura del oleaje y al leve incremento de las tensiones de radiación, lo que puede ser visto en la figura 9. Este comportamiento se explica al expresar el oleaje en términos de balance de masa y momentum, como se muestra en la ecuación 1.

$$S_{xx} = \int_0^{h+\eta} (P - \rho V^2) dz - \int_0^h \rho g Z dz \quad (1)$$

donde:

Sxx: Tensión de radiación (N/m)

P: Presión hidrostática debido al perfil de la ola (N/m²)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

V: Velocidad de la ola (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

Z: Profundidad (m)

η : Amplitud de la ola (m)

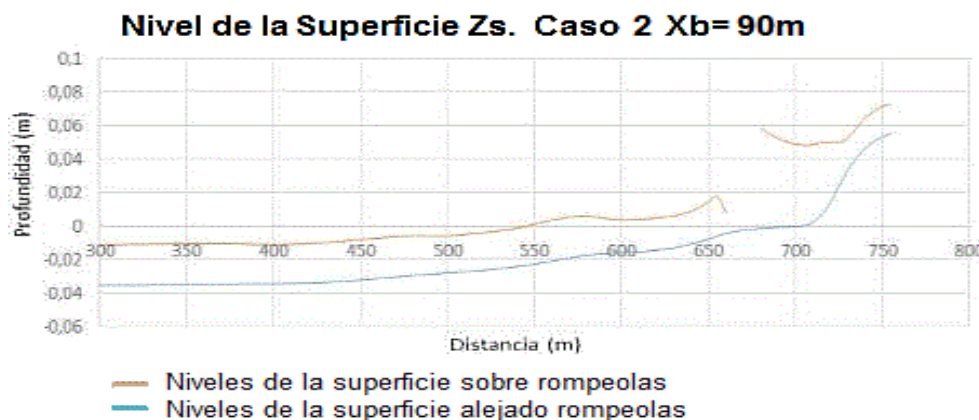


Figura 9. Nivel de la superficie para el caso 2 con distancia a la costa Xb=90 m

El caso 3 distante de la costa $X_b=350$ m aparece en la figura 10 reflejando un decremento de los niveles detrás de la estructura, debido a que al estar el rompeolas ubicado en mayores profundidades la sobreelevación que se presenta es menor. Los niveles de la superficie cercanos a la costa aumentan hasta alcanzar los 0,08 m debido a que la altura de ola en esa área es mayor.

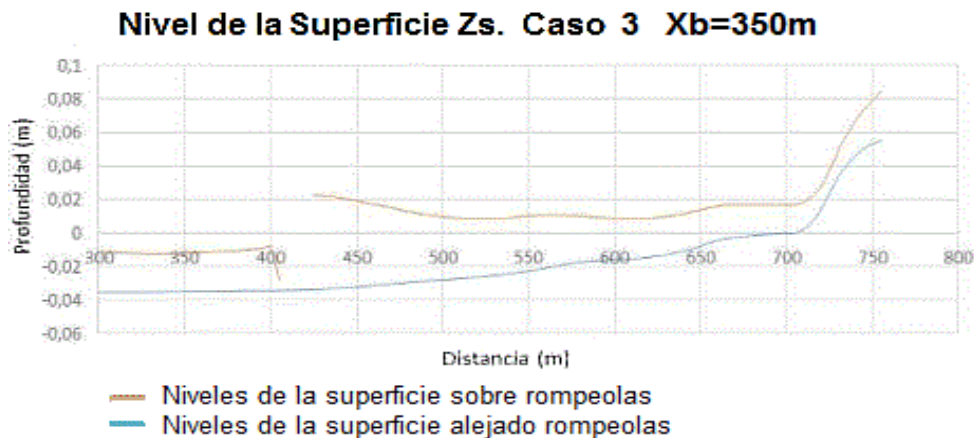


Figura 10. Nivel de la superficie para el caso 3 con distancia a la costa $X_b=350$ m

Niveles de fondo

En el análisis de esta variable, el caso 1 a una distancia de la costa $X_b=50$ m, muestra acumulación en la zona protegida que tiende a la formación de un tómbolo. En el talud frontal se produce una socavación al pie de la estructura debido a la reflexión del oleaje que ocasiona un movimiento de las corrientes en dirección hacia el mar unido a un transporte de sedimentos, como aparece en la figura 11.

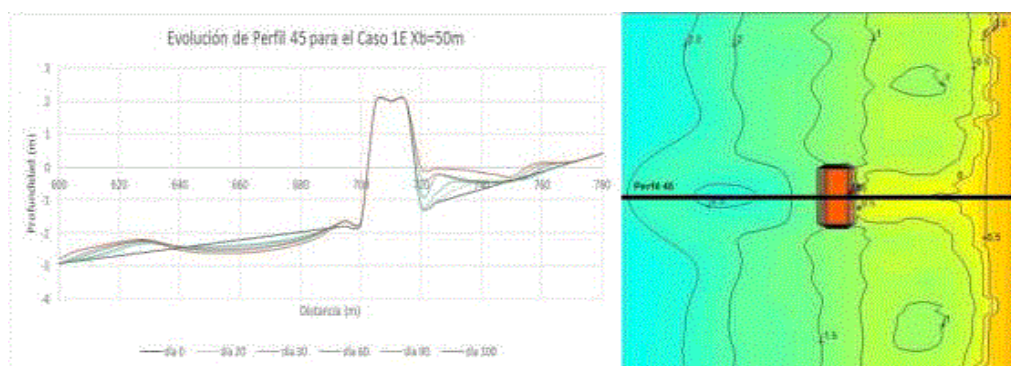


Figura 11. Niveles de fondo Zb para el caso 1 con distancia a la costa $X_b=50$ m

Este comportamiento coincide con lo descrito por Sumer and Fredsoe (2000), quienes investigaron la formación de socavaciones en el área no protegida alrededor de los rompeolas con pendientes, tanto para oleaje regular como irregular. En la figura 12 se ilustran los patrones observados, correlacionados con los puntos nodos y antinodos de la onda estacionaria delante del rompeolas, los que coinciden con los estudios desarrollados por Papadopoulos (2012).

El caso 2 con distancia a la costa $X_b=90$ m muestra la formación de un saliente bien

desarrollado, donde la acumulación de sedimentos ocurre desde el centro del área protegida hacia la zona más profunda. En el talud frontal se produce socavación al pie de la estructura aunque en menor cuantía (figura 13).

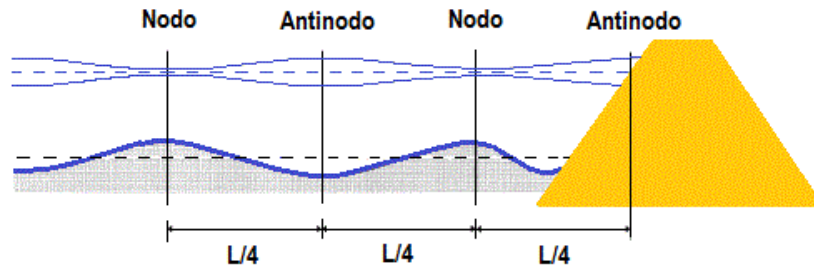


Figura 12. Patrones Socavación/deposición según Summer and Fredsoe (2000)

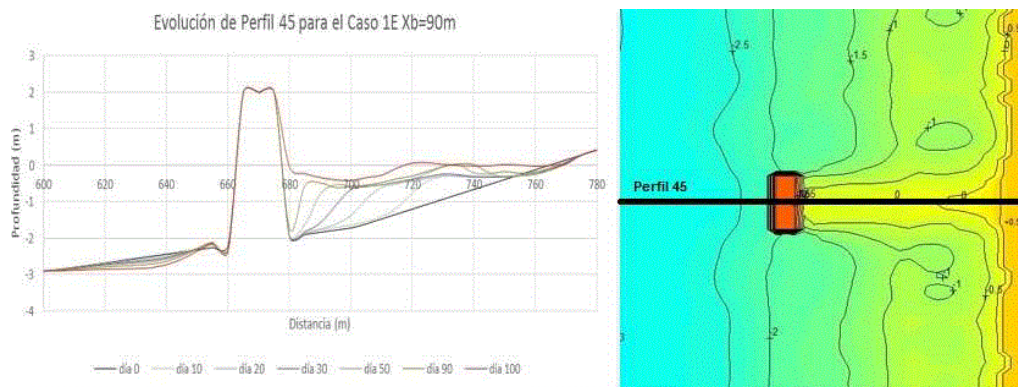


Figura 13. Niveles de fondo Zb para el caso 2 con distancia a la costa Xb=90 m

El caso 3 con distancia a la costa Xb=350 m presenta una tendencia a alcanzar el perfil de equilibrio, con la formación de un saliente. Frente de la estructura la erosión es menor que en los casos antes analizados, y aunque se incrementan las tensiones de radiación también lo hace la profundidad, lo que limita el transporte de sedimentos como se refleja en la figura 14.

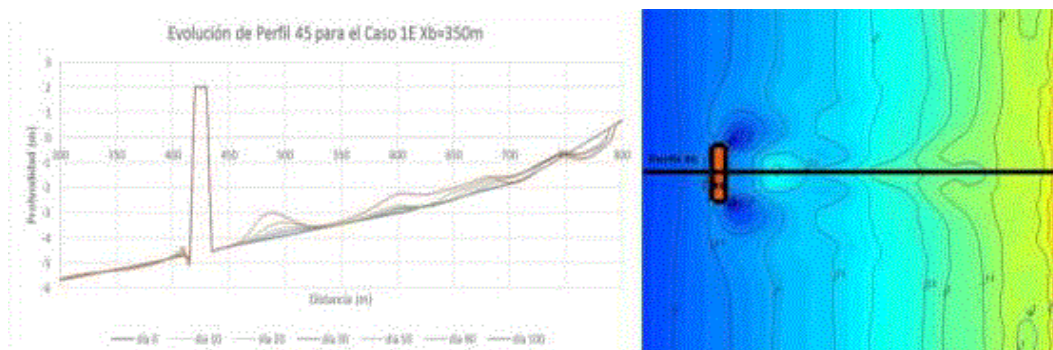


Figura 14. Niveles de fondo Zb para el caso 3 con distancia a la costa Xb=350m.

Transporte de sedimento

En el primer caso para una distancia a la costa $X_b=50$ m se definen claramente las áreas donde ocurre la mayor acumulación de sedimentos, lo que favorece la formación de un tómbolo, coincidiendo los patrones de transporte dirigidos de la zona de erosión hacia la de acumulación. El transporte de sedimento alrededor de la estructura muestra la socavación a la que está expuesta en su talud frontal, y en menor medida en los extremos del talud protegido, tal como aparece en la figura 15.

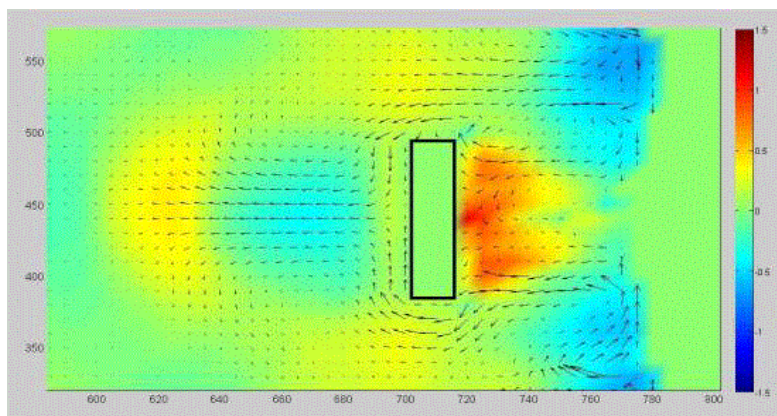


Figura 15. Transporte de sedimento para el primer caso con distancia a la costa $X_b=50$ m

El segundo caso para una distancia a la costa $X_b=90$ m muestra una mayor acumulación de sedimentos, lo que favorece la formación del saliente, debido a la existencia de una franja de erosión en las zonas adyacentes más amplia, desde donde se dirigen los patrones de transporte hacia la zona de acumulación. La socavación a la que está expuesta el talud frontal disminuye, mientras que la erosión en los extremos del talud protegido del rompeolas se hace mayor, debido a las fuertes corrientes que se generan y por tanto al incremento del transporte de sedimentos, lo que se observa en la figura 16.

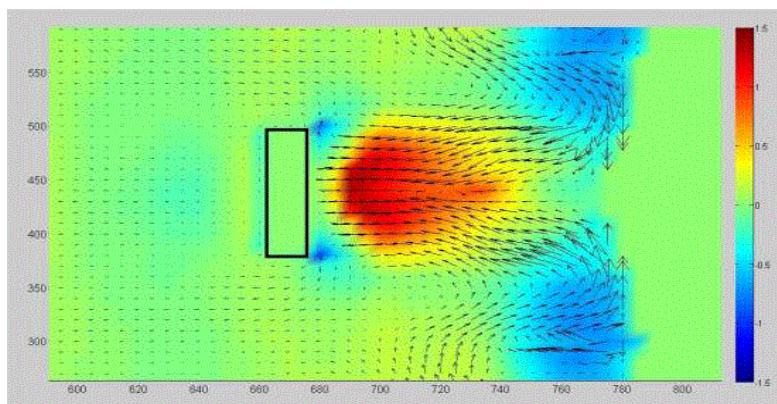


Figura 16. Transporte de sedimento para el segundo caso con distancia a la costa $X_b=90$ m

El tercer caso, con distancia $X_b=350$ m, refleja cómo, al igual que en el caso de los patrones de corrientes, el transporte de sedimentos crea celdas, que son destacadas en la figura 17. Al

abrigo del rompeolas existe una pequeña zona donde no ocurre transporte de sedimentos, debido a que los valores de altura de ola se hacen cero y las tensiones de radiación son nulas. También se presentan fuertes erosiones en los extremos protegidos del talud de la estructura.

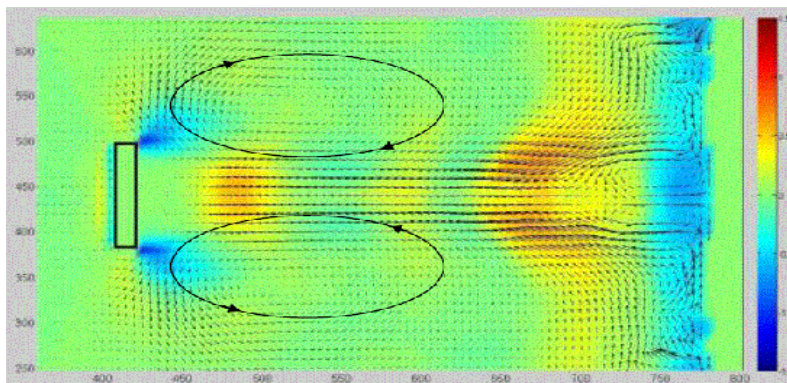


Figura 17. Transporte de sedimento para el tercer caso con distancia a la costa $X_b=350$ m

COMPARACIÓN DE LOS ROMPEOLAS SUMERGIDOS Y EMERGIDOS

Para la comparación se seleccionarán los rompeolas ubicados a una distancia de la costa de 50 m. El comportamiento de los rompeolas sumergidos puede consultarse en Cordova et al. (2016).

Altura de ola

La principal diferencia para esta variable depende de la cota de corona de los rompeolas. El rompeolas emergido es lo suficientemente alto como para no permitir el sobrepaso del oleaje, al presentar una cota de coronación de 2 m, garantizando la reducción total de la altura de ola en la zona protegida. Por su parte el rompeolas sumergido presenta una cota de coronación de -0.5 m y muestra un valor máximo de altura de ola de 0,56 m, que decrece gradualmente a medida que se aproxima a la costa. La figura 18 refleja el comportamiento de esta variable para el rompeolas emergido y sumergido.

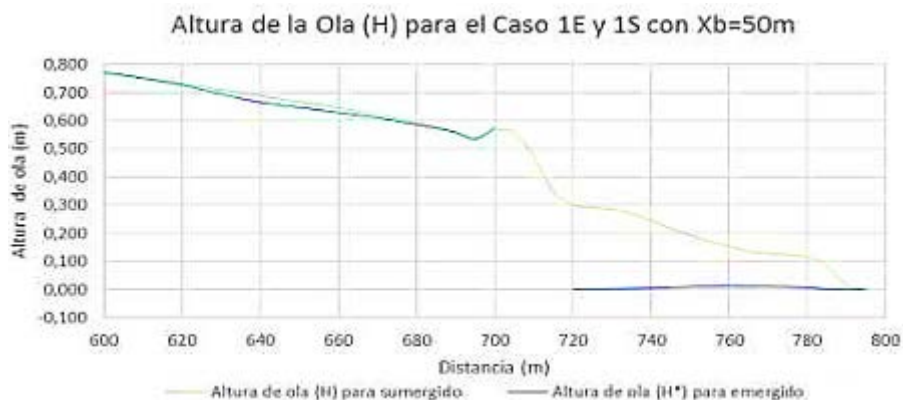


Figura 18. Altura de ola en rompeolas emergido y sumergido, distancia a la costa $X_b=50$ m

Corrientes

La hidrodinámica en ambos casos se comporta de manera diferente. Para los rompeolas emergidos las corrientes tienden a dirigirse de las zonas adyacentes hacia la zona protegida debido a la difracción del oleaje mientras que en el caso de los sumergidos se orientan de la zona protegida hacia las zonas lindantes, lo que es ocasionado por la fuerte corriente que rebasa la estructura y que una vez cercana a la costa retorna por las áreas adyacentes. La figura 19 muestra los patrones de corrientes para el rompeolas emergido y sumergido.

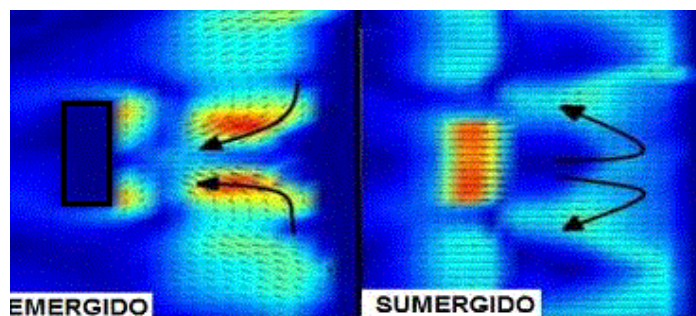


Figura 19. Corrientes en rompeolas emergido y sumergido, distancia a la costa $X_b=50$ m

Tensiones de radiación

En el caso del rompeolas emergido las tensiones de radiación son nulas en toda la zona protegida mientras que en el sumergido alcanzan un máximo sobre la estructura que disminuye progresivamente hacia la costa, lo que favorece el transporte de sedimentos, como se observa en la figura 20.

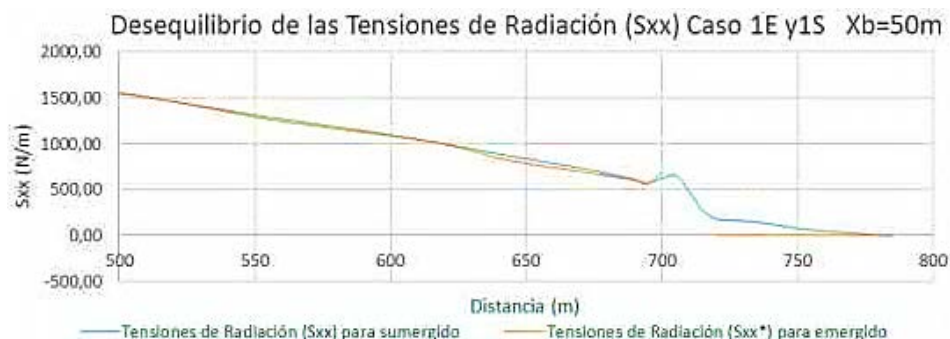


Figura 20. Tensiones de radiación en rompeolas emergido y sumergido para $X_b=50$ m

Niveles de fondo y transporte de sedimentos

Se observa para el rompeolas emergido la formación de un tómbolo, producto de la celda acumulativa generada por la difracción del oleaje que propicia el transporte de sedimentos hacia la zona de sombra. Todo lo contrario ocurre para el caso del rompeolas sumergido, donde se crea una fuerte erosión debido a las celdas erosivas generadas por las corrientes que sobrepasan la estructura. Se destaca el fuerte proceso de socavación al pie del talud en la zona protegida que ocurre para el rompeolas sumergido. El comportamiento de los niveles de fondo se aprecia en la figura 21 y en la figura 22 puede constatarse el transporte de sedimentos.



Figura 21. Niveles de fondo en rompeolas emergido y sumergido para $X_b=50$ m

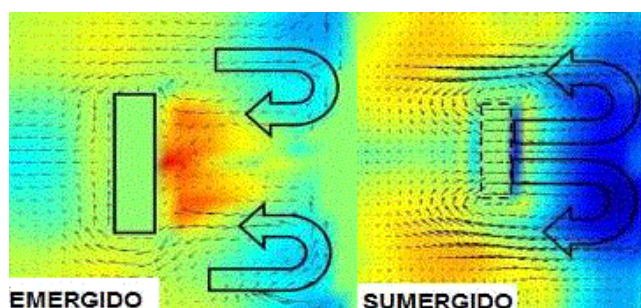


Figura 22. Transporte de sedimentos en rompeolas emergido y sumergido para $X_b=50$ m

CONCLUSIONES

- La simulación matemática de los casos de estudio definidos para la investigación utilizando el modelo Xbeach, permitió obtener diferentes respuestas morfológicas que coinciden con los resultados obtenidos por otros autores.
- En el modelo se manifiesta de manera correcta la interacción oleaje-estructura y se han logrado reproducir, mediante el comportamiento de las variables tanto hidrodinámicas como morfológicas (altura de ola, niveles del mar, tensiones de radiación, niveles de fondo, transporte de sedimento y patrones sedimentación/erosión), los diferentes procesos que ocurren en los rompeolas tanto emergidos como sumergidos,
- Los mecanismos hidrodinámicos y de transporte de sedimentos asociados con los rompeolas emergidos son completamente diferentes a los que se generan ante los rompeolas sumergidos. Por consiguiente, los criterios que actualmente se emplean para predecir la respuesta de la costa ante la construcción de rompeolas emergidos no pueden utilizarse en el diseño de los rompeolas sumergidos.
- La distancia de separación de la costa y la cota de coronación de los rompeolas son los parámetros que han sido variados en la investigación, mostrando una fuerte influencia sobre la hidrodinámica y sobre la morfología de la playa.
- En la medida que la cota de coronación del rompeolas aumenta, aumenta la protección que el rompeolas brinda al sector de playa, siendo los rompeolas emergidos los que propiciaron la generación de tómbolo/saliente y la creación de una playa estable.

REFERENCIAS

- Cáceres I., Sánchez-Arcilla A., Zanuttigh B., Lamberti A. and Franco L.** (2005). "Wave overtopping and induced currents at emergent low crested structures". *Coastal Engineering Journal*, vol. 52, no. 10-11, pp. 931-47, ISSN: 1793-6292. Elsevier, U.K.
- Córdova L.** (2014). "Sistema de ingeniería de costas: evaluación del proceso de erosión en la playa Varadero". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol 35, no. 3, pp. 17-31, ISSN: 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).
- Córdova L., Hernández K., Benítez H.** (2016). "Modelación matemática de procesos morfológicos en playas con rompeolas sumergidos". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 37, no.3, ISSN: 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Gourlay M.** (1976). "Wave setup and wave generated currents in the lee of a breakwater or headland". Fourteenth International Conference. *Coastal Engineering Proceedings*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 1976–1995. USA.
- Papadopoulos D.** (2012). "Scour below the toe of breakwaters". Master of Science thesis degree in Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Pope J. and Dean J. L.** (1986). "Development of design criteria for segmented breakwaters". *Proceedings 20th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2144-2158. USA.
- Roelvink D., Reniers Ad., Dongeren Ap., Thiel de Vries J., McCall R., Lescinski J.** (2009). "Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands". *Coastal Engineering Journal*, vol. 56, pp.1133-1152. ISSN: 1793-6292, Elsevier, U.K.
- Suh K. and Dalrymple R. A.** (1987). "Offshore breakwaters in laboratory and field". *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 113, no. 2, pp. 105-121, ISSN: 0733-950X, ASCE, USA.
- Sumer B. M. and Fredsoe J.** (2000). "Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater". *Coastal Engineering Journal*, vol. 40, pp.. 59-87, ISSN: 1793-6292. Elsevier U.K.
- Woodroof K. A.** (2012). "Determining the performance of breakwaters during high energy events: a case study of the Holly Beach breakwater system". Thesis of Master of Science degree in Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, U.S.A.