

Swash excursion patterns at two contrasting beaches: Hollywood and Costa Verde beach, Colombia

Jennifer Montaña-Muñoz ^a, Andrés F. Osorio ^a & Luis Otero ^b

^a Grupo de Investigación, OCEANICOS, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. fer7062@gmail.com, afosorioar@unal.edu.co

^b Grupo de Investigación en Geociencias GEO4, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. ljotero@uinorte.edu.co

Received: March 17th, 2017. Received in revised form: November 21th, 2017. Accepted: January 30th, 2018

Abstract

The swash zone is the part of the beaches that are consecutively dry and wet due to the rise and fall of the sea by waves and tides. This zone is particularly important in beach systems, as here erosion and accretion of the coastline and coastal inundation occur; therefore, understanding of the dynamics in this zone allows the prediction and mitigation of potential impacts on beaches, dunes and coastal structures under different climate scenarios.

In situ measurements of variables such as pressure, velocity and sediment concentrations on the swash were carried out for the first time at two beaches in the Colombian Caribbean: Costa Verde beach, (Ciénaga) and Hollywood beach (Cartagena). The data were used to compare the velocity and sediments transport patterns in the swash zone due to the beach slope on this zone and to the influence of different wave frequencies (IG or SS). In addition, a first approximation to link small spatio-temporal scales (swash cycles) with larger spatio-temporal processes (erosion-accretion) was carried out.

Keywords: swash zone; velocities; concentrations; uprush; backwash; infragravity waves (IG); Sea-Swell waves (SS).

Patrones en las excursiones de swash en dos playas contrastantes: Playas Hollywood y Costa Verde, Colombia

Resumen

La zona de swash es la parte de la playa que esta consecutivamente seca y húmeda debido al ascenso y descenso del mar producto del oleaje y la marea. Esta zona es de gran importancia en los sistemas de playas, ya que allí se desarrollan los procesos de erosión/acreción de la línea de costa y las inundaciones; por lo tanto, el entendimiento de las dinámicas que ocurren en esta zona son vitales para predecir y mitigar los posibles impactos en playas, dunas y estructuras costeras bajo diferentes escenarios climáticos.

Mediciones de variables in situ como presiones, velocidades y concentraciones de sedimento en la zona de swash, fueron llevadas a cabo en dos playas en el Caribe Colombiano: Playa Costa Verde, (Ciénaga) y Playa Hollywood, (Cartagena). Los datos fueron usados para comparar los patrones de velocidades y concentraciones de sedimentos en la zona de swash debido a la influencia de la pendiente de la playa en esta zona y la influencia de las diferentes frecuencias de las ondas (infragravitatorias (IG) o Sea-Swell (SS)). Adicionalmente, se propone una aproximación para ligar pequeñas escalas espacio-temporales (ciclos de swash) con procesos espacio-temporales mayores (erosión-acreción).

Palabras clave: zona de swash; velocidades; concentraciones; uprush; backwash; ondas infragravitatorias (IG), ondas Sea-Swell (SS)

1. Introducción

Las playas son el resultado de un balance dinámico entre los procesos marinos y terrestres, cumplen diversas funciones entre ellas se puede destacar; uso turístico, habitat de

ecosistemas importantes y protección costera. Estas funciones se ven afectadas por los procesos erosivos que ocurren en las playas, aumentando los riesgos para los ecosistemas presentes y el desarrollo humano en estas regiones. En este contexto, la predicción de la evolución de

How to cite: Montaña-Muñoz, J., Osorio, A.F. and Otero, L., Patrones en las excursiones de swash en dos playas contrastantes: Playas Hollywood y Costa Verde, Colombia. DYNA, 85(204), pp. 264-271, March, 2018.

las playas es necesaria para la planificación y toma de decisiones relacionadas con el desarrollo de las zonas costeras alrededor del mundo. Esto es particularmente importante ante los impactos del cambio climático en la costa como el incremento del nivel del mar y la intensificación del oleaje, especialmente en costas de baja elevación y en países en vías de desarrollo. Sin embargo, la necesidad de comprender los procesos en estos sistemas y el desarrollo de modelos que describan su evolución bajo diferentes forzadores, requieren un conocimiento profundo de los procesos físicos de pequeña escala (espacio-temporal) que tienen lugar en las playas. Gran parte de estos procesos se producen en la zona de ascenso-descenso (conocida en inglés como zona de swash).

La zona de swash se define como la parte de la playa que esta consecutivamente húmeda y seca debido a los movimientos del mar: olas y mareas. Sin embargo, ésta definición es obsoleta durante condiciones de oleaje extremo [1]. La zona de swash es una de las áreas más dinámicas en la región cercana a la costa, caracterizada por flujos fuertes e inestables, altos niveles de turbulencia, grandes tasas de transporte de sedimentos y cambios morfológicos en amplias escalas espaciales y temporales [2]. Las dinámicas de la zona de swash son particularmente importantes debido a que en esta tiene lugar el intercambio de sedimentos entre la zona subaérea y subacuática de la playa, lo que contribuye de manera significativa a procesos de acreción y erosión de la línea de costa. Además, una fracción importante del transporte longitudinal de sedimentos se produce en esta zona contribuyendo en gran medida a la deriva litoral total [2,3].

Por las razones mencionadas anteriormente, el interés en estudiar las dinámicas en la zona de swash se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas [3].

Sin embargo y a pesar de la importancia de la zona de swash para varios propósitos prácticos, aún existen considerables incertidumbres fundamentales acerca de la dinámica de esta zona debido a la complejidad de los procesos y a la dificultad de mediciones directas en entornos de alta energía. El empleo de la información de corto plazo para predecir la evolución de largo plazo para su aplicación en ingeniería costera es uno de los principales retos para la comunidad científica avocada al estudio de esta zona.

En la literatura están indicados como relevantes una serie de procesos hidrodinámicos en la zona de swash a pequeña escala, algunos de ellos son descritos a continuación:

1.1. Hidrodinámica de la zona de swash

La excursión del swash incluye un patrón cíclico comprendido por el *uprush* (ascenso de la lámina de agua) y *backwash* (descenso de la lámina de agua). Durante el *uprush* existe una disminución en la velocidad del flujo (debido a la fricción con el fondo y la fuerza de la gravedad) hasta llegar a cero. En general, la aceleración *uprush* es corta y fuerte y las velocidades alcanzan una mayor magnitud que en el *backwash*, en el cual la velocidad aumenta de nuevo, pero dirigida hacia el mar [4].

Las diferencias en la velocidad del agua en los ciclos del swash dependen del estado de la playa (playas disipativas, intermedias y reflejantes). Se ha encontrado que las

velocidades durante el *uprush* y el *backwash*, son mayores en playas reflejantes (mayor pendiente) que en las playas disipativas [5-7]. Además de los cambios en los campos de velocidad y en las profundidades de la lámina de agua, también las características de infiltración y exfiltración del agua dentro y fuera de la matriz de sedimentos dependen de los tipos de playa, de las características de los sedimentos y de las condiciones de contorno. Estos procesos de infiltración / exfiltración pueden generar cambios en la estructura de la capa límite que afectan el esfuerzo cortante en el lecho, la turbulencia y la movilidad de sedimentos [7].

Uno de los principales vacíos en la comprensión de los procesos de la zona de swash es la dinámica de los procesos turbulentos, principalmente debido a la complejidad de la recopilación de datos en esta zona altamente energética. Diferentes características de la turbulencia se han descrito para cada una de las etapas del ciclo del swash. Durante el *uprush*, los procesos turbulentos predominan debido a los *bores*, mientras que el *backwash* es dominado por fuerzas cortantes en el lecho. Sin embargo, [8-10] mostraron que la energía cinética turbulenta fue mayor que las fuerzas cortantes en el lecho y casi igual durante el *uprush* y el *backwash*. Esta diferenciación en los procesos dominantes durante cada ciclo del swash está relacionada con el tipo de transporte de sedimento que se presenta durante cada uno de estos ciclos.

Especialmente los procesos de interacción swash-swash (colisión entre *uprush* / *backwash*), pueden cambiar los patrones en la dinámica swash, generando vórtices en el *backwash* que probablemente son los mecanismos de erosión y suspensión de sedimentos más eficientes, sin embargo, estas interacciones no han sido investigadas en detalle con datos de campo en playas naturales.

Los aspectos anteriores y otros como la capa límite, los esfuerzos cortantes, los gradientes de presión y las asimetrías de las ondas generan también cambios en las dinámicas de esta zona.

1.2. Oscilaciones del swash en la banda de Sea-swell e infragravitatoria

Las ondas pueden descomponerse en períodos de Sea-Swell (SS) que son ondas de períodos cortos ($4 \text{ s} < t < 20 \text{ s}$) y períodos de infragravedad (IG), ondas largas con períodos entre $20 \text{ s} < t < 300 \text{ s}$. Las oscilaciones del swash en la banda de SS son el resultado del colapso de bores controlados por la disipación de estas frecuencias, mientras que las oscilaciones del swash en la banda de infragravedad son el resultado de la no-rotura de las ondas IG, que se reflejan en la playa y pueden generar ondas estacionarias y ondas de borde, las cuales son responsables del transporte de sedimentos y de las formas ondulatorias (procesos 3D) en el frente costero (ej. "beach cusps"). Finalmente, esto va a condicionar la pendiente y el tipo de playa (playas reflejantes, disipativas o intermedias).

El tipo de movimiento del swash (SS o IG) puede cambiar los patrones en la cinemática del flujo interno. Por ejemplo, si las oscilaciones del swash son dominadas por ondas IG, los movimientos en el *uprush* y *backwash* son más simétricos, y las variaciones en las profundidades del flujo aumentan

gradualmente; en cambio, las oscilaciones del swash inducidas por bores en la banda de SS, muestran que las duraciones del backwash son típicamente mayores y hay un aumento muy rápido de la profundidad durante el uprush que subsecuentemente vuelve de nuevo a cero durante el backwash [7]. Estas diferencias en las dinámicas del swash debidas a oscilaciones de SS o IG pueden causar diferencias en los modos de transporte de sedimentos y direcciones residuales hacia la costa o hacia el mar [8].

El tipo de movimiento prevalente en la zona de swash (SS o IG) depende de las condiciones de las ondas incidentes y la morfología de la playa. Varios estudios han encontrado que cuando las ondas incidentes se reflejan en la costa (playas intermedias y reflejantes), la energía de SS domina el espectro de swash [11-14] y cuando las ondas incidentes son disipadas por la rotura de las olas en la zona de rompientes (playas disipativas o condiciones offshore altamente energéticas), las frecuencias en la banda IG dominan el espectro de swash [15-16]. Además, [10] encontraron en una playa intermedia que durante la marea baja las ondas IG dominaron la energía en la zona de swash, mientras que durante la marea alta la energía en la zona de swash estuvo dominada por las ondas SS. La influencia de las ondas IG en la zona de swash durante eventos extremos, también ha sido encontrada por diferentes autores [9], [15], lo que ha permitido incorporar el efecto de las ondas IG en los modelos de run-up, sin embargo la incorporación de estas ondas en formulaciones de transporte de sedimentos durante estos eventos ha sido menor [1]. Esto también es válido para eventos de swash individuales y escalas de tiempo en la banda de SS, pero se ha realizado menos énfasis en los esfuerzos cortantes en el lecho, la hidrodinámica y el transporte de sedimentos asociados con las ondas IG.

1.3. Transporte de sedimentos

En las playas ocurren procesos morfodinámicos longitudinales y transversales. En dichos procesos morfodinámicos interactúan muchos agentes (condiciones hidrodinámicas, tipo de rotura, pendiente de las playas, tipo de grano, etc), sin embargo se puede caracterizar el transporte de sedimentos que ocurre en la dirección transversal, como el impulsado por las ondas en dirección hacia el mar o hacia la costa, mientras que el transporte de sedimentos que ocurre en la dirección longitudinal ocurre de manera paralela a la orientación de la línea de costa. Comúnmente, se supone que los flujos en la zona de swash actúan sólo en dirección transversal a la costa, a pesar de que los procesos a lo largo de la orilla de la playa pueden desempeñar un papel importante en el transporte de sedimento total en las zonas cercanas a la costa. La influencia de los flujos longitudinales en la turbulencia, los esfuerzos cortantes en el lecho, movilización de sedimentos y la variabilidad morfológica tiene aún preguntas de investigación abiertas [1].

Sin embargo, hablar de procesos de transporte transversal y longitudinal no es suficiente desde la óptica hidráulica. Tres principales tipos de transporte son relevantes en la zona de swash: transporte de arrastre de fondo, transporte de suspensión y transporte de flujo

laminar (*sheet flow*, similar al transporte de arrastre de fondo, pero con muy altos esfuerzos cortantes durante flujos fuertes). Debido a las pequeñas profundidades de agua en la zona de swash, se espera que el transporte de arrastre de fondo (o flujos laminares) sea dominante en esta zona. Sin embargo, el sedimento puesto en suspensión debido al colapso de los bores y posteriormente transportado por las oscilaciones en la zona de swash, también podría ser un mecanismo importante de transporte de sedimentos, o incluso ser dominante en esta zona de la playa [4]. Hasta la fecha, la interacción de la turbulencia, la permeabilidad (infiltración / exfiltración), y el transporte de sedimentos se han estudiado principalmente a través de experimentos de laboratorio [16] y modelos numéricos [17], lo que necesariamente se basa en supuestos y simplificaciones. En los últimos años y gracias al desarrollo de nuevos instrumentos de medición, se han incrementado los estudios en playas naturales, dirección en la cual deben ir encaminadas futuras investigaciones.

En general, las mediciones de un ciclo completo de swash son complicadas, especialmente en las primeras partes del ciclo, debido a los procesos complejos que se dan en esta zona como la interacción swash-swash o el colapso del bore debido a que generan alta turbulencia y están cargados de burbujas, condiciones en las que los sensores ópticos y acústicos comunes pueden fallar. Por otro lado, la última parte del ciclo de swash (backwash) deja sólo una película delgada de agua, donde, en la parte final del ciclo, el nivel de agua cae por debajo de alcance de los sensores.

Una de las principales incertidumbres que aún persiste es como relacionar estos procesos de pequeña escala con los procesos de avance y retroceso de la línea de costa [1]. Esto incluye las observaciones directas, además de herramientas de sensores remotos como imágenes de video o metodologías basadas en imágenes LIDAR, u otras alternativas para estudiar esta compleja zona.

En el presente trabajo se analizan los patrones de velocidades y transporte de sedimentos en dos playas en el Caribe Colombiano, Costa Verde (Ciénaga) y Hollywood (Cartagena), con el fin de encontrar diferencias en su comportamiento atribuidas a la pendiente en la zona de swash. Y posteriormente se realiza una aproximación entre las pequeñas escalas (segundos – metros) con procesos erosivos en escalas espacio-temporales mayores (meses - Kilómetros) en la playa de Costa Verde.

2. Métodos

Las mediciones para el análisis del transporte de sedimentos en la zona de swash, se llevaron a cabo en las campañas de campo de Enero-Febrero de 2014 en la playa Hollywood, Cartagena y en Febrero de 2015 en la misma playa Hollywood y en la playa de Costa Verde, Ciénaga.

Ambas playas presentan una zona de rompientes altamente disipativa, sin embargo, sus respectivas zonas de swash exhiben pendientes contrastantes. A pesar de que la zona de rompientes en la playa Costa Verde es más disipativa ($\beta = 0.03$), su zona de swash tiene una pendiente reflejante ($\beta = 0.09$) como se muestra en la Fig. 1.

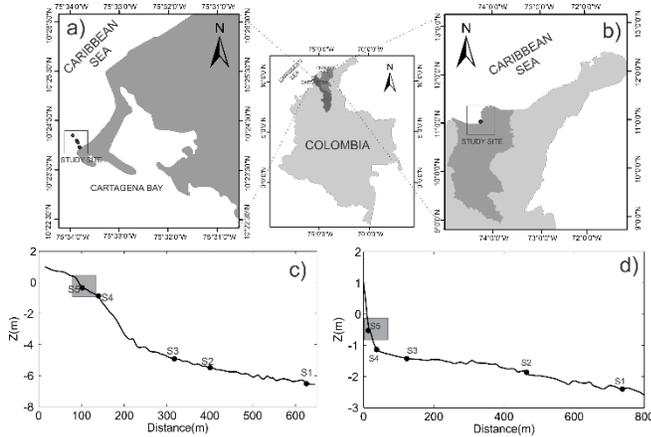


Figura 1. Zonas de estudio a) y c) Localización y Perfil Playa Hollywood, Cartagena c) y d) Localización y Perfil Playa Costa Verde, Ciénaga. Fuente: Autores

En las diferentes campañas fue diseñado un montaje para la medición de velocidades transversales y longitudinales en la zona de swash (Fig. 2), a través de un ADV Nortek (Acoustic Doppler Velocimeter) con una frecuencia de muestreo de 10 Hz para la campaña de 2014 y 20 Hz para las campañas de 2015.

Presiones y concentraciones fueron medidas a través de una sonda multiparamétrica OBS 3A Campbell con una frecuencia de muestreo de 1 Hz y 2 Hz, para las campañas de 2014 y 2015, respectivamente. Este sensor fue instalado en la zona de swash, junto con el ADV, a 15 cm del lecho, permitiendo estimar el transporte de sedimentos en esta zona.

El ADV permite medir el perfil de velocidades en una celda de 3 cm, sin embargo se observó que la variación de la velocidad fue mínima en las celdas medidas, por lo que se optó por trabajar con la velocidad promedio en el perfil.

El OBS muestra las mediciones en “counts”. Para obtener la transformación de counts a unidades de concentración es necesario hacer la calibración del equipo con los sedimentos de la zona. Sin embargo, para los propósitos acá analizados, las mediciones muestran las variaciones de las concentraciones, por lo que no se calibró el equipo.

El montaje usado para las mediciones es mostrado en (Fig. 2). Además, durante la campaña de campo se dispuso de un arreglo de sensores transversales a la playa para la medición de presiones y velocidades (Fig. 1,c,d). Siendo S1 el sensor más alejado de la costa y S5 el montaje de la zona de swash.

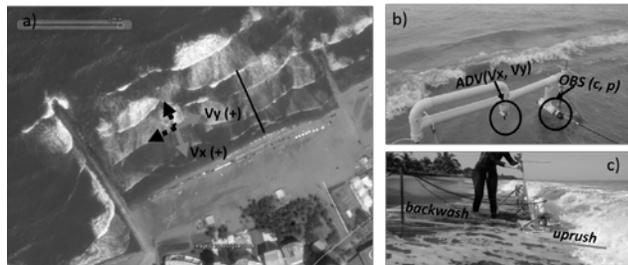


Figura 2. a) Configuración del sensor de velocidades (velocidades positivas flechas grises) b) Montaje de equipos para la medición de velocidades y concentraciones en la zona de swash c) Backwash y uprush Fuente: Autores

3. Resultados

Para analizar la influencia de la pendiente de la zona de swash en las principales variables que controlan el transporte de sedimentos en esta zona, se realizó un análisis de las diferentes series medidas en la campaña de 2015 en las dos playas de estudio.

La Fig. 3 muestra un ejemplo de la evolución de la energía en la playa Costa Verde, Ciénaga. Como puede ser visto, en el sensor S1 (panel superior), la energía de SS domina el espectro de energía (peridos ~ 8 s o menores). Además, se observa que en los sensores cercanos a la costa, la energía IG comienza a ser igual de importante (peridos ~ 16 s o superiores) (Fig. 3 panel inferior)

Similares resultados a los observados en la Fig. 3, fueron encontrados en la Playa Hollywood, sin embargo, en los sensores cercanos a la costa, la energía SS fue casi totalmente disipada, con lo que la energía IG dominó el espectro (no mostrado). Estos cambios en la distribución de la energía cerca de la costa, pueden ser explicados debido a las diferencias en las pendientes en las zonas más cercanas a la costa (zona de swash). Playas más disipativas (Hollywood, Cartagena) tendrán más influencia de las ondas IG, mientras la energía de SS es disipada en la zona de rompiente. Por el contrario, playas con pendientes más reflejantes causaran menos disipación de la banda SS.

En las Figs. 4 y 5 se observan los valores de profundidades, velocidades transversales y longitudinales y concentraciones de sólidos suspendidos, para la playa de Ciénaga y Cartagena, respectivamente. Una comparación entre ambas figuras, muestra que las profundidades (presiones) en la zona de swash son mayores en Ciénaga (zona de swash reflejante). Además se observa una simetría entre el uprush y backwash, con duraciones promedio en los ciclos de swash es de aproximadamente 8 segundos, observándose una separación temporal entre ciclos de swash consecutivos, sin interacciones swash-swash considerables (Fig. 4a).

La Fig. 4b muestra que las velocidades transversales a la playa V_x (línea negra), alcanzan magnitudes hasta de 1.8 m/s en el uprush y backwash, sin embargo, se observa que no es posible capturar el ciclo completo de swash, principalmente durante el backwash, esto puede ser debido a la alta pendiente en esta zona y la porosidad de la playa, lo que hacía que la lámina de agua se redujera rápidamente impidiendo la medición de esta variable por el equipo. También se observa que las velocidades longitudinales tienen magnitudes hasta de 1.2 m/s, siendo principalmente negativas (dirección S-O, Fig. 7). Es importante notar también que la diferencia registrada en el perfil de velocidades transversales en la Playa de Costa Verde, Fig. 4b, se debe a que la duración del uprush es menor que la del backwash, indicando el trabajo efectivo de las tensiones de corte con el fondo en el retardo del flujo.

En la Fig. 4, al comparar las gráficas correspondientes a las velocidades y a las concentraciones de sedimentos representadas en counts, se pueden apreciar comportamientos asimétricos entre el uprush y el backwash, con magnitudes muy bajas en este último. Esto puede ser debido a que el transporte de fondo y/o el transporte de flujo laminar es mucho mayor que el transporte en suspensión, sin embargo,

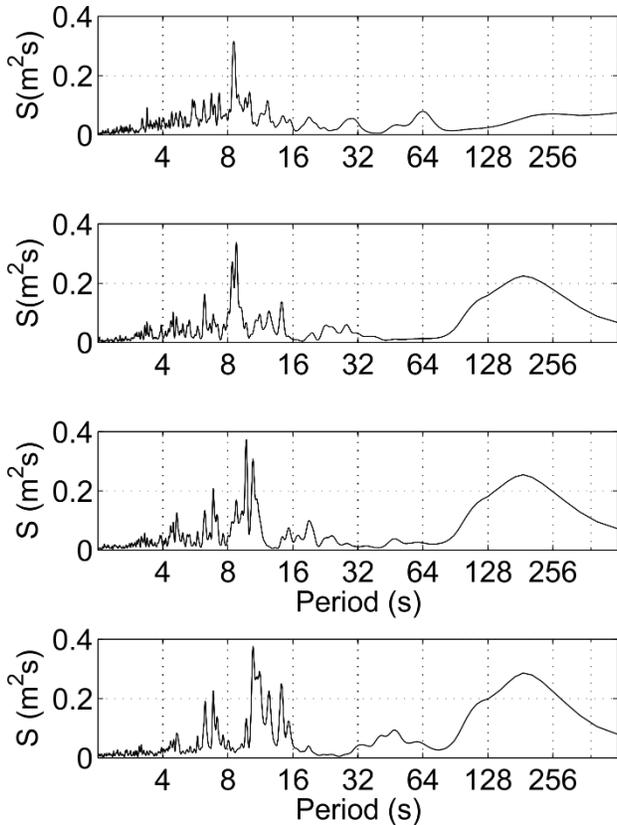


Figura 3. Evolución de los espectros de densidad de energía Ciénaga desde aguas intermedia hasta aguas someras. Panel superior: Sensor S1. Panel Inferior: Sensor S4.
Fuente: Autores

debido a la robustez del instrumento es posible que éste no registrara valores de concentraciones de sólidos suspendidos, debido a la reducción súbita de la lámina de agua.

Por otra parte, la Fig. 5a muestra que las presiones en la zona de swash en la playa Hollywood (zona de swash disipativa) presenta ciclos de swash promedio más largos que los registrados en Ciénaga, además se observa que los ciclos no son completos (existencia de interacción swash-swash). Las velocidades en esta zona (V_x y V_y) fueron mucho menores a las registradas en Costa Verde porque la energía asociada a la banda SS se ha disipado por completo a su llegada a la zona de swash, predominando la energía en la banda IG en esta parte de la playa. Esto también ha permitido observar en muchos casos el ciclo completo de velocidades (*uprush* y *backwash*); además las velocidades longitudinales y transversales muestran un comportamiento y magnitudes similares (Fig. 5b) contrario a lo reportado en Costa Verde. Los valores de concentraciones de sólidos, fueron menores que los medidos en Costa Verde, sin embargo, se observó el mismo comportamiento, con valores muy bajos durante el backwash.

Una comparación más detallada de los resultados descritos anteriormente, es mostrada en la Fig. 6, donde se analizan dos ciclos de swash consecutivos en ambas playas. La Fig. a y b muestran que dos ciclos de swash consecutivos en playa Hollywood (Cartagena), equivalen a 2.5 veces el tiempo necesario para dos ciclos de swash en la playa de Costa Verde (Ciénaga).

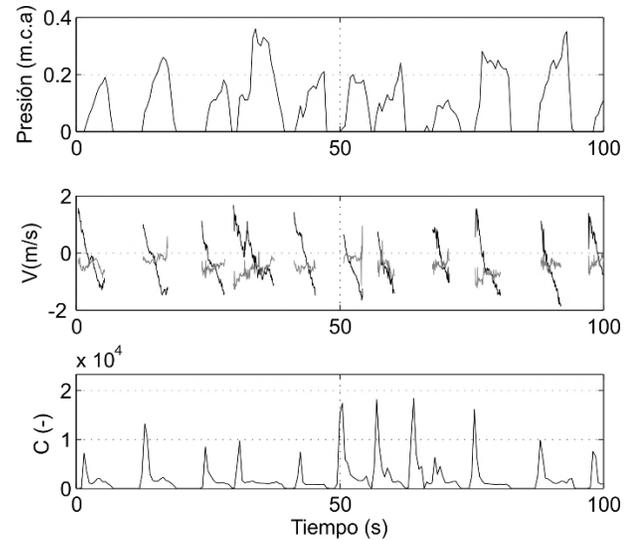


Figura 4. Variables medidas en la zona de swash en la playa Costa Verde (Ciénaga), Febrero de 2015. Panel Superior a) Presiones, panel medio b) Velocidades transversales $-V_x$ (línea negra) y longitudinales $-V_y$ (línea gris), panel inferior c) concentración de sólidos suspendidos.
Fuente: Autores

En la Fig. 6c y d se observan detalladamente las diferencias en los patrones de velocidades, mostrando que en la playa Hollywood (Cartagena) fue posible capturar ciclos de velocidades completos e interacciones swash-swash, presentando magnitudes y direcciones similares en dirección transversal y longitudinal durante el uprush y el backwash. El comportamiento de las velocidades similares transversales y logitudinales para playa Hollywood (Fig 6d) se podría explicar por el hecho de que la playa se encuentra entre dos espolones y por tanto puede estar dejando atrapada parte de la energía liberada IG en ondas de borde, sin embargo esta hipótesis se debe profundizar con mediciones de mayor detalles. Por el contrario, en Costa Verde (Ciénaga) las velocidades transversales y longitudinales

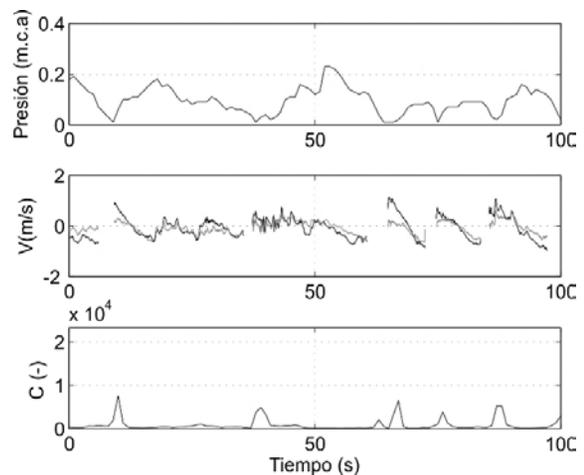


Figura 5. Variables medidas en la zona de swash en la playa Hollywood (Cartagena), Febrero de 2015. Panel superior a) Presiones, panel medio b) Velocidades transversales $-V_x$ (línea negra) y longitudinales $-V_y$ (línea gris), panel inferior c) concentración de sólidos suspendidos.
Fuente: Autores

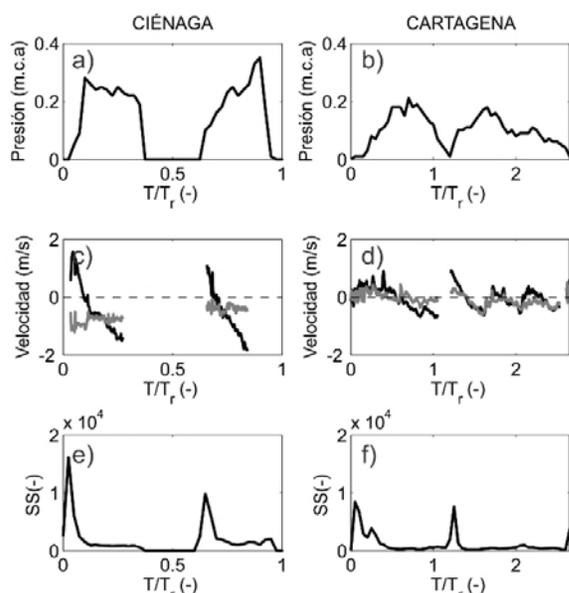


Figura 6. Dos ciclos de swash consecutivos en la playa Hollywood (Cartagena) (a,c y e) y en la playa Costa Verde (Cienaga) (b,d y f), Febrero de 2015. a) y b) Presiones; c) y d) Velocidades transversales- V_x (línea negra) y longitudinales- V_y (línea gris); e) y f) concentración de sólidos suspendidos. T_r equivale al tiempo de referencia (duración de dos ciclos de swash consecutivos en Costa Verde). Fuente: Autores

tuvieron diferente comportamiento, siendo estas últimas principalmente negativas.

La Fig. 6e y f muestran comportamientos muy similares en los patrones de concentración en ambas playas, a pesar de las diferencias en las demás variables medidas, incluso en la playa Hollywood (Cartagena) no son observadas interacciones swash-swash en esta variable, lo que puede ser debido a las limitaciones de la técnica de medición con el OBS, como fue argumentado anteriormente.

Para entender las implicaciones que tienen estas altas velocidades longitudinales negativas en los procesos erosivos presentados en la playa de Costa Verde, se muestra la Fig. 7, donde se observa la evolución de la línea de costa desde Julio de 2005 hasta Noviembre de 2014. La Fig. 7, a muestra la línea base en Julio de 2005, antes de la construcción de dos espolones y la Fig. 7b muestra el estado de la costa en Noviembre de 2014. En este periodo de tiempo fueron analizados un total de 15 fechas diferentes, de las cuales 5 estuvieron comprendidas entre Julio de 2005 y Enero de 2012 (antes de la construcción del espolón), en las cuales no se observaron cambios significativos en la línea de costa.

Por el contrario, cuando se analiza la evolución de la línea de costa entre Enero de 2012 y Mayo de 2012, se observa en este corto intervalo de tiempo, un retroceso en la línea de costa en la margen izquierda del espolón de aproximadamente 40 m, ésta erosión se extiende hasta 1 kilómetro de la margen izquierda del espolón. En la Fig. 7c se muestran algunas de las líneas de costa analizadas antes y después de la construcción del espolón.

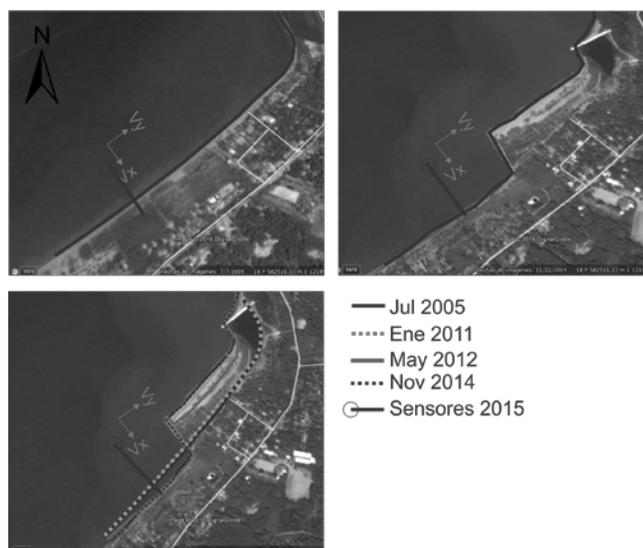


Figura 7. Evolución de la línea de costa en la playa Costa Verde antes y después de la construcción del espolón. a) línea base en Julio de 2005, antes de la construcción de dos espolones, b) la costa en Noviembre de 2014, c) líneas de costa analizadas antes y después de la construcción del espolón. Fuente: Autores

Debido a las altas velocidades longitudinales negativas V_y (en dirección NE – SW), observadas en las Fig. 4b y Fig. 6c y la interrupción del suministro de sedimentos debido al espolón, se observan fuertes procesos de erosión en esta playa (Fig. 8), ya que estas altas velocidades no tiene sedimento que transportar. La persistencia de velocidades longitudinales en el sentido NE-SW en la zona de swash de Costa Verde, medidas durante las campañas realizadas en diferentes épocas de los años 2014 y 2015, permiten inferir que esta playa se encuentra la mayor parte del año bajo el efecto de este patrón de corrientes, independientemente de los cambios estacionales en la región del caribe Colombiano. Esto quiere decir que el flujo neto longitudinal de sedimentos en la zona de swash en esta playa tiene un sentido NE-SW. Este análisis, permite explicar cómo las dinámicas de pequeña escala (ciclos de swash), pueden contribuir al entendimiento de las dinámicas espacio temporales mayores como la evolución de la línea de costa.

Un análisis similar de las características de los ciclos individuales de swash (*uprush* y *backwash*) para los datos recolectados en la campaña de campo de 2014 fue llevado a cabo en la playa de Cartagena. Resultados de dos ciclos característicos son mostrados en la Fig. 9. En este caso los ciclos de swash tienen una duración aproximada de 25 s. Las líneas grises en la Fig. 9c y d muestran las velocidades transversales V_x (positivas hacia la costa, negativas hacia el mar) en la celda superior e inferior, donde no se observan cambios significativos; las velocidades longitudinales V_y están representadas por la línea negra, siguiendo las direcciones mostradas en la Fig. 2.

Para la campaña de 2014, el montaje de sensores en la zona de swash se encontraba a profundidades mayores, sin embargo, las características durante el *uprush* y el *backwash* en las presiones y profundidades (Fig 9a,b) son similares a las observadas en 2015 en la misma playa (Fig. 5a). Los



Figura 8. Erosión de la línea de costa en la playa Costa Verde a) Noviembre de 2014 b) Febrero de 2015.

Fuente: Autores

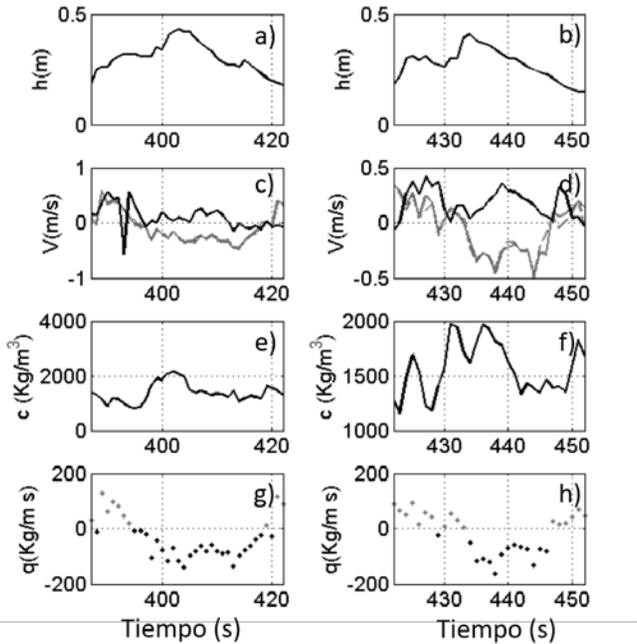


Figura 9. Ciclos de swash individuales, Playa Hollywood (Cartagena), Febrero de 2014 a,b) Presiones c,d) Velocidades transversales- V_x (líneas grises) y longitudinales- V_y (línea negra) e,f) concentración de sólidos suspendidos g,h) Transporte de sedimento transversal. Nota: Los valores de transporte de sedimentos no se encuentran calibrados, pero permiten hacer una correcta interpretación física.

Fuente: Autores

patrones de concentraciones de sólidos y de transporte de sedimentos son diferentes (entre Feb 2014 y Feb 2015), ya que se observan magnitudes similares ($\sim 100-150 \text{ Kg/m s}$) durante el uprush y el backwash (Fig 9 g,h), al contrario que en Feb 2015, donde las magnitudes de concentraciones y velocidades entre uprush y backwash son diferentes (Fig 5b,c). Para la campaña de 2014 el equipo midió en unidades de concentración (no en *counts*). Sin embargo, aunque las magnitudes no están calibradas, los patrones observados tienen las mismas interpretaciones físicas.

Para entender la influencia de un ciclo de swash característico (procesos de pequeña escala) en escalas espacio-temporales mayores como la evolución de la línea de costa, se procedió a cuantificar para un estado de mar, el transporte de sedimentos durante el uprush y el backwash. La Fig. 10 muestra que para el estado de mar seleccionado el transporte de sedimentos promedio es principalmente direccionado hacia el mar (backwash) ($\sim 50 \text{ Kg/m s}$), mientras

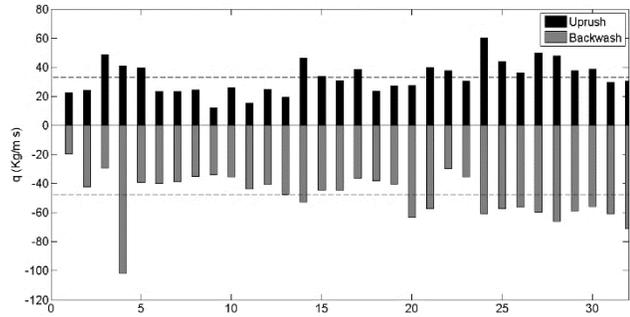


Figura 10. Promedio de transporte de sedimentos hacia la costa (agradación) y hacia el mar (erosión) para un estado de mar debido al transporte durante el uprush y el backwash, respectivamente (el eje X representa cada ciclo de swash). Nota: Los valores de transporte de sedimentos no se encuentran calibrados pero permiten hacer una correcta interpretación física.

Fuente: Autores

que en dirección costa (uprush) los valores son menores ($\sim 35 \text{ Kg/m s}$), lo cual podría estar relacionado con procesos erosivos, y por tanto pérdida de línea de costa.

4. Conclusiones

Una comparación entre las principales variables que dominan el transporte de sedimentos en la zona de swash fue analizado para la playa Costa Verde (Ciénaga) y playa Hollywood (Cartagena). En ambas playas la energía IG en las zonas cercanas a la costa fue alta, sin embargo, se observó mucha más disipación en la banda de SS en la playa Hollywood, mientras en Costa Verde, parte de la energía de SS es observada incluso muy cerca a la costa.

Se llevó un análisis detallado de las dinámicas de pequeña escala, mostrando que existen diferencias entre los ciclos de swash entre ambas playas. El análisis de las profundidades en la playa de Costa verde (Cienaga) mostró ciclos más ordenados, con separación temporal entre ciclos, mientras que la playa Hollywood (Cartagena) tuvo mayores asimetrías entre el uprush y backwash, mayor duración en cada ciclo e interacciones swash-swash. Las diferencias en los patrones de las excursiones de swash en ambas playas son atribuidas a las pendientes en la zona de swash, mostrando más interacciones swash-swash y asimetrías en la playa dominada por las ondas IG (Playa Hollywood), en contraste con lo reportado en estudios previos. Sin embargo, esta playa mostró variaciones más graduales en el aumento de las profundidades y velocidades, que la playa influenciada por las ondas de SS (Playa Costa Verde).

Las velocidades transversales en Costa verde fueron mayores que las registradas en playa Hollywood, dificultándose la obtención de ciclos completos de swash, ya que el descenso de la lámina de agua durante el backwash era rápido debido a la fuerte pendiente en esta zona y una mayor porosidad, lo que contribuía a una rápida infiltración de la lámina de agua.

Las velocidades longitudinales en la playa de Costa Verde fueron altas e incluso mayores que las medidas en la dirección principal (velocidades transversales) en la playa Hollywood, además se observó que las velocidades longitudinales (V_y) fueron principalmente negativas, lo que

indica direcciones (NE- SW), lo que puede explicar el rápido retroceso en la línea de costa, después de la construcción del espolón, debido a la interrupción del suministro de sedimentos.

Por otro lado, en la Playa Hollywood, Cartagena, se observó que las velocidades longitudinales fueron similares a las transversales en magnitud y dirección, esto podría ser atribuido a una onda atrapada entre los dos espolones (Fig. 2), sin embargo se deben llevar a cabo más estudios para comprobar esta hipótesis.

En ambas playas debido a las limitaciones del instrumento es difícil conocer el comportamiento del transporte de sedimentos durante el backwash.

El estudio de la influencia de los ciclos de swash individuales (uprush y backwash), y su influencia en los procesos de erosión y agradación, en playa Hollywood durante la campaña de campo de 2014, fue llevado a cabo, encontrando que el transporte hacia el mar (erosión/backwash) fue mayor que el transporte hacia la costa (uprush/agradación), para el estado de mar analizado.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por COLCIENCIAS, en el marco del Proyecto “Análisis de las Oscilaciones Infragravitatorias en la Zona de Rompientes de Playas Micromareales Disipativas y Reflejantes” Convocatoria 569 - 2012 banco de proyectos elegibles de CTi – recuperación contingente. También agradecemos a los equipos de trabajo en las campañas de campo de la Universidad Nacional y la Universidad del Norte.

Referencias

- [1] Puleo, J.A. and Torres-Freyermuth, A., The second international workshop on swash zone processes, *Coast. Eng.*, [online]. 2015. Available at: <https://sites.udel.edu/jpuleo/swash-zone-and-nearshore-sediment-transport/>
- [2] Masselink, G. and Russell, P., Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches, *Mar. Geol.*, 227(3-4), pp. 227-240, 2006. DOI: 10.1016/j.margeo.2005.11.005
- [3] Chardón-Maldonado, P., Pintado-Patiño, J.C. and Puleo, J.A., Advances in swash-zone research: Small-scale hydrodynamic and sediment transport processes, *Coast. Eng.*, January-Dec., 2015.
- [4] Van Rooijen, A.A., Modelling sediment transport in the swash zone, 2011.
- [5] Masselink, G. and Hughes, M., Field investigation of sediment transport in the swash zone, *Cont. Shelf Res.*, 18, pp. 1179-1199, 1998. DOI: 10.1016/S0278-4343(98)00027-2
- [6] Butt, T. and Russell, P., Suspended sediment transport mechanisms in high-energy swash, *Mar. Geol.*, 161, pp. 361-375, 1999. DOI: 10.1016/S0025-3227(99)00043-2
- [7] Elfrink, B. and Baldock, T., Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives, *Coast. Eng.*, 45(3-4), pp. 149-167, 2002. DOI: 10.1016/S0378-3839(02)00032-7
- [8] Aagaard, T. and Greenwood, B., Suspended sediment transport and the role of infragravity waves in a barred surf zone, *Mar. Geol.*, 118(1-2), pp. 23-48, 1994. DOI: 10.1016/0025-3227(94)90111-2
- [9] Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger, A.H., Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coast. Eng.*, 53(7), pp. 573-588, 2006. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.12.005
- [10] Guedes, R.M.C., Bryan, K.R., Coco, G. and Holman, R.A., The effects of tides on swash statistics on an intermediate beach, *J.*

- Geophys. Res.*, 116(C4), pp. C04008, 2011. DOI: 10.1029/2010JC006660
- [11] Hughes, M.G., Aagaard, T., Baldock, T.E. and Power, H.E., Spectral signatures for swash on reflective, intermediate and dissipative beaches, *Mar. Geol.*, 355, pp. 88-97, 2014. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.05.015
- [12] Ruessink, B.G., Kleinhans, M.G. and Van Den Beukel, P.G.L., Observations of swash under highly dissipative conditions *Waddensea*, 103, pp. 3111-3118, 1998.
- [13] Ruggiero, P., Holman, R.A. and Beach, R.A., Wave run-up on a high-energy dissipative beach, *J. Geophys. Res.*, 109(C6), p. C06025, 2004. DOI: 10.1029/2003JC002160
- [14] Ruju, A., Lara, J.L. and Losada, I.J., Radiation stress and low-frequency energy balance within the surf zone: A numerical approach, *Coast. Eng.*, 68, pp. 44-55, 2012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2012.05.003
- [15] Senechal, N., Coco, G., Bryan, K.R. and Holman, R.A., Wave runup during extreme storm conditions, *J. Geophys. Res.*, 116(C7), p. C07032, 2011. DOI: 10.1029/2010JC006819
- [16] Kikkert, G.A., O'Donoghue, T., Pokrajac, D. and Dodd, N., Experimental study of bore-driven swash hydrodynamics on impermeable rough slopes, *Coast. Eng.*, 60, pp. 149-166, 2012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.09.006
- [17] Pintado-Patiño, J.C., Torres-Freyermuth, A., Puleo, J.A. and Pokrajac, D., On the role of infiltration and exfiltration in swash zone boundary layer dynamics, *J. Geophys. Res. Ocean.*, pp. 6329-6350, 2015.

J.K. Montaño-Muñoz, recibió el título de Ing. Civil en 2012, y el grado de MSc. en Recursos Hidráulicos en 2016 de la Universidad Nacional de Colombia. Ha trabajado en sistemas de playas, estudiando la evolución y transformación del oleaje, a través de mediciones de campo y sistemas de cámaras. Actualmente realiza su PhD en la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda en temas relacionados con erosión costera. ORCID: 0000-0002-4142-6214

A.F. Osorio, es Ing. Civil (Universidad del Valle, Colombia) en 1999, MSc. y Dr. en Ciencias y Tecnologías Marinas (Universidad de Cantabria, España) en 2001 y 2005, respectivamente. Es profesor de la Universidad Nacional de Colombia desde 2006, actualmente tiene la categoría de profesor titular y es Director grupo de investigación OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia. Tiene una gran experiencia en la Gestión de las zonas oceánicas y costeras (MIZC), Energías Renovables Marinas (MRE), Modelado Numérico para retroanálisis y previsión (olas, mareas y variables oceanográficas) y morfodinámica de playas. Ha estado involucrado con varios proyectos internacionales como: The European Project – Coast View (vigilancia de los sistemas costeros en países europeos) y el desarrollo del Sistema de Modelado Costero (SMC, www.smc.unican.es). ORCID: 0000-0003-4891-9115

L. Otero, es Oceanógrafo Físico del año 1999 de la Escuela Naval Almirante Padilla, MSc. en Ciencias y Tecnologías Marinas en 2003 y Dr. en Ciencias y Tecnologías Marinas del año 2008, ambas de la Universidad de Cantabria (España). Desde 2000 hasta 2011 se desempeñó en la Armada Nacional de Colombia como subdirector y director del Centro Control Contaminación del Pacífico (CCCP), subdirector del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) y decano de la Facultad de Oceanografía Física de la Escuela Naval Almirante Padilla. Actualmente es profesor tiempo completo del Departamento de Física de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia). Sus intereses de investigación se enfocan en ondas en el océano, amenazas naturales de origen marino: tsunamis, ondas de tormenta y oleaje extremo; modelación numérica de procesos de transporte de sustancias contaminantes en el medio marino, hidrodinámica en la zona de rompientes, dinámica de estuarios, manejo integral de zonas costeras y marinas. ORCID: 0000-0002-1322-253X