

DETECCIÓN DE CAMBIOS DE LA LÍNEA COSTERA AL NORTE DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS

María Alejandra Cifuentes Ossa, Leidy Viviana Rosero Henao y John Josephraj Selvaraj

Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Departamento de Ingeniería, Grupo de Investigación en Recursos Hidrobiológicos. Carrera 32 No. 12-00 Chapinero, Vía Candelaria, Palmira, Valle del Cauca, Código postal: 763533, Colombia. macifuentes@unal.edu.co, lvroseroh@unal.edu.co, jjselvaraj@unal.edu.co.

RESUMEN

Este estudio se enfoca en la detección de la magnitud del cambio de la línea costera al norte del Distrito de Buenaventura, en el Pacífico colombiano, durante un periodo de 30 años, en una costa donde la geomorfología incluye playas, acantilados, estuarios, deltas y marismas. Por medio de imágenes satelitales (Landsat MSS, ETM+ y OLI TIRS) se detectaron posiciones históricas de la línea costera, con el fin de identificar los procesos de cambio, en términos de erosión y acreción, desde 1986 hasta 2015. Se realizó un análisis estadístico para encontrar estimaciones de las distancias y tasas de cambio de las líneas costeras, usando la herramienta del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés): Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Las estadísticas procesadas como Net Shoreline Movement (NSM) y End Point Rate (EPR), dieron información acerca de la magnitud y la tendencia de los cambios de la línea costera. Los resultados indican que las áreas con procesos más avanzados de acreción corresponden a sectores en Boca San Juan, Puerto España y cercanos a playa La Concepción en el Departamento del Valle del Cauca y al sur de Chavica, en el Departamento del Chocó; todo ellos, en la zona norte del área de estudio. Sin embargo, es en esta área en donde particularmente también se encontraron los procesos más avanzados de erosión, alrededor de Chavica, playa El Choncho y un pequeño sector en la Bahía Málaga. Algunos sectores de la línea costera se mantuvieron en su mayoría estables, como las bahías Málaga y Buenaventura. En promedio se encontró una tasa de cambio de (-) 0.21 m por año en la líneas costera, que refleja su tendencia erosiva; con valores máximo de EPR de 26.92 m de acreción y (-) 21.01 m de erosión costera. Los procesos naturales como la influencia de la desembocadura de los ríos y el fenómeno El Niño han contribuido a estos cambios del litoral. Los procesos de erosión y acreción identificados pueden ser usados para reconocer zonas de priorización de gestión costera en el Pacífico colombiano.

PALABRAS CLAVES: Buenaventura, Pacífico colombiano, Cambios de la línea costera, Erosión, Acreción.

ABSTRACT

Detection of shoreline changes in the northern District of Buenaventura using remote sensing. This study focuses on detecting the magnitude of shoreline changes of the northern District of Buenaventura, in the Colombian Pacific, over a 30-year period, on a coast where the geomorphology includes beaches, cliffs, estuaries, deltas and salt marshes. Satellite imagery (Landsat MSS, ETM + and

OLI TIRS) were used to detect historical positions of the shoreline in order to identify the processes of change, in terms of erosion and accretion, from 1986 to 2015. Statistical analysis of changes was carried out to estimate distances and shoreline change rates, using a tool developed by the United States Geological Survey (USGS): Digital Shoreline Analysis System (DSAS). The statistics on Net Shoreline Movement (NSM) and End Point Rate (EPR), provided information about the magnitude and trends of changes in the shoreline. The results indicate that areas with more advanced processes of accretion correspond to sectors in Boca San Juan, Puerto España and near to La Concepción beach in the Department of Valle del Cauca and in the south of Chavica, in the Department of Chocó; all these sectors are located in the northern part of the study area. Also in the same sectors, particularly around Chavica, the most advanced processes of erosion were found, along with El Choncho beach and a small sector in the Malaga bay. Some sectors of the shoreline remained mostly stable, such as Malaga and Buenaventura Bays. Average shoreline change rate of (-) 0.21m per year was found, reflecting its erosive tendency with maximum EPR values 26.92m of accretion and (-) 21.01m for coastal erosion. Natural processes such as the influence of river discharge and El Niño phenomenon, have contributed to these shoreline changes. The identified erosion and accretion processes can be recognized as priority areas of coastal management in the Colombian Pacific.

KEY WORDS: Buenaventura, Colombian Pacific, Shoreline changes, Erosion, Accretion.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras son de gran importancia dentro de la dinámica social y económica del Pacífico colombiano (Martínez *et al.*, 2005). Sin embargo, esas zonas se encuentran cada vez más amenazadas por los cambios que ocurren a diversas escalas espaciales y temporales (Del Río *et al.*, 2013) a causa de factores tanto naturales como de acción antropogénica, tales como el cambio en el nivel del mar (Orford *et al.*, 1995; Wetzel *et al.*, 2012), las condiciones de marea (Chen y Chang, 2009; Thébaudeau *et al.*, 2013), los eventos meteorológicos extremos (Blott y Pye, 2004; Temitope y Oyedotun, 2014), las actividades portuarias y la gestión costera (Kaminsky *et al.*, 2010; Sheik y Chandrasekar, 2011).

Los procesos de cambio de las zonas costeras desencadenan importantes implicaciones ambientales y problemas socio-económicos para las poblaciones locales y los diferentes sectores productivos de la región, si no son contemplados oportunamente por los organismos territoriales competentes. En este sentido, el análisis de la línea costera, definida como la interfase entre la tierra y el mar (Gens, 2010), permite caracterizar las variaciones del medio ambiente costero (Wu *et al.*, 2014) y se torna fundamental en la gestión de recursos, la protección del medio ambiente, el desarrollo costero sostenible, la planificación de los asentamientos y la zonificación de riesgos (Kumar *et al.*, 2010; Rasuly *et al.*, 2010; Kuleli *et al.*, 2011).

En Colombia, se han realizado importantes estudios relacionados al análisis de las zonas costeras y de los factores influyentes en los procesos de erosión y acreción. Para mencionar algunos, se destaca un estudio que tuvo lugar en las islas del Rosario, en el Caribe colombiano, entre 1954 y 2007, en el que se encontró que

aproximadamente 85% de la línea costera de esta área protegida presenta procesos de erosión (Restrepo *et al.*, 2012). Por otro lado, Rangel-Buitrago *et al.* (2015) también estudiaron la erosión costera a lo largo de la costa Caribe colombiana, identificando procesos graves de erosión entre 1980 y 2014, en más de 50% de la línea costera. Para el Pacífico colombiano se desarrolló un diagnóstico de la erosión y sedimentación de la zona costera en el que además se describen variables geológicas y geomorfológicas (Posada *et al.*, 2009). No obstante, estos estudios se han enfocado en la identificación y medición cualitativa de la erosión en el litoral colombiano, evidenciando la necesidad de determinar tasas de cambio o medidas cuantitativas de la erosión y acreción; de tal manera, que constituyan una herramienta para proyectar las amenazas de los ambientes marino-costeras y las comunidades asentadas en la región.

Los Sensores Remotos (SR) han demostrado ser eficaces en análisis espacio-temporales de la línea costera (Chandrasekar *et al.*, 2000; Kumar *et al.*, 2010), debido a que mediante fuentes de datos históricos y actuales como los mapas, fotografías aéreas e imágenes satelitales analizadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), se crean oportunidades para los análisis temporales extensos y espacialmente detallados, en cuanto al reconocimiento de superficies terrestres y de los ambientes marinos (Vuorela *et al.*, 2002; Kratzer *et al.*, 2014).

Un SIG es una herramienta que emplea la tecnología digital para describir o representar el mundo geográfico y para asociar y analizar información espacio-temporal. La principal ventaja del SIG es que permite identificar las relaciones espaciales entre las características y los cambios temporales dentro de un área de interés a lo largo del tiempo. Para medir y monitorear los cambios costeros el SIG se ha utilizado ampliamente en la extracción de la línea costera, para superponer mapas multitemporales de la costa y detectar los cambios en el tiempo. Recientemente el estudio de los cambios del litoral ha sido automatizado con el uso del software DSAS (Digital Shoreline Analysis System) para diferentes productos de satélite, como las imágenes Landsat, por ejemplo. Mediante el software se logran estimar tasas de cambio del desplazamiento de la costa (Sheeja y Ajay-Gokul, 2016). En este sentido, este estudio propone detectar mediante el uso de SR y SIG, la magnitud de los cambios espaciales de la línea costera al norte del Distrito de Buenaventura, en el Pacífico colombiano, en términos de erosión y acreción, durante un periodo de 30 años.

ÁREA DE ESTUDIO

Buenaventura se encuentra en la costa Pacífica colombiana (Figura 1), en la región noroeste de América del Sur (Invemar, 2002). La línea de la costa pacífica colombiana se extiende por aproximadamente 1576 km. La región es conocida por sus fuertes lluvias, numerosos ríos y vegetación exuberante (Correa y Morton, 2010).



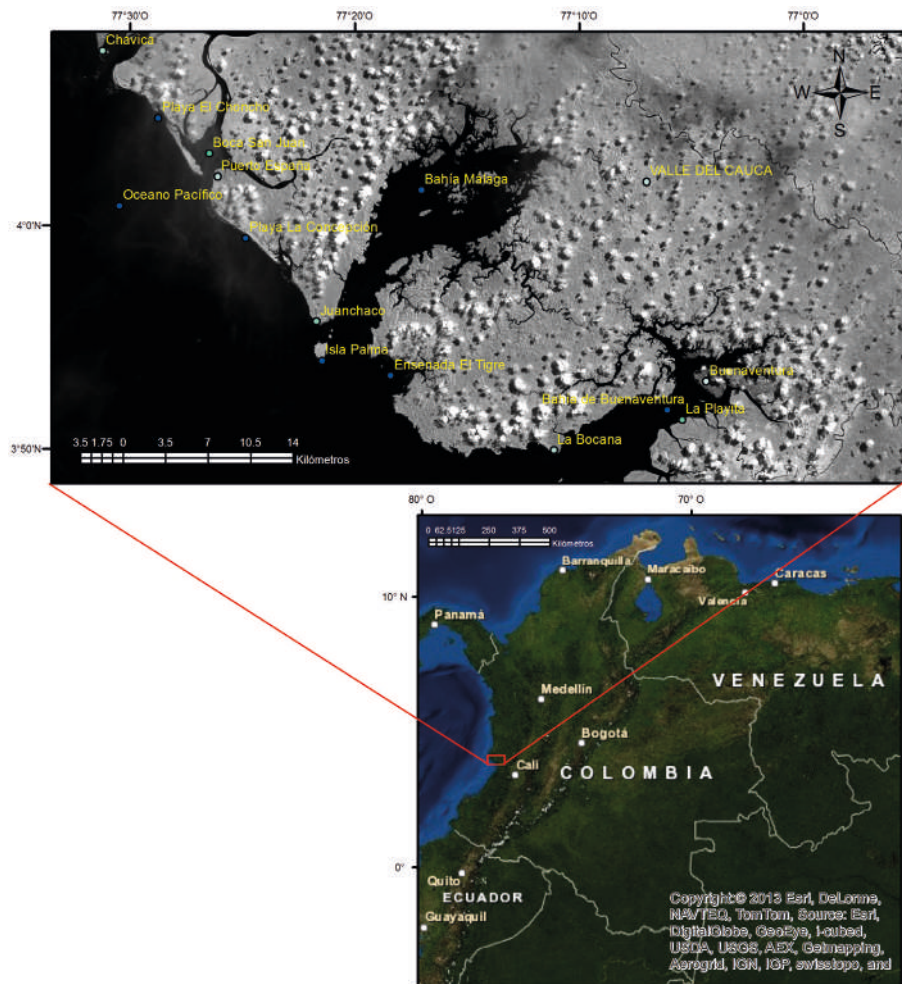


Figura 1: A. Área de interés al norte del Distrito de Buenaventura, localizado en la B. Costa Pacífica colombiana.

El Distrito Especial Portuario, Ecoturístico y Biodiverso de Buenaventura (Figura 1) está localizado entre las estribaciones de la cordillera Occidental y el océano Pacífico a $3^{\circ}53' N$ y a $77^{\circ}04' O$. Buenaventura es el municipio más grande del departamento de Valle del Cauca, sus 6078 km^2 de superficie representan la tercera parte del área departamental, y es el segundo con más población. Es también el primer puerto del país y lugar de concentración de las principales actividades comerciales de la región (Martínez *et al.*, 2005).

El área de interés se ubica al norte del Distrito de Buenaventura, entre Chávica, Departamento del Chocó y al sur de la Bahía de Buenaventura,

Departamento del Valle del Cauca (Figura 1) extendiéndose por una distancia de 156 km, de la costa Pacífica colombiana. Esta área incluye diferentes características morfológicas, entre las cuales se encuentran playas, acantilados, estuarios, deltas y marismas (Alarcón *et al.*, 2001; Lara *et al.*, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon imágenes satelitales Landsat (Land Remote Sensing Satellite) Nivel 1 de 1986, 2001 y 2015 (Tabla 1), correspondientes a la dirección geográfica Path/Row (Latitud y Longitud) 10/57, como datos primarios para extraer las líneas costeras; adquiridas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Glovis, <http://glovis.usgs.gov/>), con una resolución espacial de 30 m.

Las imágenes de satélite Landsat Nivel 1 de media resolución, aunque son sistemáticamente corregidas, pueden traer consigo defectos como distorsiones radiométricas y geométricas, ocasionadas por variaciones en la altitud y la velocidad de la ubicación de los sensores con respecto a la tierra (Lillisand y Kiefer, 2000). Por tanto, se hizo necesario aplicar un pre-procesamiento a las imágenes, mediante la georreferenciación (con puntos de control terrestres) y la asignación del sistema de coordenadas apropiado (WGS 84, UTM Zona 18N), usando el software ArcGIS 10.2.

Posteriormente, se realizó la construcción de pirámides mediante el método de convulación cúbica y la aplicación de función máscara (en ArcGIS); para mejorar la resolución de la banda espectral Infrarrojo cercano (NIR) a emplear (Tabla 1). La longitud de onda del NIR posibilita combinaciones espectrales que identifican claramente los límites terrestres del agua, para la delimitación de la línea costera (Van y Binhz, 2009; Kumaravel *et al.*, 2013; Gómez *et al.*, 2014).

Tabla 1: Imágenes satelitales empleadas en el desarrollo del estudio.

Satélite/Sensor	Fecha de adquisición	Resolución espectral (N° bandas)	Modo espectral (N° de banda usada)
Landsat 5/Sensor MSS	19/02/1986	4	4 (NIR)
Landsat 7/Sensor ETM+	09/04/2001	8	4 (NIR 1)
Landsat 8/Sensor OLI TIRS	11/06/2015	11	5 (NIR)

Digitalización y extracción de la línea costera

Mediante Clasificación No Supervisada Iso Cluster (CNS) en ArcGIS (Dellepiane *et al.*, 2004), con la previa definición de tres clases de superficies (cuerpos de agua, superficie terrestre y nubosidad), y la aplicación del Índice de agua “Modified Normalized Difference Water Index” (MNDWI) (Ghoneim *et al.*, 2015) (Ecuación 1), se realizó la interpretación de las características de la imagen del área de interés.

$$MNDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

Dónde: “Green” corresponde a la banda verde (banda 2 para las imágenes de 1986 y 2001, banda 3 para la imagen de 2015) y NIR

Una vez obtenida una clara demarcación de la frontera tierra-agua, se digitalizaron las líneas costeras y se exportaron en formato shapefile. Las líneas costeras digitalizadas se diferenciaron en tres colores, uno para cada año de estudio (1986, 2001 y 2015) y se superpusieron en un mapa, como se observa en la Figura 2.

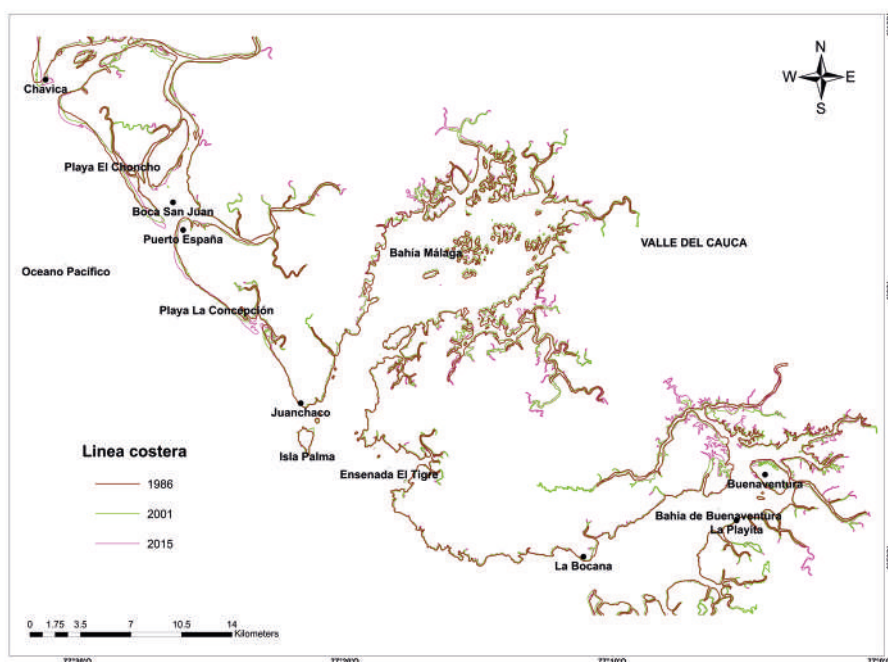


Figura 2: Mapa de líneas costeras extraídas para los años 1986, 2001 y 2015, al norte del Distrito de Buenaventura.

Identificación y análisis de la tasa de cambio de la línea costera

Las líneas costeras detectadas y extraídas del Distrito de Buenaventura y su entorno inmediato en el Pacífico colombiano, fueron analizadas mediante la herramienta del USGS: Digital Shoreline Analysis System (DSAS), versión 4.3; empleada como una extensión del software ArcGIS. DSAS fue desarrollado para calcular tasas de cambio de la línea costera desde el análisis de datos en series de tiempo, almacenados en SIG (Thieler y Danforth, 1994; Brooks y Spencer, 2010;

González-Villanueva *et al.*, 2013). El cambio de la costa se calcula mediante transectos ortogonales a la línea costera, en una separación definida por el usuario, para evaluar los cambios y tendencias históricas de la misma, que se informan en una tabla de atributos. Existen numerosos ejemplos del uso del DSAS en el contexto internacional, sin embargo en el contexto nacional esta herramienta no ha llegado a ser explorada y empleada ampliamente.

Para emplear DSAS, se requirió crear una Geodatabase unificando las líneas costeras digitalizadas (de los tres años de interés) y una línea basal a partir de la línea costera de 1986, direccionada hacia el mar (Thieler *et al.*, 2009), además de una serie de transectos ortogonales, desde la línea basal hacia las líneas costeras adjuntas. Los transectos fueron separados entre sí a una distancia de 500 m y ubicados a un ángulo aproximado de 90 grados.

Para evaluar el cambio de las líneas costeras de análisis, se procesaron las estadísticas Net Shoreline Movement (NSM) y End Point Rate (EPR); las cuales proveen información acerca de la magnitud y las tendencias de los cambios de la línea costera. NSM informa acerca de la distancia entre la línea costera de análisis más antigua y la más reciente, para cada transecto; por lo que permite realizar un análisis comparativo del cambio total en la dinámica del litoral costero durante el periodo de tiempo que comprende el estudio. Sin embargo, la estadística estimada por DSAS de mayor connotación y mayormente empleada es End Point Rate (EPR), dado que es una tasa de cambio que se calcula mediante la división entre la distancia del movimiento de la línea costera y el tiempo transcurrido entre la línea costera más antigua y la más reciente (Thieler *et al.*, 2009); por tanto, debe ser comprendida como la cantidad en metros del desplazamiento de la línea costera, en el periodo de análisis.

Los procesos de erosión y acreción determinados fueron clasificados en cinco categorías de evolución costera, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de los procesos de erosión y acreción de la línea costera, con base en estadística tasa de cambio EPR (Del Río *et al.*, 2013; Natesan *et al.*, 2015).

Clase	Rango EPR (m/año)	Clasificación de los procesos de cambios de la línea costera
1	<-15	Erosión muy alta
2	<-5 a -15	Erosión alta
3	<-2 a -5	Erosión moderada
4	-2 a <2	Estable
5	>2 a 5	Acreción moderada
6	>5 a <15	Acreción alta
7	>15	Acreción muy alta

RESULTADOS

El análisis de 156 km de la línea costera desde 1986 hasta 2015, al norte del Distrito de Buenaventura, comprendiendo las bahías Málaga y Buenaventura en el Departamento del Valle del Cauca, permitió encontrar que el mayor porcentaje (48.63%) de los 292 transectos ortogonales a la línea costera analizada identificaron al área de estudio como estable. Sin embargo, 28.42% de la línea costera reflejó procesos de erosión y 22.95% de acreción; teniendo en cuenta que los máximos cambios de la línea costera en términos de erosión y acreción fueron de (-) 21.01 y 26.92 m/año (valores EPR, Figura 3), respectivamente. En promedio se encontró una tasa de cambio de (-) 0.21 m por año en las líneas costeras, este EPR negativo se obtuvo por la fuerte influencia de los valores altos de erosión identificados principalmente en el norte del área de estudio, en sitios alrededor de Chavica y Playa El Choncho.

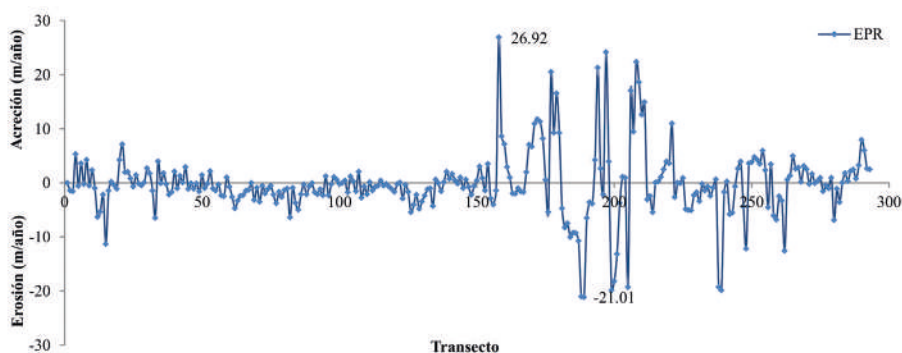


Figura 3: EPR calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área de estudio.

Para el caso del NSM, la mayor distancia encontrada fue de 800.55 m (Figura 4), identificada en el sector de Playa La Concepción, en el Valle del Cauca. Este movimiento neto de la línea costera refleja un proceso de acreción entre 1986 y 2015, que se reconoce con la expansión de superficie emergida en una península, mediante la comparación de las imágenes Landsat y las imágenes disponibles en Google Earth. El proceso erosivo más extremo de cambio de la línea costera, identificado en el análisis del área de estudio, corresponde a una distancia de (-) 624.72 m (Figura 4) de movimiento neto (NSM), detectado entre 1986 y 2001, por la posible pérdida o inmersión de superficie terrestre en el sector de Playa El Choncho.

Los procesos más avanzados de acreción se identificaron alrededor de Boca San Juan, Puerto España y cercanos a Playa La Concepción en el Valle del Cauca y al sur

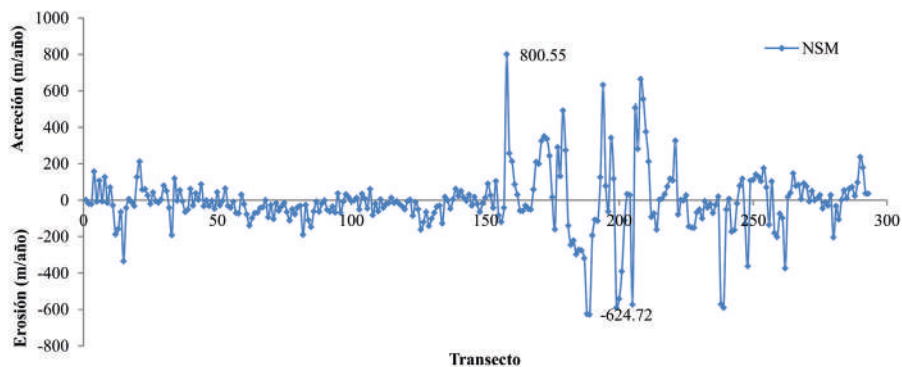


Figura 4: NSM calculado para cada transecto de análisis de las líneas costeras en el área de estudio

de Chavica, en el Chocó; todos ellos al norte de la bahía de Buenaventura. Los procesos más avanzados de erosión, se detectaron alrededor de Chavica, playa El Choncho y un pequeño sector en bahía Málaga. En áreas de Juanchaco y de la bahía de Buenaventura, se identificaron menores escalas de procesos de erosión. Sin embargo, en su mayoría, la línea costera de las bahías Málaga y Buenaventura se identificó como estable (Figura 5).

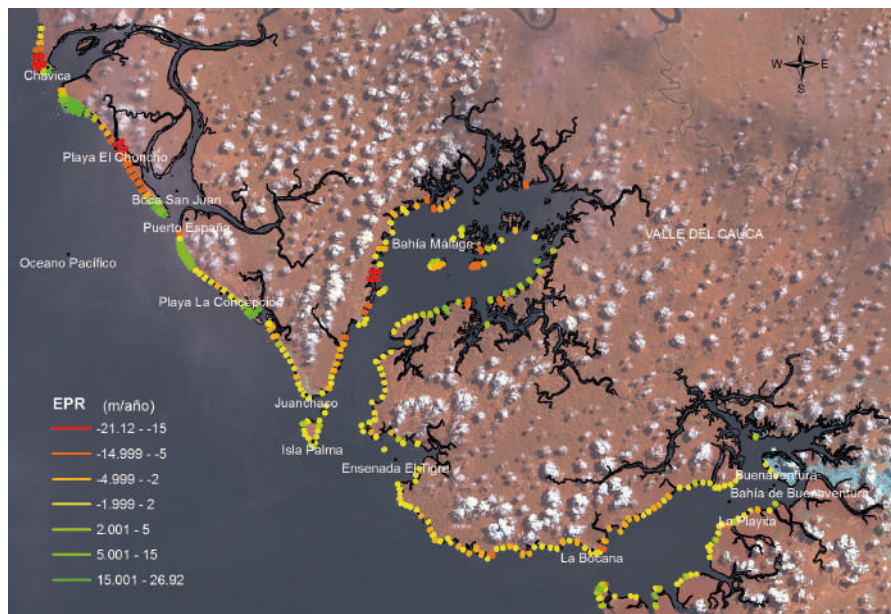


Figura 5: Mapa mostrando procesos de erosión (colores rojos) y acreción (colores verdes) identificados al norte del Distrito de Buenaventura entre 1986 y 2015, usando DSAS.

DISCUSIÓN

Las zonas costeras son sistemas geomorfológicos dinámicos en los que los cambios tienen lugar de manera continua (Del Río *et al.*, 2013), a diversas escalas temporales (corto, mediano y largo plazo). La detección de tasas de erosión y acreción de la línea costera, se torna fundamental para entender los procesos de cambio de las zonas costeras. La erosión, entendida generalmente como la pérdida o inmersión de superficie terrestre y la acreción, como el depósito o reorganización de sedimentos o materiales; son ambos desafíos actuales para las comunidades, la infraestructura y los ecosistemas costeros (Collins y Sitar, 2008; Katz y Mushkin, 2013).

Una característica importante de la región Pacífica de análisis es la ocupación del territorio. Buenaventura es el municipio más grande del Valle del Cauca y el segundo con más población (alrededor de 324207 habitantes) (Martínez *et al.*, 2005), pero es también el lugar de concentración de la población en el litoral Pacífico de interés, permitiendo percibir que la costa Pacífica sigue poco poblada, en comparación con la costa Caribe colombiana. En su mayoría la configuración de la línea costera del área de estudio, se constituye por playas, acantilados, estuarios, deltas y marismas (Lara *et al.*, 2008); en este sentido, es pertinente considerar como preponderante el análisis de las causas naturales para comprender los cambios de la línea de la costa, dado las particularidades de uso y ocupación de la misma (Komar, 2000; Del Río *et al.*, 2013).

Las causas naturales, pueden ser atribuidas a factores relacionados con la geología y ecología de la región, al presentar cercanía a sustratos y plataformas rocosas, estuarios, manglares y desembocaduras de los ríos (Benavente *et al.*, 2007). En el área de estudio, el río de mayor caudal y profundidad es el San Juan, considerado además el de mayor aporte de sedimentos en la costa Suramericana (Restrepo y Kjerfve, 2000), ubicado en el departamento del Chocó (IDEAM, 2013). Este río, presenta su desembocadura al océano seccionada en dos vertientes, la primera justo al lado de Chavica y la segunda en Boca de San Juan, influenciando de manera significativa procesos de acreción como los que fueron identificados en el sector de Boca San Juan, Puerto España y al sur de Chavica, a causa de procesos de arrastre, descarga y deposición de sedimentos por acción del flujo de este cuerpo de agua.

Por otra parte, la zona costera del Pacífico colombiano, se ve influenciada por eventos El Niño, por su posición geográfica en el canal dinámico de las ondas Kelvin ecuatoriales asociadas al fenómeno ENSO; en la cual logra registrar aumentos del nivel del mar, del orden de 30 cm, en el caso de eventos fuertes y de entre 10 y 15 cm, en eventos moderados (Rangel y Montealegre, 2003). De acuerdo con el índice ONI (Oceanic Niño Index), calculado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric

Administration (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), durante el período de estudio se presentaron 15 eventos El Niño, de los cuales, los más cercanos a las fechas de las imágenes trabajadas, tuvieron lugar en 1987 y 2015; ambos clasificados eventos fuertes, que se relacionan con los procesos de flujo y re-organización de sedimentos a lo largo del litoral.

Los aumentos de marea por acción de El Niño, al ser amplificadas por el incremento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático, han propiciado la inundación de asentamientos humanos a lo largo de las costas; como es el caso puntual de los cascos urbanos de Bahía Solano y Tumaco, ubicados al norte y al sur del área de estudio. La inundación ocurrió durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 1997 propició la erosión de la costa y cambios en el paisaje, por la inmersión de grandes superficies de playas e islas de barrera (Posada *et al.*, 2009; IDEAM, 2013).

En su mayoría la línea costera de las bahías Málaga y Buenaventura fue categorizada como estable, situación que podría ser explicada porque las costas de esta zona están formadas principalmente por rocas sedimentarias, que se estructuran compactamente en forma de acantilados, presentando pendientes muy marcadas (Invemar, 2002; Posada *et al.*, 2009).

En los sectores de Chavica, Playa el Choncho y Boca San Juan, donde se encontraron los procesos más significativos de cambio de la línea costera, tanto de erosión como de acreción, fueron constatados con el uso de imágenes satelitales de Google Earth. En la Figura 6 se pueden observar los cambios de erosión (marcados con flechas rojas) y de acreción (flechas verdes), en 1986 hasta 2014 y 2016. Adicionalmente, el diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano, realizado por Posada *et al.* (2009), permitió confirmar que los sitios que se registran en este estudio corresponden con los registrados anteriormente con problemas de erosión y acreción en los departamentos del Chocó y Valle del Cauca, tal es el caso de Chavica, Playa La Concepción, Boca San Juan, Ladrilleros, Juanchaco, bahía de Buenaventura y La Playita. Correa y Gonzalez (2000) señalan además que la erosión costera durante el siglo XX causó la reducción del área de habitabilidad, con la reubicación de un pueblo denominado El Choncho, en uno de los sitios que consecuentemente se registran mediante este estudio como uno de los que experimenta la más elevada erosión del área de estudio.

Los procesos de erosión y acreción identificados, podrían ser usados para reconocer puntos de priorización de gestión costera en el Pacífico colombiano. Por ejemplo, las áreas de Chavica, Playa El Choncho, y un pequeño sector en bahía Málaga, todos ubicados al norte del área de estudio y con presencia de pequeños asentamientos humanos, en las que se detectaron las mayores tasas de erosión (Figura 5), son áreas en que se sugiere mayor atención por parte las autoridades competentes.

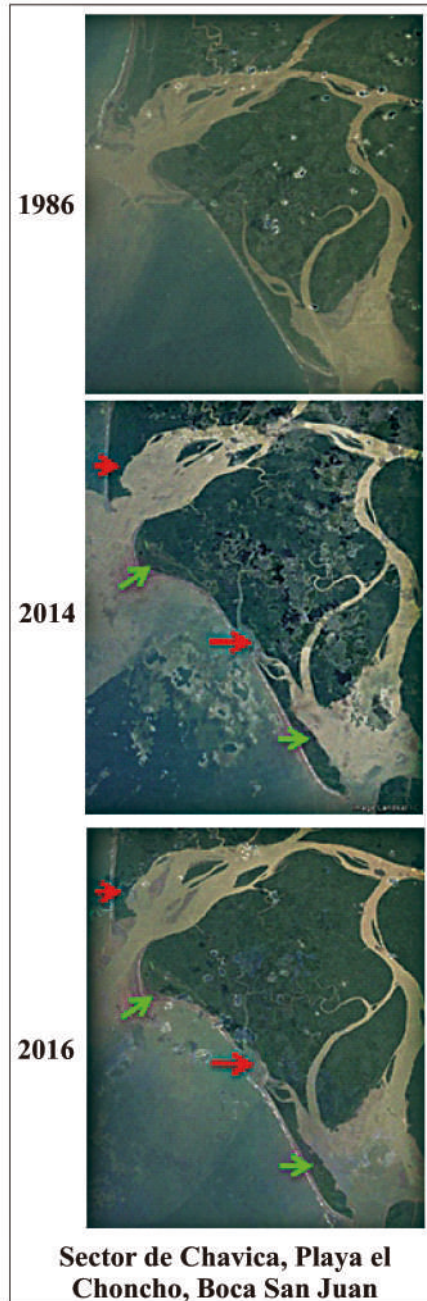


Figura 6: Imágenes satelitales mostrando cambios costeros (erosión = flechas en rojo, acreción = flechas en verde) en los sectores de Chavica, Playa El Choncho y Boca San Juan, al norte del área de estudio.

CONCLUSIONES

La línea costera y la costa al norte del Distrito de Buenaventura está siendo erosionada a una tasa promedio de (-) 0.21 m por año. Especialmente el norte del área de estudio que comprende sectores del Chocó y del Valle del Cauca, desde Chavica hasta Playa El Choncho se está erosionando a un ritmo más rápido, alcanzando los (-) 21.12 m por año. No obstante, la evolución de la costa analizada mediante el fenómeno de la acreción, permitió reconocer zonas de mayor deposición o reorganización de sedimentos alrededor de Boca San Juan, Puerto España, Playa La Concepción y al sur de Chavica, también al norte del área de estudio.

Los resultados abordados desde las estadísticas EPR y NSM, en términos de tasas de cambio (para la primera) y distancias del movimiento de la línea costera (mediante la segunda estadística), permiten reconocer las diferentes variaciones de la línea costera, así como la tendencia general de la misma. Sin embargo, el resultado del mapa del cambio de la línea costera podría resultar más útil para las autoridades de manejo de zonas costeras en el oficio de orientar los planes de manejo pertinentes y la regulación de las zonas costeras.

Los resultados que en este trabajo se presentan, al describir procesos de cambio de la línea costera, en tasas y distancias del movimiento, representan una base científica cuantificable de los procesos erosivos y de redistribución de sedimentos que ocurren en el área de estudio del Pacífico colombiano. Resultados, que se consideran a su vez una base para proyectar potenciales cambios y establecer estrategias pertinentes de adaptación y mitigación de los impactos.

El escaso conocimiento científico de la dinámica ambiental y geomorfológica del área de estudio, en la costa Pacífica colombiana, hace necesaria la evaluación de las diferentes características que intervienen en los fenómenos de erosión y acreción, como el clima, la oceanografía, las características sedimentarias y tectónicas de la zona, entre otras. Pese a esto, intentar explicar los procesos de cambio detectados, en términos de erosión y acreción, como consecuencia de la influencia de factores naturales (procesos de flujo y redistribución de sedimentos por acción del cauce de los ríos y el fenómeno El Niño), permite reconocer que éstos pueden estar condicionando en el mediano plazo los procesos de cambio de la línea costera del área de estudio.

Los sensores remotos y los SIG demostraron ser herramientas útiles para el análisis de la línea costera en regiones extensas y de acceso limitado por cuestiones de seguridad y características del paisaje, como el área de estudio. La metodología expuesta puede ser empleada para la elaboración de modelos de predicción a mediano y largo plazo de la morfodinámica de las zonas costeras, tanto en el Pacífico colombiano, como en otras áreas de especial importancia para el país.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, en especial a la Dirección de Investigación y Extensión, por el apoyo financiero y logístico para la realización de este estudio y al grupo de investigación en Recursos Hidrobiológicos por su colaboración pertinente. Al USGS Global Visualization Viewer por proveer datos e información de forma gratuita, como las imágenes Landsat utilizadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, H., G. Andrade, J. Gonzalo, L. Barreto, H. Benavides, N. Bernal, C. Buitrago, C. Cano, I. Cárdenas, M. Cardona, C. Uribe, J. Ceballos, R. Chaparro, M. Cuervo, H. Cuevas y E. Domínguez. 2001. Colombia: Primera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio del Medio Ambiente. IDEAM. PNUD. Bogotá D.C. 307 p.
- Benavente, D., N. Cueto, J. Martínez-Martínez, M.A. García del Cura y J.C. Cañaveras. 2007. The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environ. Geol.* 52 (2): 215-224.
- Blott, S.J. y K. Pye. 2004. Morphological and sedimentological changes on an artificially nourished beach, Lincolnshire, UK. *J. Coast. Res.*, 20: 214–233.
- Brooks, S.M. y T. Spencer. 2010. Temporal and spatial variation in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK. *Geomorphology*, 124: 26-41.
- Chandrasekar N, Anil Cherian, Rajamanickam M, et al. 2000. Coastal landform mapping between Tuticorin and Vaippar using IRS-IC data. *Indian Journal of Geomorphology*, 5(1&2): 114-120.
- Chen, W.W. y H. K. Chang. 2009. Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 84: 54-60.
- Collins B.D. y N. Sitar. 2008. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. *Geomorphology*, 97: 482-501.
- Correa, I. D. y J.L. González. 2000. Coastal erosion and village relocation: a Colombian case study. *Ocean Coast. Manag.*, 43: 51-64.
- Correa, I. y R. Morton. 2010. Pacific coast of Colombia. *Encyclopedia of the World's Coastal Landforms*. Springer Science Business Media B. 33: 193-197.
- Dellepiane, S., R. De Laurentiis y F. Giordano. 2004. Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision. *Pat. Recogn. Let.*, 25: 1461-1470.
- Del Río, L., F.J. Garcés y J. Benavente. 2013. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196: 252-266.
- Gens, R. 2010. Remote sensing of coastlines: detection, extraction and monitoring. *Internat. J. Rem. Sens.*, 31: 1819-1836.
- Gómez, C., M.A. Wulder, A.G. Dawson, W. Ritchie y D.R. Green. 2014. Shoreline change and coastal vulnerability characterization with Landsat imagery: a case study in the Outer Hebrides, Scotland. *Scot. Geogr. J.*, 130(4): 279-299.

- González-Villanueva R, S. Costas, M. Pérez-Arllucea, S. Jerez y R.M. Trigo. 2013. Impact of atmospheric circulation patterns on coastal dune dynamics, NW Spain. *Geomorphology*, 185: 96-109.
- Ghoneim, A.M., A. Ahmad, M. Afzal y A. Ebid. 2015. Effect of NaCl induced stress on germination and seedling growth of various *Oryza sativa* L. Genotypes, 5(2): 1–8.
- IDEAM. 2013. Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. IDEAM. Bogotá, D. C.
- Invemar. 2002. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2001. Serie de Publicaciones Periódicas. Santa Marta. 275 p.
- Kaminsky, G.M., P. Ruggiero, M.C. Buijsman, D. McCandless y G. Gelfenbaum. 2010. Historical evolution of the Columbia River littoral cell. *Mar. Geol.*, 273: 96–126.
- Katz O. y A. Mushkin. 2013. Characteristics of sea-cliff erosion induced by a strong winter storm in the eastern Mediterranean. *Quat. Res.*, 80: 20-32.
- Komar, P.D. 2000. Coastal erosion – underlying factors and human impacts. *Shore Beach*, 68 (1): 3–16.
- Kratzer, S., T. Harvey y P. Philipson. 2014. The use of ocean color remote sensing in integrated coastal zone management – A case study from Himmerfjärden, Sweden. *Mar. Pol.*, 43: 29-39.
- Kuleli, T., A. Guneroglu, F. Karlı y M. Dihkan. 2011. Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineer.*, 38: 1141-1149.
- Kumar, A., A.C. Narayana y K.S. Jayappa. 2010. Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west coast of India: A remote sensing and statistics-based approach. Mangalore University, University of Hyderabad, India. *Geomorphology*, 120: 133-152.
- Kumaravel, S., T. Ramkumar, B. Gurunnam, M. Suresh y K. Dharanirajan. 2013. An Application of Remote Sensing and GIS Based Shoreline Change Studies – A Case Study in the Cuddalore District, East Coast of Tamilnadu, South India, *Internat. J. Innov. Techn. Expl. Engineer.*, 2(4): 211 - 215.
- Lara, J.R., J.A. Arreola, L.E. Calderón, V.F. Camacho, G. De la Lanza, A. Escofet, M.L. Espejel, M. Guzmán, L.B. Ladah, M. López, E.A. Meling, P. Moreno, H. Reyes, E. Rios y J.A. Zertuche. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, Capital Natural de México, Conocimiento actual de la biodiversidad. *CONABIO, México*, 1: 109-134.
- Lillisand, M.T. y W.R. Kiefer. 2000. Remote sensing and image interpretation. Wiley, Nueva York.
- Martínez, N.J., O. Jaramillo y K. Robertson. 2005. Amenazas naturales en el litoral Pacífico colombiano asociadas al ascenso del nivel del mar. *Cuad. Gogr.*, 14: 83-96.
- Natesan, U., A. Parthasarathy, R. Vishnunath, E.J. Jumar y V.A. Ferrer. 2015. Monitoring longterm shoreline changes along Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Aq. Procedia*, 4: 325-332.
- Orford, J.D., R.W. Carter, S.C. Jennings y A.C. Hinton. 1995. Processes and timescales by which a coastal gravel-dominated barrier responds geomorphologically to sea-level rise: Story Head barrier, Nova Scotia. *Earth Surf. Processes Landforms*, 20: 21-37.
- Posada, B.O., W. Henao y G. Guzmán. 2009. Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. *INVEVAR, Serie Publicaciones Especiales No. 17*, Santa Marta, 148 p.
- Rangel–Buitrago, N. G., G. Anfuso y A.T. Williams. 2015. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean Coast. Manag.*, 114: 129-144.

- Rangel, E.S. y J.E. Montealegre. 2003. Análisis de las series del nivel del mar en el Pacífico colombiano y su relación con el cambio climático. *Meteorol. Colomb.*, 7: 53-66.
- Rasuly, A., R. Naghdifar y M. Rasoli. 2010. Monitoring of Caspian Sea coastline changes using object-oriented techniques. *Procedia Environ. Sci.*, 2: 416-426.
- Restrepo, J.C., L. Otero, A.C. Casas, A. Henao y J. Gutiérrez. 2012. Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia). *Ocean Coast. Manag.*, 69: 133-142.
- Restrepo, J.D. y B. Kjerfve. 2000. Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Rio San Juan. *J. Geol.*, 108: 17-33.
- Sheeja, P.S. y A.J. Ajay Gokul. 2016. Application of digital shoreline analysis system in coastal erosion assessment. *Internat. J. Engineer. Sci. Comput.*, 6(6): 7876-7883.
- Sheik, M. 2011. A Shoreline change analysis along the Coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system. *Geo-spatial Inf. Sci.*, 14(4): 282-293.
- Temitope, D. y T. Oyedotun. 2014. Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. *Geomorph. Techn.*, 3(2.2): 12 p.
- Thébaudeau, B., A.S. Trenhaile y R.J. Edwards. 2013. Modelling the development of rocky shoreline profiles along the northern coast of Ireland. *Geomorphology*, 203: 66-78.
- Thieler, E.R. y W.W. Danforth. 1994. Historical shoreline mapping (I): Improving techniques and reducing positioning errors. *J. Coast. Res.*, 10(3): 549-563.
- Thieler, E.R., E.A. Himmelstoss, J.L. Zichichi y E. Ayhan. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Open-File Report 2008-1278. Geological Survey.
- Van, T. y T. Binhz. 2009. Application of remote sensing for shoreline change detection in Cuu Long estuary. *VNU J. Sci., Earth Sci.*, 25: 217-222.
- Vuorela, N., P. Alho y R. Kalliola. 2002. Systematic assessment of maps as source information in landscape change research. *Landsc. Res.*, 27: 141-166.
- Wetzel, F., D. Kissling, H. Beissmann y D. Penn. 2012. Future climate change driven sea-level rise: secondary consequences from human displacement for island biodiversity. *Global Change Biol.*, 18: 2707-2719.
- Wu, T., X. Hou y X. Xu. 2014. Spatio-temporal characteristics of the mainland coastline utilization degree over the last 70 years in China. *Ocean Coastal Manag.*, 98: 150-157.

RECIBIDO: 16/09/2016

ACEPTADO: 03/05/2017