

VARIACIONES DE LA LÍNEA DE COSTA Y COMPORTAMIENTO DE LOS PERFILES DE PLAYA EN MÁS DE UNA DÉCADA EN EL SECTOR DE BOCAGRANDE, EN CARTAGENA DE ÍNDIAS, COLOMBIA

Dalia Moreno Egel y Alfonso Arrieta Pastrana

Docente Universidad de Cartagena, IHSA. Grupo de Investigación GIHMAC, Cartagena, Colombia. 57-5-6754782
Docente Universidad de Cartagena. Director IHSA. Grupo de Investigación GIHMAC. Cartagena, Colombia. 57-5-6601881
E-mail: dmorenod@unicartagena.edu.co, arrietapastrana@gmail.com

Introducción

Las zonas costeras se caracterizan por su dinámica y variabilidad en períodos cortos de tiempo, siendo el oleaje, la marea y el viento los principales responsables de estos cambios. Cartagena de Indias se ubica en la parte central de la costa Caribe colombiana entre los $75^{\circ} 30,07' O$; $10^{\circ} 29,87' N$ y los $75^{\circ} 32,86' O$; $10^{\circ} 23,45' N$, es considerada un polo de desarrollo turístico en el Caribe. Posee una zona portuaria segura gracias a su Bahía, por donde se mueve el 60% del comercio marítimo del país y acoge una zona industrial especialmente del área petroquímica. (Plan 4C: Cartagena de Indias Competitiva y Compatible con el Clima, 2014). La línea de costa del distrito de Cartagena es de 304 km., aproximadamente, siendo su principal fuente de sedimentos los provenientes del río Magdalena que desemboca al norte de la costa Caribe Colombiana. La ciudad enfrenta riesgos de inundación por efectos climáticos los que se presentan con relativa frecuencia.

Por esta razón se adelantó un estudio para identificar variaciones morfológicas y de la línea de costa en el mediano plazo y evaluar posibles efectos antrópicos sobre un sector de playas de la ciudad de Cartagena de Indias (playas de Bocagrande) Establecer una línea base para la playa que sirva para futuras evaluaciones y tratar de formular un modelo conceptual de perfil de equilibrio que mejor represente los datos de campo recopilados. El sector de playas de Bocagrande tiene una longitud aproximada 1691,5m, se extiende entre la coordenadas $837 339,53 E$ $1642 050,30 N$ y $838 544,52 E$ $1643 237,35 N$. La línea de costa presentan diferentes tipos de estructuras costeras como espolones, rompeolas y muros marginales, todos construidos con piedra de cantera. (Figura 1).

Materiales y métodos

Se midieron 6 perfiles de playa desde agosto de 2001 a enero de 2003, en octubre y noviembre de 2007 y 2008, en marzo de 2010, febrero y abril de 2013 y abril y mayo de 2016. Los perfiles de playa se levantaron utilizando estación total, nivel de precisión y mira milimétrica, desde la berma de la playa seca hasta una profundidad aproximada promedio de 1,7m. Sobre los mismos se tomaron muestras de arena en la playa seca, sobre la línea de costa y en la zona sumergida para determinar el D50 y el D90 del sedimento por tamizaje (NORMA NTC 174). Se analizó su variación en cada perfil y a lo largo de la costa, promediando los tamaños para playa seca y playa sumergida. Los perfiles batimétricos se midieron usando un bote equipado con GPSD integrado con el software HYAPACK MAX® y una ecosonda (Odom Hydrotrac II®, 24-340kHz.) desde una profundidad de 2,0m hasta 500m de distancia de la costa (profundidades entre 5 y 6 m. aproximadamente). Los datos se corrigieron por marea y se integraron con las mediciones de perfiles de playa. La precisión de las mediciones se estimó en 0,10 en la vertical y de 0,20m en la horizontal.

El clima de oleaje cercano a la costa y la altura de la ola en la zona de rotura se determinó mediante el análisis de la transformación del oleaje en aguas profundas a partir de las características del clima marítimo en la zona central del Caribe

colombiano, basados en los estudios de Otero, et al., 2016, Osorio, et al., 2016, Agudelo, et al. 2005. Los casos de oleaje se propagaron hasta aguas intermedias empleando el modelo de oleaje SWAN. Se realizó la propagación del oleaje hacia la costa desde las direcciones NNE, N, NNW, NW y W para alturas de olas de 1 a 4,7m mar afuera y periodos de 6 a 9 segundos y su posterior análisis con Oluca-SP del SMC en la zona de rompiente incluyendo la generación de corrientes y el transporte de sedimentos. Se instaló durante 1 día en el mes de junio de 2016 en la zona de estudio un perfilador de corriente Nortek con tecnología Doppler acústica (ADCP) de 2 MHz para evaluar en el sitio de rotura la altura del oleaje y comparar con los resultados de los modelos.



Figura 1.- Playas de Bocagrande en Cartagena de Indias, Colombia.

Se evaluaron los patrones de viento (velocidad y dirección) a partir de registros de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el Aeropuerto de la ciudad y se consultaron registros de tormentas tropicales y huracanes en las bases de datos de la NOAA. Las direcciones de aproximación del oleaje en rotura se midieron en el campo con una brújula durante el levantamiento de los perfiles de playa. La evolución de la línea de costa se realizó a partir de ortofotos de 2005, ortofotomapas obtenidos de GoogleEarth, correspondientes a los años 2007 (abril) y levantamientos de línea de costa de los años 1985, 2001 y 2010 y 2016 y se confrontaron con los datos de los perfiles medidos.

Los perfiles de playa para las diferentes épocas de las mediciones se superpusieron, se les determinó el punto de cierre de forma teórica (Hallermeier, 1981) y se evaluó la variación del ancho de la zona de rompiente. Los perfiles de playa se ajustaron a la ecuación de Dean (1977) determinando las pendientes medias, las componentes principales para cada perfil y mediante ajuste por mínimos cuadrados y análisis de correlaciones se determinó el mejor ajuste evaluando el parámetro A y el exponente n . También se ajustaron los perfiles a la ecuación de Bodge (1992) ajustando los parámetros B y K .

Resultados y conclusiones

La playa se clasificó como ola dominante y expuesta de acuerdo con los parámetros, escala de la ensenada δ' (Klein y Menezes, 2001; Shore y Masselink, 1999), y el parámetro velocidad adimensional de caída del grano (Ω) (Wright y Shore, 1984) calculados para esa playa por Moreno et al, (2004), los que se verificaron para los perfiles del 2007, 2008, 2010, 2013 y 2016. En general las alturas de olas que se presentan en el sector para las direcciones N-NE consideradas en la modelación variaron entre 1,2 y 1,5m, con valores alrededor de 0,25 m cuando los trenes de onda se acercan a la línea de costa. Para oleajes del sector N-NO, las alturas promedio son de 1,75 a 2,0 con valores cercanos a 0,6 cuando se aproximan a la costa. Para oleajes con H mayores a 1,5m la playa se comporta como disipativa y para oleajes pequeños y calma ($H < 1m$), como intermedia. El tipo de rotura del oleaje más frecuente es descrestamiento (*spilling*) y voluta (*plunging*) dependiendo de la época climática. Para el día de las mediciones y fondeo del correntómetro (año 2016), las alturas de ola en la zona de rompientes variaron entre 0,32 y 0,42m con rangos de períodos de 6,8 a 7,8 s., con orientación promedio del NNO (320°), con vientos de dirección NO. Para estas alturas de olas, la rotura predominante fue descrestamiento, con valores del número de Iribarren a la rotura entre 0,2 y 1,0. En cuanto al estado morfodinámico, el parámetro de velocidad adimensional de caída del grano (Ω), varió entre 1,9 y 2,5, indicando un estado intermedio en la playa para el día de las mediciones.

El tamaño del sedimento se clasificó como una arena fina según el sistema unificado de clasificación de suelos de la ASTM, con diámetro promedio D_{50} entre 0,17 y 0,21mm, un diámetro medio promedio de 0,20 mm para toda la playa y un D_{90} entre 0,26 y 0,30 mm, notándose un leve incremento en estos valores comparados con datos obtenidos de 2001 y 2002, lo que podría indicar una mayor energía del oleaje. Los tamaños del sedimento variaron a lo largo de la playa de sur a norte aumentando su tamaño hacia el norte.

Las variaciones de la línea de costa sobre los perfiles medidos en campo se caracterizaron por presentar retrocesos durante la época de vientos Alisios (N-NE), especialmente en los meses de marzo y abril, con recuperación en los meses de lluvia principalmente en los meses de agosto, octubre y noviembre. Sin embargo, esto no ocurre cuando se presentan tormentas en el Caribe o frentes fríos como se registró en las mediciones del mes de marzo de 2013, para estos fenómenos los cambios son bruscos.

Los anchos de la playa seca variaron de sur a norte, siendo mayores hacia el sur, presentando el mismo comportamiento en los años de medición. El perfil que presentó mayores retrocesos en la línea de costa fue el perfil 8 el que se encuentra ubicado entre dos rompeolas, siendo el tipo de estructura de protección, otro factor de modulación de la línea de costa (Figura 2). En los diferentes años de medición, el ancho de la playa seca y por consiguiente la línea de costa, varió en un rango promedio de 15m en el perfil 6, de 20m en los perfiles 7 y 8 y de 5 m en el perfil 9, siendo congruente con las variaciones del tamaño del sedimento a lo largo de la playa. También se estableció una variación promedio de la línea de costa con retrocesos y avances promedio de 5 a 10 m dependiendo de la época climática (Figura 3).

Los perfiles de playa presentaron pendientes medias entre 0,8 y 1,9%, con profundidades de cierre entre los 4,0 y 4,5m. Se estimó una ecuación de perfil de equilibrio de Dean para la playa encontrándose el mejor ajuste para la expresión: $h = 0,078 X^{0,77}$ la que ajustó mejor los perfiles en el 76,5% de los casos, teniendo un mayor porcentaje de ajuste para los perfiles 6



Figura 2.- Retroceso en la línea de costa en la zona del perfil 8 entre los años 2008 (línea gris), 2013(línea negra) y 2016 (línea blanca).

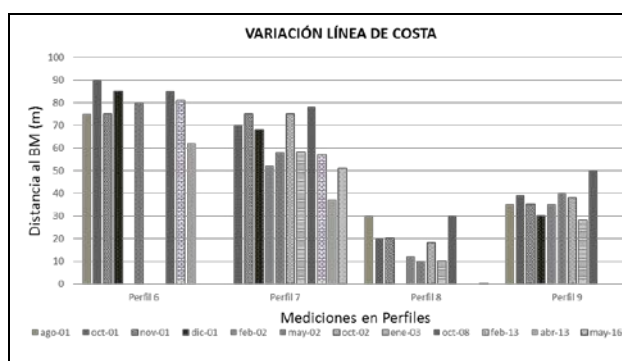


Figura 3.- Variaciones de la línea de costa en diferentes épocas del año registradas en los perfiles 6, 7, 8 y 9 (de izquierda a derecha) en diferentes meses en los años 2001 a 2003, 2008, 2013 y 2016.

y 7. Sin embargo, se obtuvo un mejor ajuste con la ecuación de Bodge, con $B = 4,67$ y $K = 7,3 \cdot 10^{-3}$ con % de errores menores que con la ecuación de Dean ajustada, especialmente en los perfiles 8 y 9.

Referencias

- A. F. Osorio, R. D. Montoya, J. C. Ortiz, D. Peláez. (2016). "Construction of Synthetic Ocean Wave Series Along the Colombian Caribbean Coast: A Wave Climate Analysis". *Applied Ocean Research*. 56.2016. pp. 119-131.
- Alcaldía de Cartagena de Indias, MADS, INVEMAR, CDKN, Cámara de Comercio de Cartagena. (2014). *Plan 4C: Cartagena de Indias Competitiva y Compatible con el Clima*. Serie de Publicaciones Generales del INVEMAR No. 63. Santa Marta.
- D. Moreno-Egel, M. Agámez, E. Castro, G. Voulgaris. (2006) "Beach Morphology and Coastal Protection along Headland Bays in Cartagena de Indias, Colombia" *Journal of Coastal Research* SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), 2006. pp. 1658 - 1664. Itajaí, SC, Brazil
- L. J. Otero, J. C. Ortiz-Royero, J. K. Ruiz-Merchan, A. E. Higgins, and S. A. Henriquez (2016). "Storms or Cold Fronts: what is Really Responsible for the Extreme Waves Regime in the Colombian Caribbean Coastal Region?" *Natural Hazards Earth System Sciences*, 16, pp.391-401
- L.D. Wright, A.D. Short. (1984) "Morphodynamics Variability of Surf and Beaches: a Synthesis". *Marine Geology*, Vol. 56. 1984. pp. 93-118.
- P. Agudelo, A.F. Restrepo, R. Molares, C. Tejada, R. Torres, A.F. Osorio. (2005) "Determinación del Clima de Oleaje Medio y Extremal en el Caribe Colombiano". *Boletín Científico CIOH* No 23. 2005. pp. 33-45
- R.J. Hallermeier. (1981) "A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate". *Coastal Engineering*. Vol.4. pp 253-277.