

Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos en la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca

Characterization of the coastal geomorphology and its associated vegetation cover, through remote sensors, in the Bay of Buenaventura, Valle del Cauca

DOI: 10.26640/22159045.426

Fecha de recepción: 2016-03-20 / Fecha de aceptación: 2016-06-22

Merly Constanza Álvarez Machuca*, Christian Bermúdez-Rivas** y Diana Carolina Niño Pinzón***

Álvarez, M., Bermúdez-Rivas, C. y Niño, D. (2016). *Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos en la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca*. Bol. Cient. CIOH (34):49-63. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.426

RESUMEN

La presente investigación comprendida entre La Bocana y Punta Limones, en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca), describe las características geomorfológicas y de cobertura vegetal a lo largo de 95.61 km de la costa Pacífica de Colombia, utilizando el sensoramiento remoto a través de la técnica de *Light Detection and Ranging* – LiDAR aerotransportada e imágenes satelitales y de sus productos. Geomorfológicamente, el territorio está repartido casi que equitativamente entre planicies costeras y colinas, siendo un poco mayor el área de las planicies costeras con un 53.06 % del área total estudiada (5637.56 ha), que a su vez se constituyen por planos y llanuras con vegetación halófitas, planos de inundación, plataformas intermareales no vegetadas, y en menor proporción de lagunas costeras y playas. Sobre las dos primeras geoformas predomina el manglar y sobre la última predominan las herbáceas de playa. Las colinas y lomas (46.93 %) también se hacen presentes con los bosques densos altos de tierra firme y los helechales no inundables. En general, para el área de estudio, la cobertura vegetal que más abunda es el bosque denso alto de tierra firme con un 44.94 % (3690.47 ha), seguido por el manglar con 37.65 % (3092.54 ha). La idea de relacionar las características geomorfológicas con las coberturas vegetales surge de la necesidad de contar con herramientas geográficas para el ordenamiento y manejo de la costa Pacífica colombiana.

PALABRAS CLAVE: cobertura vegetal, geomorfología, *Light Detection and Ranging*- LiDAR, teledetección, imagen multiespectral, zona costera, SIG.

ABSTRACT

This research was made between La Bocana and Punta Limones in the municipality of Buenaventura (Valle del Cauca) and describes the geomorphology and vegetation coverage along 95.61 km of the Pacific coast of Colombia using airborne remote sensing Light Detection and Ranging – LiDAR and satellite imagery and the products derived from it. Geomorphologically the territory is divided almost equally between coastal plains and hills and ridges, being slightly above the coastal plains with 53.06 % of the total studied area (5637.56 ha), which in turn it constitutes: flat plains with halophyte vegetation, floodplains, non-vegetated intertidal platforms, and in lesser proportion coastal lagoons and beaches; on the first two geoforms predominates the mangrove forests and on the last one predominates the herbaceous. The hills and ridges (46.93 %) are also present in the dense forests of high land and not flooded ferns. In general, the most abundant vegetation cover is dense forest land with over a 44.94 % (3690.47 ha) of coverage, followed by mangrove 37.65 % (3092.54 ha). The idea of linking geomorphology with the vegetation cover surges from the need to obtain geographic tools for the planning and management of the Colombian Pacific coast.

KEY WORDS: vegetation cover, geomorphology, *Light Detection and Ranging*- LiDAR, remote sensing, multiespectral image, coastal zone, GIS.

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Correo: aguerrero@dimar.mil.co.

** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Correo: cbermudez@dimar.mil.co

*** Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP). Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Correo: dnino@dimar.mil.co

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, para medir parámetros de los bosques como por ejemplo la altura del dosel, la biomasa, la distribución de árboles, los límites de las coberturas vegetales, o para estudiar la geomorfología, es necesario realizar observaciones en campo las cuales consumen una cantidad considerable de recursos y se convierten en una labor intensa y poco práctica cuando se trata de evaluar largas extensiones de terreno (Wannasiri, Nagai, Honda, Santitamnont y Miphokasap, 2013). En cuanto al estudio de la geomorfología, los sensores remotos han permitido el análisis de grandes extensiones de terreno evitando la necesidad de dedicar mucho tiempo a la investigación de campo y este se ha enfocado principalmente en describir y clasificar los accidentes geográficos (Rao, 2002), caracterización de procesos dinámicos y la asociación de estos accidentes geográficos con estos procesos (Smith y Pain, 2009).

El conocimiento de la geomorfología y sus coberturas vegetales asociadas, permite el reconocimiento, la planificación y la administración del territorio, ya que a través de este conocimiento se puede evaluar la ubicación, cantidad y estado de estos elementos (Bermúdez-Rivas, Álvarez Machuca y Niño Pinzón, 2014). La planeación del territorio resulta de un compromiso entre el potencial medioambiental (medido en términos de disponibilidad de recursos naturales) y la demanda social (medido en términos de los requerimientos de bienes y servicios por comunidades específicas) (Mendoza, Bocco, Granados y Bravo, 2002). El sensoramiento remoto ayuda en la investigación de estos temas a través de la aplicación en estas principales áreas: localización y distribución de los accidentes geográficos, elevación de la superficie de la tierra, composición de la superficie de la tierra y caracterización de la superficie de la tierra (Smith y Pain, 2009).

Actualmente, el municipio cuenta con pocos trabajos de investigación que sirvan como base a las entidades encargadas de administrar y planear esta zona costera del país. Entre los trabajos de este tipo realizados al municipio de Buenaventura, se pueden citar el del Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres del año 2000, llamado "Evaluación de amenazas naturales y bases para

la mitigación de riesgos en el área urbana de Buenaventura" en el cual realizan estudios de potencial de deslizamientos, áreas inundables, zonificación relativa por amenaza sísmica, entre otros, generando bases para la mitigación de riesgos para el Plan de Ordenamiento Territorial (Observatorio Sismológico de Occidente, 2000). Lo anterior, a partir de cartografía, bases de datos de atributos georreferenciados, trabajo de campo, análisis de sensores remotos y talleres de cartografía social. Se identificó que los principales retos de Buenaventura son: el riesgo sísmico, inundaciones por el mar y las quebradas, un potencial de deslizamientos, riesgos asociados a incendios, explosiones y contaminación por basuras.

Con estos antecedentes, la Dirección General Marítima (Dimar), como la reguladora, directora y controladora de las actividades marítimas, debe propender por la administración y el desarrollo de la zona costera (Decreto Ley 2324 de 1984); sin ser ajena al concepto de sostenibilidad y ordenamiento costero. Para esto es importante conocer muy bien el territorio bajo su cuidado, y debe hacerlo desde varias perspectivas como son: la económica, la social, la política y la medioambiental; y para lograrlo, debe ser generadora de conocimiento, pero al mismo tiempo debe valerse del conocimiento generado por otras entidades estatales, las cuales están velando por el territorio costero pero desde otra perspectiva.

La presente investigación tuvo como objetivo identificar, espacializar y describir la geomorfología y sus coberturas vegetales asociadas, presentes en la bahía de Buenaventura a través de interpretación de ortofotos e imágenes de satélite, análisis de alturas del terreno proporcionadas por Modelos Digitales de Superficie (MDS) obtenidos de la información LiDAR y actividades específicas en campo; realizar el inventario de coberturas vegetales costeras, unidades geomorfológicas y analizar el estado de estas con modelos digitales de superficie. Lo anterior servirá como insumo técnico para la administración de la jurisdicción de la Dirección General Marítima; además servirá como orientador para las decisiones que las capitanías de puerto deban tomar sobre temas de bienes de uso público y protección del medio ambiente costero.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está comprendida en el departamento del Valle del Cauca, específicamente en la bahía costera del municipio de Buenaventura, entre los sectores de La Bocana (77°11'49.036''W; 03°50'18.424''N), y Punta Limones (77°06'43.328''W; 03°50'30.696''N), con una extensión de línea de costa de 95.61 km y un área de 109.41 km², abarcando al distrito

industrial, portuario, biodiverso y ecoturístico de Buenaventura, ubicado en la isla de Cascajal. En la bahía de Buenaventura desembocan el río Dagua, las quebradas Aguadulce, Pichido, El Corral, San Joaquín, y los esteros Aguacate, Amazonas, Crucecitas, Doscientos Pesos, El Piñal, Gamboa, Las Cruces, Limones, San Antonio, y Santa Delicia, siendo un gran número de drenajes que constituyen un sistema deltaico (Figura 1).

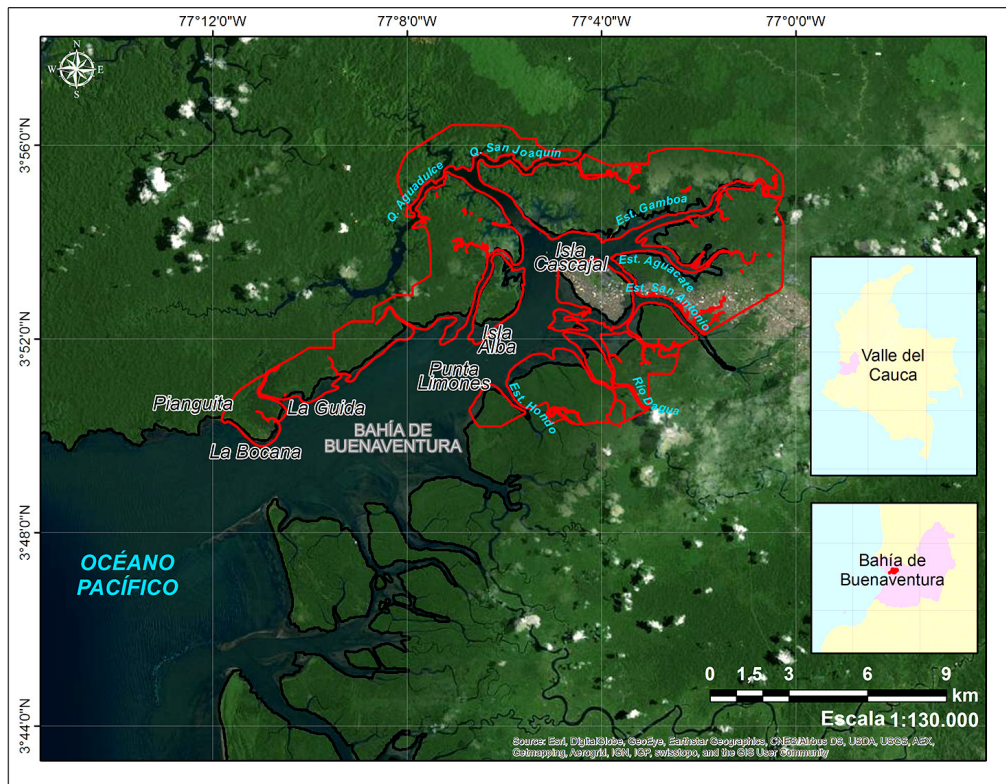


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.

METODOLOGÍA

Datos

Los datos espaciales usados en este estudio fueron las ortofotografías capturadas con una cámara métrica digital que permitió una resolución espacial de 25 cm por pixel en las imágenes, y la nube de puntos LiDAR, capturada con un sistema ALS40 aerotransportado en un avión Cessna 402B, ambas tomadas en el año 2006.

Los parámetros de calibración del equipo de captura de los datos LiDAR fueron: FOV de escaneo

de 30°, altura de vuelo de 1219 m, velocidad del avión de 125 nudos, frecuencia de escaneo de 29 Hz, longitud de onda del láser de 1084 nm (16) y cumplen con las especificaciones técnicas para la generación de la base cartográfica digital de Dimar (División de Litorales y Áreas Marinas, 2006), que plantea una exactitud vertical máxima de ± 15 cm y una exactitud horizontal máxima de ± 0.5 m. El espaciado promedio de la nube de puntos es de 1.00 m; valor determinado a través de un muestreo y está clasificada en las siguientes categorías: suelo, construcción, vegetación y agua, entre otras.

Los datos LiDAR presentan el estándar de la Sociedad Americana para Fotogrametría y Sensores Remotos (Asprs) en la versión 1.0 del 9 de mayo de 2003, que normaliza la estructura, forma y el contenido de los archivos “.LAS”, para facilitar el intercambio, traslado y almacenamiento de estos datos (Asprs, 2003).

Se usaron además las escenas de octubre de 2013 del satélite LandSat 8 y de junio de 2003 de LandSat 7, con resolución espacial de 30 m. Específicamente, se generó una combinación a color con las bandas 5 (infrarrojo cercano), 6 (infrarrojo medio) y 4 (rojo), que corresponden a 4, 5 y 3 para LandSat 7.

Productos derivados

Los productos derivados surgieron de varios análisis y procesos espaciales, el primer paso fue realizar una reclasificación de los puntos LiDAR asignados por la clasificación automática al retorno no correspondiente. El segundo paso fue generar un Modelo Digital del Terreno (MDT) con los puntos de retorno del suelo (Ground-Retorno 2), que describe las alturas del terreno de la zona de estudio; y el tercer paso fue crear un Modelo Digital de Vegetación (MDV) con los retornos de vegetación alta, media y baja (vegetation high, medium and low - retornos 3, 4 y 5), que describe la altura del dosel de las coberturas vegetales (MDV). Ambos modelos se crearon con una resolución de 1m\pixel.

Así, partiendo del modelo digital de terreno se generaron modelos de pendiente, curvatura, sombreado y curvas de nivel, para apoyar la clasificación de las unidades geomorfológicas, y con el MDV, se generó únicamente el modelo de sombreado para ayudar en la clasificación de la cobertura vegetal.

Otros productos derivados fueron las composiciones a color RGB 453 y RGB 564 de las bandas de LandSat 7 y 8, respectivamente, que permitieron la identificación y digitalización del límite de costa, de las unidades geomorfológicas y las coberturas vegetales; esto gracias a la notable diferenciación entre respuestas espectrales del suelo y el agua.

Creación de la cartografía e interpretación de imágenes

La interpretación de imágenes involucra el análisis espacial de los modelos de elevación de suelo, de vegetación y de las combinaciones RGB de las imágenes satelitales; acompañado esto por el reconocimiento de características tales como forma, textura, color, tamaño, sombreado, tono, estructura, asociaciones y patrones que facilitan la identificación y trazado de las unidades geomorfológicas y de cobertura vegetal.

Para generar las unidades geomorfológicas, se partió de la separación de los terrenos de bajamar y las zonas susceptibles a la acción de la marea; diferenciación que se logró con el trazado de la línea de más alta marea, obtenida del MDT y del cálculo de las cotas máximas de elevación a lo largo del litoral Pacífico gracias al modelo hidrodinámico H2D, que hace parte del estudio en Otero (2005). Posteriormente, se interpretó y trazó la línea de más baja marea con las composiciones RGB 564 (L8) y 453 (L7) de las imágenes satelitales, conformando las zonas intermareales hasta la línea de más alta marea digitalizada inicialmente (Dimar-CCCP, 2013), por encima de la cual están los planos de inundación que pueden verse afectados ocasionalmente por las aguas lluvia o eventos extremos de marea (Vargas Cuervo, 2015).

El uso de perfiles de terreno, modelos en 3D y curvas de nivel (Figura 2), permitió digitalizar las lomas y colinas y diferenciar rasgos geomorfológicos. Así como el uso de la capa de coberturas vegetales separó las zonas intermareales vegetadas de las no vegetadas.

La capa de coberturas vegetales se obtuvo a partir del análisis directo de las ortofotografías, donde se examinaron los elementos que pertenecen a los diferentes tipos de vegetación y se establecieron los patrones de textura, color y forma de las copas de los árboles y arbustos. Una vez establecidas estas características y apoyados en las composiciones RGB de las imágenes satelitales, se pudo identificar cada cobertura en diferentes áreas. Para analizar los límites de las diferentes coberturas por medio de las alturas de dosel, se construyeron modelos de visualización 3D a partir de los datos LiDAR, con

el software GlobalMapper y perfiles de terreno en MARS (Figura 2); esto facilita el proceso de su identificación, delimitación y clasificación.

Las coberturas vegetales determinadas fueron nombradas a partir de la leyenda nacional de coberturas de la tierra desarrollada para escalas

1:100 000, la cual es una adaptación de la metodología Corine Land Cover para Colombia. Sin embargo, existieron coberturas detectables únicamente a escalas mayores (>1:2000), por lo que se crearon clases adicionales a las pertenecientes a la leyenda nacional (Ideam, 2010).

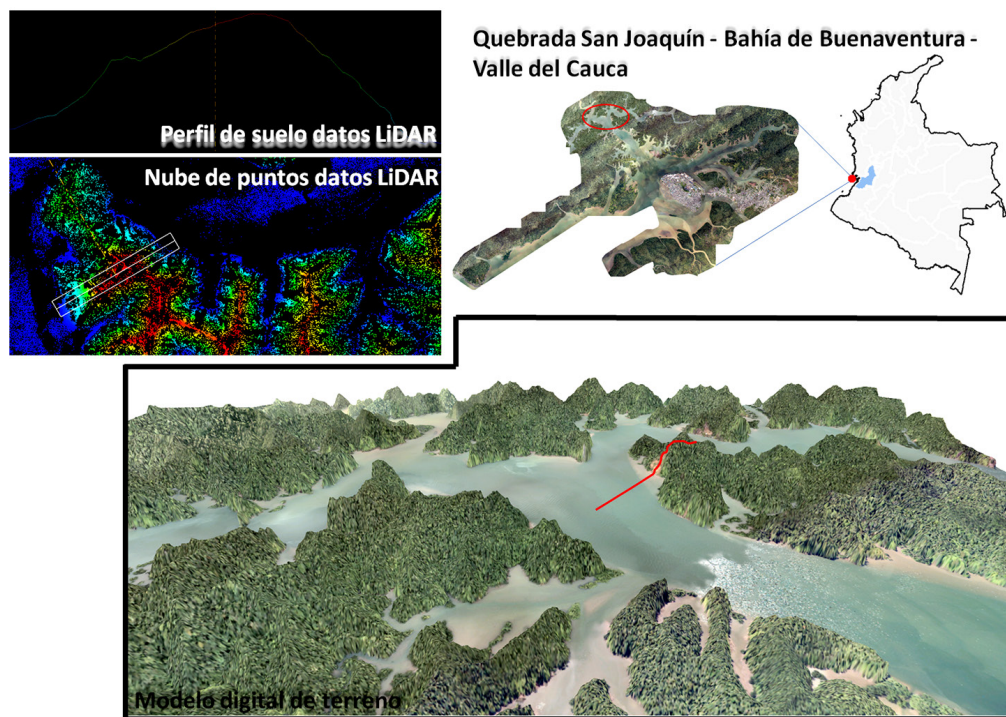


Figura 2. Modelo digital en 3D, perfil de suelo y datos LiDAR de los bosques de tierra firme de los alrededores de la Quebrada San Joaquín, bahía de Buenaventura, Valle del Cauca.

Fase de campo

A partir de la cartografía que se obtuvo de los productos derivados, se llevó a cabo un trabajo de verificación en campo, tanto de las coberturas vegetales como de la geomorfología; esto debido a que la interpretación requiere comprobación y actualización posterior a través del reconocimiento directo sobre el terreno (Melo y Camacho, 2005).

Para los sitios de muestreo se efectuaron visitas a cada tipo de cobertura identificada tomando fotografías panorámicas de evidencia, realizando un análisis visual de la zona costera y recolectando muestras de vegetación de las

especies dominantes para su reconocimiento en el laboratorio.

En cuanto a las unidades geomorfológicas, se verificó la igualdad entre la cartografía y lo observado *in situ*, realizando las correcciones pertinentes en los lugares con inconsistencias.

RESULTADOS

Unidades geomorfológicas

En la bahía de Buenaventura se identificaron 3 regiones geomorfológicas, 7 unidades geomorfológicas y 2 rasgos geomorfológicos (Figura 3).

Las regiones geomorfológicas están representadas por planicies deltaicas, planicies costeras y por lomeríos; y las unidades geomorfológicas por playas, plataformas intermareales no vegetadas, plataformas intermareales vegetadas, planos de inundación, islas, lagunas costeras y colinas. De las regiones geomorfológicas las que ocupan una mayor extensión en la bahía, son las planicies deltaicas y los lomeríos; las unidades con mayor extensión son las plataformas intermareales vegetadas y no vegetadas (Tabla 1).

Regiones geomorfológicas

. **Planicies deltaicas.** Estas superficies que están asociadas a las desembocaduras de los ríos de la bahía, contienen unidades geomorfológicas como plataformas intermareales vegetadas y planos de inundación. Se presentan principalmente hacia el sur de la bahía de Buenaventura, en el sector conocido como Punta Limones y La Playita.

. **Planicies costeras.** Estas planicies contienen depósitos litorales recientes, incluye áreas con una morfología predominantemente

plana o de baja altura respecto al nivel de la mar; característica que las diferencia de las terrazas fluvio-marinas. Su origen es marino o fluvio-marino y, generalmente, representa una franja de costa que ha propagado o que es resultado de cambios en el nivel del mar (National Soil Survey Handbook (NSSH), 2008), y que se encuentra limitada hacia el continente por colinas o zonas montañosas (Gómez, Carvajal y Otero, 2013). En la bahía se observan al SW, NW y NE, principalmente hacia la base de las lomas y colinas. En estas planicies se pueden diferenciar unidades como los planos de inundación y las plataformas intermareales vegetadas.

Lomerío. Se presentan en casi toda la bahía hacia el suroeste y noroeste (Figura 4), son de pendientes suaves a levemente inclinadas y formas redondeadas. Las cimas presentan formas alargadas a redondeadas, cubiertas por vegetación tipo bosque denso alto de tierra firme y helechal no inundable que generalmente cubren el afloramiento rocoso. En altura presentan un promedio de entre 15 y 30 m. (Dimar-CIOH, 2009) (Figura 4).

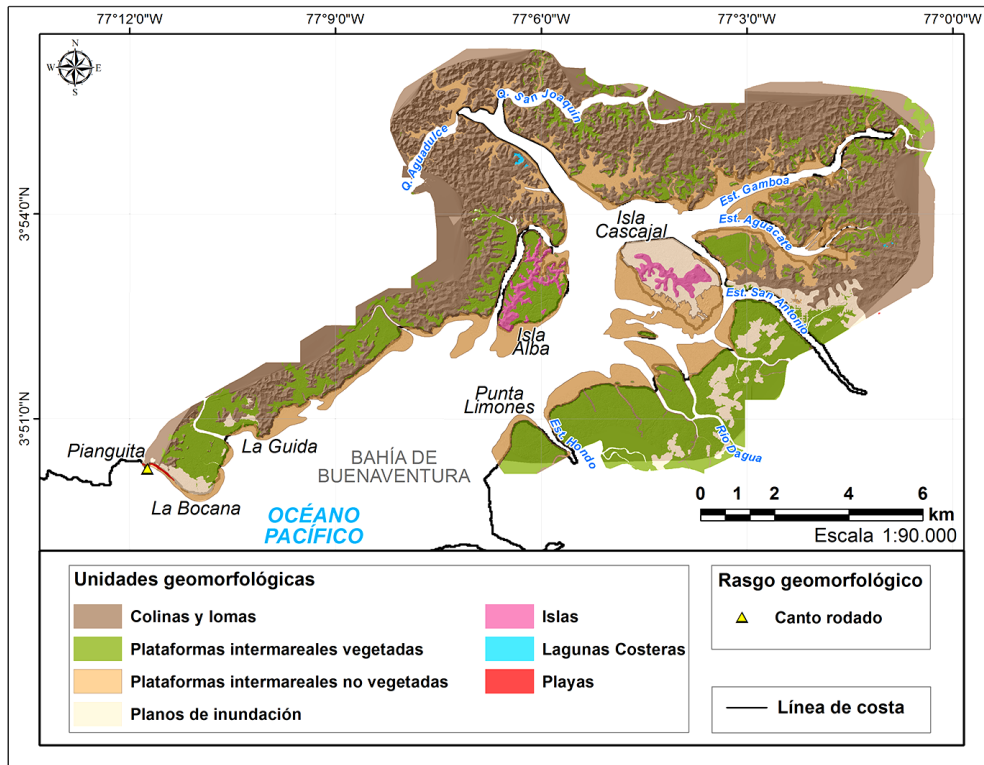


Figura 3. Mapa de las unidades geomorfológicas en la costa de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca.

Unidades geomorfológicas

. **Playas.** Las playas en la bahía de Buenaventura se encuentran en Piangüita y La Bocana, son de arena media, color gris oscuro, con abundantes minerales ferro-magnesianos. Contienen herbáceas de playa y ocupan un área total de 2.7 ha.

. **Plataformas intermareales no vegetadas.** Se observan en toda la bahía de Buenaventura junto a los planos con manglar, las islas, las playas, las lomas y colinas. Estos depósitos de sedimentos no consolidados y no vegetados, quedan descubiertos cuando la marea baja totalmente y cubiertos cuando esta sube; son bastante fangosos, constituyen los fondos someros y están ubicados principalmente a lo largo de la línea de costa. Cuando estas plataformas están adyacentes a los manglares, contienen gran cantidad de materia orgánica. Ocupan un área total de 2190.54 ha.

. **Plataformas intermareales vegetadas.** Son las zonas vegetadas (especies halófitas) que cubre y descubre la marea, ubicados en la base de las lomas y colinas de la bahía. Son planos muy fangosos de sedimentos finos y abundante materia orgánica en donde crece principalmente vegetación de tipo manglar. Cuando la marea es alta son inundados totalmente. Ocupan un área total de 3194.49 ha.

. **Planos de inundación.** En esta investigación se les dio este nombre a las zonas que están al nivel del mar o un poco por encima del mismo que, generalmente, no los inunda la marea, son planas a levemente onduladas y más estables que las superficies fangosas de las

plataformas intermareales debido a que no reciben inundación constante. Sufren inundaciones periódicas (encharcamiento), como consecuencia de altas precipitaciones y el alto nivel freático, eventos extremos o desbordamiento de los ríos. Su origen se debe a la depositación fluvio-marina de sedimentos y pueden presentar vegetación tipo helechal y bosque denso alto de tierra firme. Estos planos se observan en Piangüita y en Punta Limones. Ocupan un área total de 563.14 ha.

. **Lagunas costeras.** Se observan cerca al estero Doscientos Pesos, hacia el noroeste de la bahía, ocupadas parcial y totalmente por agua cuando la marea sube; están separadas del estero por una zona de manglar. Ocupan un área total de 3.92 ha.

. **Islas.** En la bahía de Buenaventura hay dos islas llamadas Alba y Cascajal y son rocosas. Cascajal está completamente urbanizada, mientras que Alba contiene vegetación tipo helechal y se encuentra rodeada de plataformas intermareales vegetadas con manglar que las cubre el mar cuando la marea esta alta. Ambas islas ocupan un área total de 167.33 ha.

. **Lomas y colinas.** En la bahía de Buenaventura se observan principalmente lomas de pendientes muy suaves, con cimas redondeadas y alargadas, con alturas entre los 10 y 30 m y con vegetación tipo arbustal sobre ellas. Las colinas se pueden observar desde el centro de la bahía hacia el brazo norte (hasta Piangüita); estas son de alturas que alcanzan los 70 m, de pendientes abruptas a suaves, con rasgos geomorfológicos como acantilados hacia el sector de Piangüita. En total el área que ocupan las lomas y colinas es de 4819.80 ha.

Tabla 1. Extensión de las unidades geomorfológicas encontradas en la zona de estudio.

Unidades geomorfológicas	ha	%
Colinas y lomas	4819.80	44.04
Plataformas intermareales vegetadas	3194.49	29.19
Plataformas intermareales no vegetadas	2190.54	20.01
Planos de inundación	563.14	5.14
Islas	167.33	1.52
Lagunas costeras	3.92	0.03
Playas	2.70	0.02
Total	10941.95	100

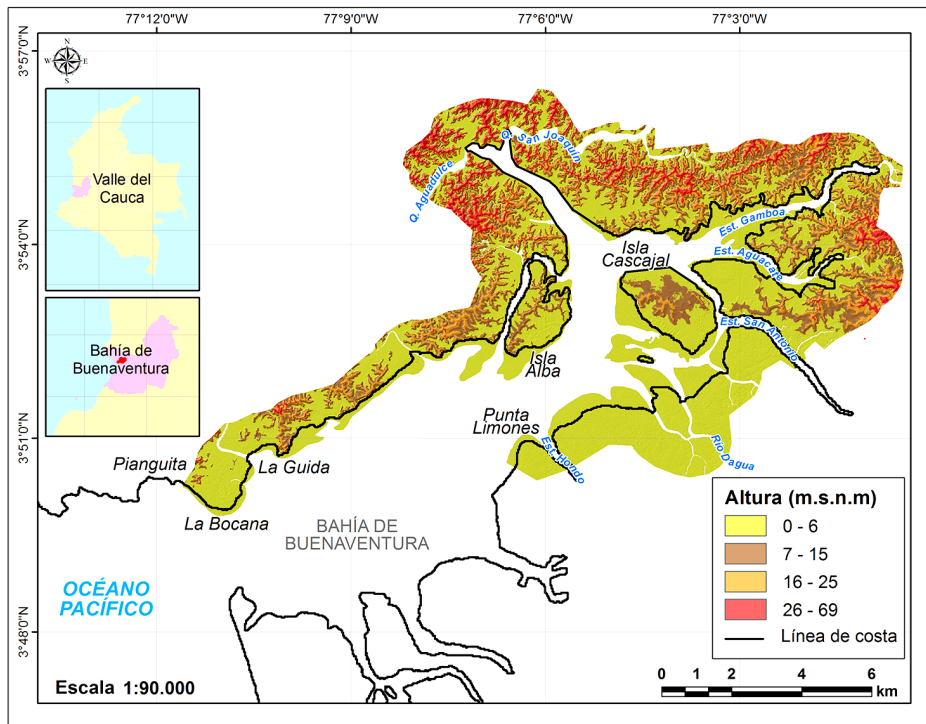


Figura 4. Modelo de elevación de terreno de la costa de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca.

Rasgos geomorfológicos

. **Acantilados.** Se observan acantilados hacia el sector de La Bocana, en la saliente rocosa que separa La Bocana de Pianguita. Tiene una altura aproximada de 25 m. También se presentan acantilados en los bordes de las lomas y colinas de la bahía. En algunas zonas no son visibles debido a que son de poca altura (0.5 a 1 m) y se cubren cuando hay marea alta o a que los tapan las zonas intermareales vegetadas con manglar.

. **Cantos rodados.** Estas acumulaciones de escombros se observan en la base del acantilado de La Bocana, como cuerpos de roca con diámetros superiores a 50 cm, producto de la desestabilización del escarpe de la saliente rocosa.

Coberturas vegetales

Se identificaron 12 coberturas vegetales (Figura 5) en una extensión total de 8212.64 ha (Tabla 2), siendo la mayor extensión la de la cobertura bosque denso alto de tierra firme (3690.47 ha equivalentes a 44.94 %) y en menor extensión, la cobertura herbáceas de playa (0.90 ha equivalentes a 0.01 %).

. **Bosque denso alto de tierra firme.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 44.94 %.

. **Manglar.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 37.65 %. Algunas de las especies que se encontraron fueron: *Rhizophora mangle*, *Avicennia geminans*, *laguncularia racemosa* y *Rhizophora harrisoni*.

. **Bosque fragmentado con vegetación secundaria.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 10.13 %.

. **Helechal no inundable.** Esta cobertura se caracteriza por estar dominada principalmente de helechos diferentes a la Rancocha, que se asientan en terrenos firmes o colinas que han sido intervenidas para crear potreros y han sido abandonados, los cuales se han poblado con diferentes especies de helechos. El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 2.46 %.

Tabla 2. Extensión de las coberturas vegetales encontradas en la zona de estudio.

Cobertura Vegetal	ha	%
Bosque denso alto de tierra firme	3690.47	44.94
Manglar	3092.54	37.65
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	831.98	10.13
Helechal no inundable	201.77	2.46
Zonas verdes urbanas	145.47	1.77
Palmar	140.97	1.72
Tierras desnudas y degradadas	58.50	0.71
Árboles de zona urbana	23.70	0.29
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	18.24	0.22
Helechal	7.01	0.09
Arbustal	1.01	0.01
Herbáceas de playa	0.90	0.01
Total	8212.64	100

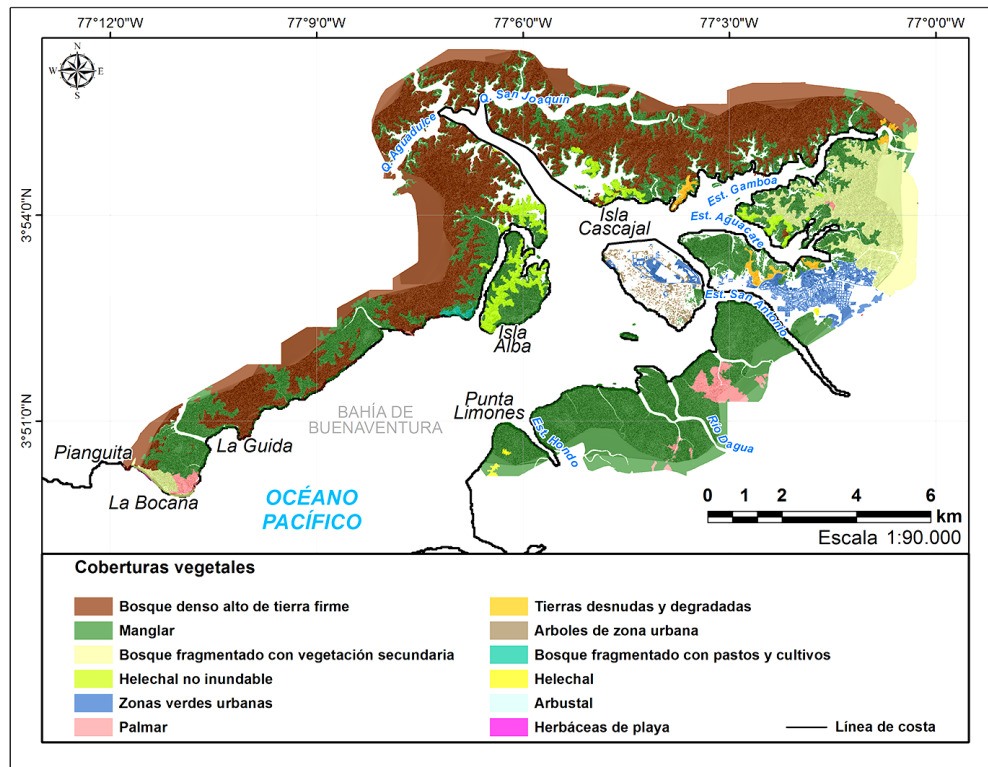


Figura 5. Mapa de las coberturas vegetales de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca.

. **Zonas verdes urbanas.** Corresponde a los parques, patios de las casas, áreas vegetadas de borde de ríos y pequeños relictos de bosque, siempre asociados a un tejido urbano discontinuo. El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 1.77 %.

. **Palmares.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 1.12 %.

. **Tierras desnudas y degradadas.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.71 %.

. **Árboles de zona urbana.** Corresponde a los árboles de tipo ornamental, sombrío, frutales y demás vegetación de tipo arbustiva, que se encuentra únicamente en las áreas urbanas. El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.29 %.

. **Bosque fragmentado con pastos y cultivos.** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.22 %.

. **Helechal (Rancocha).** El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.09 %.

. **Arbustal.** En este tipo de cobertura se aprecian especies como las *Cecropia spp* y algunas gramíneas de talla alta como las especies de *Gynerium spp*, algunas Musaceas y algunas Araceas. El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.01 %.

. **Herbáceas de playa.** Corresponde a las áreas dominadas por vegetación natural herbácea abierta que presentan una cobertura entre 30 y 70 % del área total de la unidad. En ningún caso se pueden presentar elementos arbóreos. Se desarrollan sobre áreas de suelos arenosos que no retienen humedad. Por lo general este tipo de cobertura aparece en las zonas de reciente formación, como las espigas y las barras costeras. En este tipo de terreno, suelen aparecer especies que se caracterizan por ser fijadoras de nitrógeno, y suelen alterar los suelos para que otro tipo de cobertura aparezca, como los arbustales, y así continuar la sucesión ecológica. Las especies que se pueden encontrar son: *Cenchrus pauciflorus*,

Homolepsis aturensis, *Ipomea pes-caprea*, *Ipomoea stolonifera*, *Cannavalia marítima*, *Pectis arenaria* y *Stenotaprum secundatum* (von Prah, Cantera y Contreras, 1990). El porcentaje de área que ocupa esta cobertura en la zona de estudio es del 0.01 %.

Geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas

Del total del área de la geomorfología descrita, el 77.30 % se encuentra cubierto por vegetación. La geoforma que más cobertura vegetal presenta son las plataformas intermareales vegetadas (Figura 6) con un 99.11 % y la que menos está cubierta son las playas con 51.11 % (Tabla 3).

Para la geoforma colinas y lomas, se observa mayor predominancia de bosques densos altos de tierra firme (Figura 6) con un 77.99 %; en las islas predomina el helechal no inundable con 79.97 %; en los planos de inundación el manglar con 34.95 %; en las plataformas intermareales vegetadas el manglar con 95.15 % y en las playas herbáceas de playa con 64.49 %.

DISCUSIÓN

La geomorfología de la bahía de Buenaventura está formada por dos procesos genéticos; endógenos y exógenos. Entre los procesos endógenos está la formación de unidades litotectónicas, asociadas a un ambiente tectónico particular. La bahía de Buenaventura hace parte de la cuenca Tumaco, que tiene una extensión desde el sistema de fallas de Garrapatas (Norte), de movimiento dextral, hasta la falla de Buenaventura, de movimiento dextral transpresivo, en la frontera ecuatoriana (Sur) (Ortiz y Valencia, 2013; Mountney y Westbrook, 1997 en Cediell *et al.*, 2003). Esta cuenca representa una cuenca de ante arco (*Forearc Basin*) asociada a un sistema de subducción terciario, por la colisión y subducción de la placa oceánica Nazca y la continental suramericana, y en la cual afloran rocas que contienen flujos basálticos masivos, lavas de almohada, flujos de lava Komatiítica y un complejo de peridotita-gabro, de edad Cretáceo Superior que constituyen el basamento y parecen representar una meseta oceánica acumulada; y rocas sedimentarias donde predominan los shale, arenitas y conglomerados turbidíticos y calizas en

menor proporción, del Cenozoico desde el Eoceno hasta el Plioceno, y formadas en ambientes marinos profundos (Ortiz y Valencia, 2013; Etayo-Serna *et al.*, 1983). Estructuralmente, las

lomas y colinas de Buenaventura son parte de unos pliegues imbricados convergencia oeste que incluyen escamas de corteza oceánica (Etayo-Serna *et al.*, 1983).

Tabla 3. Asociación entre la geomorfología y las coberturas vegetales costeras, mostrando el porcentaje de cobertura.

Unidad geomorfológica	ha total de unidad geomorfológica	ha cubierta por vegetación	% cubierto por vegetación	Cobertura vegetal	ha vegetación	% vegetación
Colinas y lomas	4819.80	4712.14	97.77	Bosque denso alto de tierra firme	3675.23	77.99
				Bosque fragmentado con veg. sec.	770.72	16.36
				Helechal no inundable	119.8	2.54
				Zonas verdes urbanas	79.55	1.69
				Tierras desnudas y degradadas	49.58	1.05
				Bosque frag. con pastos y cultivos	10.67	0.23
				Arboles de zona urbana	4.39	0.09
				Palmar	1.2	0.03
				Arbustal	1	0.02
				Manglar	3012.74	95.15
Plataformas intermareales vegetadas	3194.49	3166.14	99.11	Bosque fragmentado con veg. sec.	27.93	0.88
				Tierras desnudas y degradadas	8.91	0.28
				Bosque frag. con pastos y cultivos	7.57	0.24
				Helechal	7.01	0.22
				Zonas verdes urbanas	6.79	0.21
Plataformas intermareales no vegetadas	2190.54			Ninguna		
				Manglar	80.86	34.95
				Zonas verdes urbanas	45.75	19.77
				Palmar	44.52	19.24
Planos de inundación	245.91	231.39	94.10	Bosque fragmentado con veg. sec.	32.87	14.21
				Bosque denso alto de tierra firme	15.24	6.59
				Árboles de zona urbana	12.15	5.25
				Helechal no inundable	81.96	79.97
				Zonas verdes urbanas	13.37	13.05
Islas	167.33	102.49	61.25	Árboles de zona urbana	7.16	6.99
				Ninguna		
				Herbáceas de playa	0.89	64.49
Lagunas costeras	3.92			Ninguna		
Playas	2.70	1.38	51.11	Bosque fragmentado con veg. sec.	0.44	31.88
				Palmar	0.05	3.62

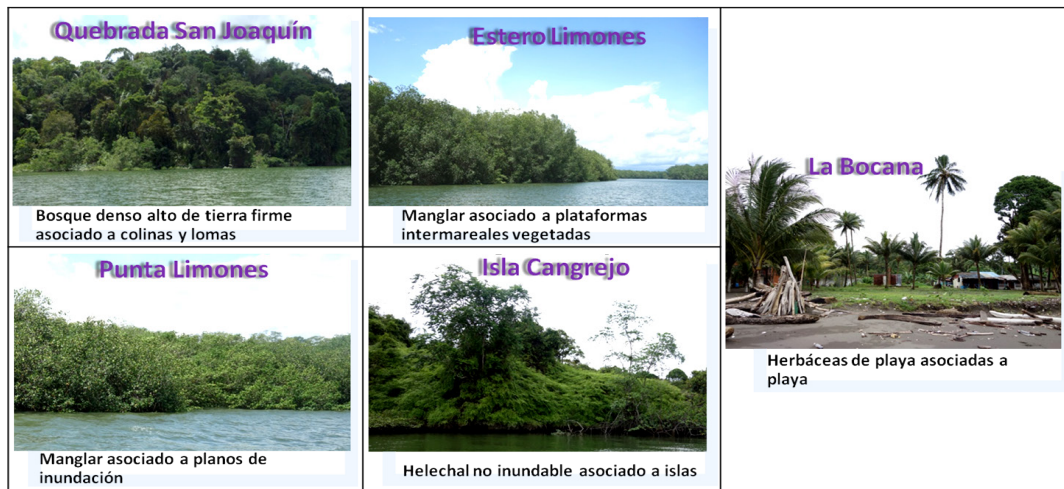


Figura 6. Cobertura vegetal predominante en cada geoforma de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca.

Al mismo tiempo, los procesos exógenos están interactuando con la superficie, modelando así la corteza deformada. Estos procesos exógenos son producto de la interacción de la corteza con la atmosfera, hidrosfera y biosfera produciendo meteorización, erosión y sedimentación en las rocas aflorantes de la superficie y en los suelos.

En la bahía se identificaron unidades geomorfológicas características de costas altas y bajas; es decir, la bahía presenta un tipo de línea de costa compuesta. Las costas bajas o pasivas depositacionales, observan unidades que tienen una génesis marina y fluvial, presentando suelos con depósitos cuaternarios influenciados por la fluctuación diaria mareal y fluvial. Sobre este tipo de costa crece vegetación halófila que soporta condiciones salobres. Estas costas también son conocidas como sumergentes, las cuales son el resultado de las inundaciones por aumentos del nivel del mar o por hundimiento de la corteza terrestre (Johnson, 1919). Las regiones y unidades geomorfológicas encontradas que caracterizan este tipo de costa son: las planicies deltaicas, las planicies costeras, los planos de inundación, las plataformas intermareales vegetadas y no vegetadas, las playas y las lagunas costeras. De estas unidades la que tiene una mayor extensión son las plataformas intermareales vegetadas con 3194,49 ha y se encuentran principalmente

en los sectores conocidos como Punta Limones, La Playita hasta el Estero San Antonio. Es de esperarse que esta unidad sea la de mayor área en estas zonas, debido a que generalmente en las costas predominantemente bajas, la topografía es casi plana, por lo tanto la diferencia mareal en la horizontal es considerablemente grande.

Las costas altas o erosionales activas se caracterizan por presentar unidades geomorfológicas que tienen una génesis tectónica o eustática, y son de rocas sedimentarias. Sobre estas unidades crece vegetación helófila. Estas costas también son conocidas como costas emergentes y su génesis igualmente es debida a la elevación local de la corteza (Johnson, 1919). Son activas porque están expuestas diariamente a la meteorización y por tanto a la erosión causada por algunos organismos que habitan en los afloramientos rocosos, el oleaje y por el flujo continuo de los ríos, principalmente. En la bahía, las regiones y unidades geomorfológicas que caracterizan estas costas son: las lomas, las colinas y las islas rocosas, observadas en La Bocana, Punta Bazan, Punta La Guida, desde El Arrieral hasta El Estero Aguacate y las islas Alba y Cascajal. De estas las unidades con mayor área son las lomas y colinas con un área total de 4819.80 ha. A diferencia de las costas bajas, las costas que son predominantemente altas, por tener una topografía inclinada a escarpada, presentan una mayor diferencia mareal en la vertical, es decir, el cambio mareal se observa mejor en la

altura del nivel del mar, por lo tanto, las unidades asociadas a costas bajas como playas, plataformas intermareales vegetadas y no vegetadas presentan menor extensión.

La cobertura vegetal dominante de la zona fue el bosque denso alto de tierra firme, y esto es debido a que la costa de la bahía de Buenaventura es una costa alta dominada por lomas y colinas, las cuales ocupan casi la mitad de la extensión del área (44.04 %). En áreas donde las costas son bajas como la zona de Tumaco (Bermúdez-Rivas *et al.*, 2014), la cobertura dominante se caracterizó por ser vegetación asociada a planos de inundación y plataformas intermareales vegetadas como son los manglares. En esta área las plataformas intermareales ocupan una gran porción de territorio comparada con las colinas. A pesar que en el área de Buenaventura existe una gran dominancia de las colinas y lomas en la geomorfología del paisaje, el porcentaje de cobertura del manglar fue alto comparado con las otras coberturas (*e.g.* Bosque fragmentado con vegetación secundaria), y esto es debido a que las geoformas inundables albergan menos diversidad de coberturas que las colinas, ya que las plantas que crecen en estos planos y plataformas inundables, necesitan una alta especialización para sobrevivir en estas condiciones (Bermúdez-Rivas *et al.*, 2014).

La asociación que se encontró entre las coberturas vegetales y la geomorfología no fue de carácter exclusivo; algunas de las coberturas encontradas se presentaron en más de una de las geoformas identificadas; sin embargo, la dominancia de algunas de estas coberturas fue alta. Un ejemplo de esto fue la cobertura de manglar en los planos de inundación, que tuvo una extensión total del 34.95 % y que a su vez ocupó cerca de un 95.15 % de las plataformas intermareales vegetadas. En este tipo de geoformas que están influenciadas por la marea directamente, la dominancia estuvo marcada por los manglares que son característicos de estos espacios, debido a las adaptaciones fisiológicas y morfológicas que les permiten desarrollarse en terrenos inestables (Bird, 2008).

CONCLUSIONES

- La metodología empleada al combinar varios productos derivados en la obtención de la

identificación de coberturas vegetales y geomorfologías, combinado con técnicas de teledetección e interpretación de imágenes satelitales, permitió tener bajos niveles de error en todo el proceso de verificación en campo; dado esto por la alta precisión de los datos LiDAR y las imágenes de sensores remotos.

- No existen asociaciones exclusivas entre coberturas vegetales y la geomorfología costera en esta área del Pacífico. Estos resultados son consistentes con otros estudios que se han hecho en otras zonas del Pacífico (Bermúdez-Rivas *et al.*, 2014).
- La metodología *Corine land Cover* para Colombia se adaptó bien a este tipo de aproximación de las coberturas vegetales y permitió utilizar hasta cuatro niveles de detalle para hacer la identificación y la cartografía de las coberturas vegetales.
- Las colinas y lomas son las geoformas más dominantes y extensas de la zona del área de la bahía de Buenaventura, con un porcentaje de cobertura vegetal boscosa alto (*c.a.* 95 %), comparado con las otras geoformas; además de esto, presentaron la mayor diversidad de coberturas vegetales (79 % del total).
- La zona evaluada de la bahía de Buenaventura posee un muy bajo porcentaje de playas (0.02 %), las cuales en casi la mitad, están cubiertas por vegetación herbácea.
- El casco urbano de Buenaventura está asentado en varias geoformas de las evaluadas (colinas y lomas, plataformas intermareales vegetadas, planos de inundación e islas), en las cuales el común denominador que se observó fue la deforestación de las principales coberturas vegetales que se encontraron a lo largo de la bahía (manglares, bosque denso alto de tierra firme).
- Las coberturas vegetales más extensas en la bahía de Buenaventura fueron coberturas boscosas como por ejemplo el bosque denso alto de tierra firme y los manglares. Estos últimos son exclusivos de geoformas que están influenciadas por el ciclo mareal.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a la Dirección General Marítima y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico, por gestionar proyectos de esta índole con sentido investigativo que impulsan el adecuado manejo del territorio.

Se hace un especial reconocimiento a las tripulaciones del CCCP y del ARC. Gorgona, quienes con su labor, garantizaron la seguridad y bienestar de los investigadores durante los cruceros, brindando acompañamiento en las salidas de campo cuando fue necesario y estableciendo comunicación con las tropas presentes en cada zona para velar por nuestra seguridad.

REFERENCIAS

- ASPRS. (2003). *ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard*. Pags 1 – 9.
- Bermúdez-Rivas, C., Álvarez Machuca, M. C., y Niño Pinzón, D. C. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Boletín Científico CIOH*, 32, 27–46.
- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: An introduction* (Second edition). Queensland 4064, Australia: John Wiley y Sons Inc. p. 411.
- Cediel, F., Shaw, R. P., y Cáceres, C. (2003). *Tectonic Assembly of the Northern Andean Block*, 815–848. En: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, And Plate Tectonics: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 79.
- Dimar-CCCP. (2013). *Zonificación fisiográfica del litoral Pacífico colombiano – FASE I*. San Andrés de Tumaco (Colombia): Centro de Investigación Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. Págs.250
- Dimar-CIOH. (2009). *Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano. Tomo I. Dirección*. (Dirección General Marítima, Ed.). Cartagena de Indias, Colombia: Serie de publicaciones especiales CIOH Vol. 1. Págs. 160
- División de litorales y áreas marinas. (2006). *Marco conceptual para la definición técnica de la jurisdicción de la Dimar*. pp. 230
- Etayo-Serna, F., Barrero, D., Lozano, H.Q., Espinosa, A., González, H., Orrego, A., Ballesteros, I.T., Forero, H.O., Ramírez, C.Q., Zambrano-Ortiz, F., Duque-Caro, H., Vargas, R.H., Nuñez, A., Álvarez, J., Ropain, U.C., Cardozo, E.P., Galvis, N., Sarmiento, L.R., Albers, J.P., Case, J.E., Singer, D.A., Bowen, R.W., Berger, B.R., Cox, D.P. y Hodges, C.A., (1986), *Mapa de terrenos geológicos de Colombia: Publicaciones Geológicas especiales, Ingeominas*, v. 14: Bogotá. pp. 235
- Gómez, J., Carvajal, J. y Otero, J. (2013). *Propuesta de estandarización de los levantamientos geomorfológicos en la zona costera del Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias – Gobernación del Magdalena – Invemar*. Serie de Publicaciones Especiales # 54. pp. 110.
- Ideam. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine-Land cover adaptada para Colombia escala 1:100 000*. Bogotá D.C. Colombia.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam. pp. 72.
- Johnson, D. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar, 42:2, 87.
- Melo, L. H. y Camacho, M. A. (2005). *Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra*. Instituto geográfico Agustín Codazzi. pp. 156.
- Mendoza, M., Bocco, G., Granados, E. L. y Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Boletín del instituto de geografía, UNAM*, 49, 92–117.

- Mountney, N. P., y Westbrook, G. K. (1997). Quantitative analysis of Miocene to Recent forearc basin evolution along the Colombian convergent margin. *Basin Research*, 9, 177–196.
- National Soil Survey Handbook (NSSH). (2008). *Glossary of landform and geologic terms*. pp. 126.
- Observatorio Sismológico de Occidente. (2000). *Evaluación de amenazas naturales y bases para la mitigación de riesgos en el área urbana de Buenaventura*. Informe final. Observatorio sismológico del suroccidente - OSSO. Universidad del Valle. Santiago de Cali. pp. 40.
- Otero, L. J. (2005). *Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguas abrigadas (bahías, estuarios, etc.) cuando no tienen registros instrumentales*. Informe Técnico. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico CIOH-P. Tumaco, Colombia. pp. 150.
- Ortiz, A. y Valencia, J. (2013). Geología de la Cuenca de Tumaco Norte: Revisión Previa de Información Petrolera Para Perforación de un Pozo Estratigráfico Profundo. *Boletín de Geología*, 35 (1), 131-141.
- Rao, D. P. (2002). Remote sensing application in geomorphology. *Tropical Ecology*, 43(1), 49–59.
- Smith, M. J., y Pain, C. F. (2009). Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress Progress in Physical Geography*, 33(4), 568–582.
- Vargas Cuervo, G. (2015). *Guía y catálogo de unidades geomorfológicas en Colombia por sensores remotos*. Bogotá D. C. Colombia.: Universidad Nacional de Colombia, Vicerrectoría de Investigación. pp. 196.
- Von Prael, H., Cantera, J. y Contreras, R. (1990). *Manglares y hombres del pacifico colombiano*. Fondo FEN Colombia. pp. 193.
- Wannasiri, W., Nagai, M., Honda, K., Santitamont, P., y Miphokasap, P. (2013). Extraction of mangrove biophysical parameters using airborne LiDAR. *Remote Sensing*, 5(4), 1787–1808.

