




Mapeo del hábitat costero de bahía Aguacate y bahía Cupica, costa norte del Pacífico colombiano

Coastal habitat mapping of Bahia Aguacate and bahia Cupica, northern Colombian Pacific coast

Paula Silvar¹ and Alan Giraldo²

 *OrcID*: 0000-0002-9983-3744

 0000-0001-9182-888X

¹ Ghent University, Faculty of Sciences, Marine Biology, International Master of Science in Marine Biodiversity and Conservation EMBC. Ghent, Belgium.

² Universidad del Valle, Departamento de Biología, Grupo de Investigación en Ciencias Oceanográfica. Cali, Colombia. alan.giraldo@correounivalle.edu.co

RESUMEN

Las técnicas de clasificación y el mapeo básico del hábitat permiten establecer áreas distintivas y representativas de una región. En el norte del Pacífico colombiano, bahía Aguacate (Cabo Marzo) y bahía Cupica (Punta Piñas) han sido señaladas como áreas ecológicamente importantes debido a la presencia de ecosistemas estratégicos, como bosques de manglar y formaciones coralinas. Además, albergan caladeros de pesca artesanal. Con el propósito de describir la estructura espacial del hábitat intermareal y submareal en estas localidades, se utilizó la técnica de clasificación por ordenación jerárquica, para construir mapas temáticos que incrementen el conocimiento disponible sobre las características físicas del paisaje marino de estas localidades y que además sirvan de insumos para direccionar las estrategias de manejo y conservación locales.

PALABRAS CLAVES: Hábitat costeros, Clasificación, Mapeo de Hábitat, Sistema de Información Geográfico, Planificación de la Conservación.

ABSTRACT

Colombian North Pacific region host a huge valuable ecosystem due to its particular conditions. Some of these sectors are isolated and pristine, with little research effort. When there is a limitation of economic resources, classification and basic mapping techniques of the intertidal and subtidal habitats allow the identification of distinct and representative areas of a region. Previous studies point out the zones of Cabo Marzo- Bahia Aguacate and Punta Cruces- Bahia Cupica as ecologically important areas, therefore the present study focus on habitat mapping these sites. To create the map, we develop a hierarchical classification of intertidal and subtidal habitats separately. In conclusion, Colombian North Pacific region is extremely heterogenic in coastal habitat types and therefore important area for biodiversity conservation. Strategic conservation management and habitat protection is needed, integrating social-ecological approach in order to support the sustainable utilization of the rich resources contained in the region.

KEY WORDS: Coastal habitats, Classification, Habitat mapping, Geographic information system, Conservation planning.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas costeros son altamente complejos y en ellos se desarrollan numerosos procesos ecológicos que proporcionan gran cantidad de servicios ecosistémicos (Roberts *et al.*, 2003; Harborne *et al.*, 2008; Barbier *et al.*, 2011). Por ejemplo, cumplen un papel esencial en el reciclaje de nutrientes, desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la calidad del agua, protegen la costa de los procesos erosivos naturales, participan en el balance global del carbono a través de su almacenamiento, funcionan como zonas de desove y cría de varias especies de peces, y albergan hábitats clave en las rutas de especies migratorias, entre otros servicios. Además, los organismos bentónicos, que se encuentran en los hábitats costeros son una importante fuente de alimentos para organismos superiores como los peces, por lo tanto, estos hábitats y su conectividad son esenciales para el éxito del ciclo de vida de las especies, así como para garantizar la conservación de la diversidad de la reserva genética local (Moberg and Folke, 1999; Liqueste *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014).

Recientemente, se ha reconocido la importancia del mapeo de la distribución espacial de los hábitats costeros en la gestión y la conservación ambiental (Wright and Heyman, 2008). Este proceso, que tiene como meta consolidar mapas de los hábitats del fondo marino, abarca las disciplinas de biología marina, ecología, geología, hidrografía, oceanografía y geofísica, e implica la combinación de conjuntos de datos dispares de estas disciplinas, para producir representaciones espaciales simplificadas del fondo marino relacionadas con la distribución de las características biológicas (Shumchenia and King, 2010).

Aunque la biología bentónica está influenciada tanto por las características geológicas y morfológicas del fondo marino, como por la columna de agua suprayacente, se puede utilizar el tipo de sustrato como parámetro determinante, a modo de simplificación (Lund and Wilbur, 2007). El tipo de sustrato es uno de los parámetros más estables y comúnmente utilizados para clasificar el fondo marino de los hábitats costeros, y su efecto sobre la distribución espacial de la fauna bentónica es ampliamente reconocido (Cousson and Bourget, 2005; Becking *et al.*, 2006; Howell, 2010; Beaman *et al.*, 2016). En las regiones tropicales, el alcance y la naturaleza de las estructuras biogénicas, tales como los arrecifes de coral, lechos de pastos marinos, y bosques de manglares, se pueden mapear como unidades biogeomorfológicas (Brown *et al.*, 2011). Por lo tanto, el mapeo es un primer paso esencial para

INTRODUCTION

Coastal ecosystems are highly complex and undertake countless processes, besides they are involved in an enormous amount of ecosystem services (Roberts *et al.*, 2003; Harborne *et al.*, 2008; Barbier *et al.*, 2011). For example: they fulfil a crucial role in the recycling of nutrients, play an important role in maintaining water quality, protect shoreline from natural erosive processes, contribute to the global carbon stock via carbon storage, function as spawning and nursery grounds for several fish species, be key habitats in migratory routes, and so on. Moreover, benthic organisms, which inhabit coastal habitats, function as important food sources for higher organisms such as fish. Therefore, these habitats and the connectivity among them are crucial for the successful life cycle of species and to guarantee the maintenance of genetic diversity of gene pool protection (Moberg and Folke, 1999; Liqueste *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014).

Recently, map coastal habitat spatial distribution has been recognized for its enormous importance in management and conservation (Wright and Heyman, 2008). The process of producing seafloor habitat maps cuts across the disciplines of marine biology, ecology, geology, hydrography, oceanography and geophysics, and involves the combining of disparate data sets from these disciplines to produce simplified spatial representations of the seafloor relating to the distribution of biological characteristics (Shumchenia and King, 2010).

Although benthic biology is influenced by both seafloor characteristics (geological and morphological) and the overlying water column influence benthic biology, in order to simplify it can be used substratum type as the determinant parameter (Lund and Wilbur, 2007). Substrate type is one of the most stable and commonly used parameters to classify the seafloor of coastal habitats, and its effect on the spatial distribution of benthic fauna is widely recognized (Cousson and Bourget, 2005; Becking *et al.*, 2006; Howell, 2010; Beaman *et al.*, 2016). In tropical regions, the extent and nature of biogenic communities, such as coral reefs, sea grass beds and mangrove forests, can be mapped as biogeomorphical units (Roff and Zacharias, 2011). Thus, mapping is a vital first step in unravelling ecological complexities and

desentrañar las complejidades ecológicas de los ecosistemas marinos y proporcionar mejor información espacial para la gestión (Brown *et al.*, 2011).

La costa Norte del Pacífico colombiano alberga diferentes ecosistemas de importancia biológica y las comunidades locales dependen en gran medida de sus recursos naturales (Giraldo y Valencia, 2008). Dada su importancia, una aproximación proactiva para promover la conservación marina y costera es necesaria. Debido a esto, el propósito de este estudio fue elaborar una clasificación práctica del hábitat (intermareal y submareal) y crear un mapa detallado del hábitat costero de dos sitios de importancia ecológica de la zona norte del litoral Pacífico colombiano: bahía Agucate y bahía Cupica (Fig. 1), información que no estaba disponible previamente para la región.

ÁREA DE ESTUDIO

Ambas localidades presentan una combinación peculiar de condiciones marinas debido a que: (i) los hábitats de aguas poco profundas son escasos la zona norte del litoral Pacífico colombiano debido a que la plataforma continental es estrecha y tiene una pendiente pronunciada, (ii) se encuentran en una zona remota donde el acceso terrestre a la costa es limitado, ya que no existe infraestructura vial para llegar a la mayoría de las zonas, (iii) la selva tropical termina al borde del agua, y (iv) al tener poca población, la presión antropogénica es muy reducida. Bahía Agucate (6° 51' 49" N, 77° 40' 05" W) se extiende sobre aproximadamente 17 km de costa, destacando en la zona Cabo Marzo (6° 50' 08" N, 77° 40' 42" W), un sitio particular denominado el Acuario (6° 49' 56" N, 77° 40' 45" W), el cual está rodeado de islotes y peñascos, que proporcionan unas condiciones marinas excepcionalmente únicas en la zona. Bahía Cupica (6° 41' 11" N, 77° 27' 42" W) se extiende sobre aproximadamente 36 km de costa. La zona se caracteriza por la presencia de un frondoso bosque de manglar en su interior, destacando la caleta de Piñas (6° 39' 16" N, 77° 30' 43" W) en Punta Cruces (Fig. 1).

Durante 2008, se realizó una caracterización ecológica de los ecosistemas clave en ambas bahías, que incluyó las comunidades de coral (Zapata *et al.*, 2008a), la ictiofauna coralina y rocosa (Castellanos *et al.*, 2008; Zapata *et al.*, 2008b), los manglares y la fauna intermareal de la costa rocosa (Cantera *et al.*, 2008; Londoño-Cruz *et al.*, 2008), y las condiciones oceanográficas en el ambiente pelágico (Giraldo *et al.*, 2008). Sin embargo, no se realizó el esfuerzo de mapeo de hábitats.

providing improved spatial information for management of marine systems (Brown *et al.*, 2011).

Colombian North Pacific coast is a biologically valuable ecosystem, and the local communities rely heavily on its natural resources (Giraldo and Valencia, 2008). Given its importance, a proactive approach to marine and coastal conservation is vital. Due to this, the aim of this study was to develop a practical habitat (intertidal and subtidal) classification and create a fine-scale map of coastal habitats of two ecologically important sites of the Colombian North Pacific coast: Bahía Agucate and Bahía Cupica (Figure 1), which was not previously available for the region.

STUDY AREA

Both locality have rather unique combination of marine conditions because: (i) shallow-water habitats are limited due to the narrow continental shelf and steep slope, (ii) it is a remote area there is limited accessibility to the shore, since there is no land access infrastructure to most areas (iii) the rain forest terminates at the water's edge (iv) and as it's sparsely populated the anthropogenic pressure is considerably low. Bahía Agucate (6° 51' 49" N, 77° 40' 05" W) extend over approximately 17 km of shoreline, standing out Cabo Marzo (6° 50' 08" N, 77° 40' 42" W), where the geomorphology creates a special site named El Acuario (6° 49' 56" N, 77° 40' 45" W) surrounded by islets and crags, which provide exceptionally unique marine conditions. Bahía Cupica (6° 41' 11" N, 77° 27' 42" W) extend over approximately 36 km. The area is characterized by the presence of the Cupica mangrove and an outstanding cove named Piñas (6° 39' 16" N, 77° 30' 43" W) in Punta Cruces (Figure 1).

During 2008, an ecological characterization of key ecosystems was carried out in both bays, which included coral communities (Zapata *et al.*, 2008a), coral and rocky ichthyofauna (Zapata *et al.*, 2008b; Castellanos *et al.*, 2008), mangroves and intertidal rocky shore fauna (Cantera *et al.*, 2008; Londoño-Cruz *et al.*, 2008) and pelagic oceanographic conditions (Giraldo *et al.*, 2008). However, habitat mapping effort was not carried out. In order to create a map, first we must establish habitat classification.

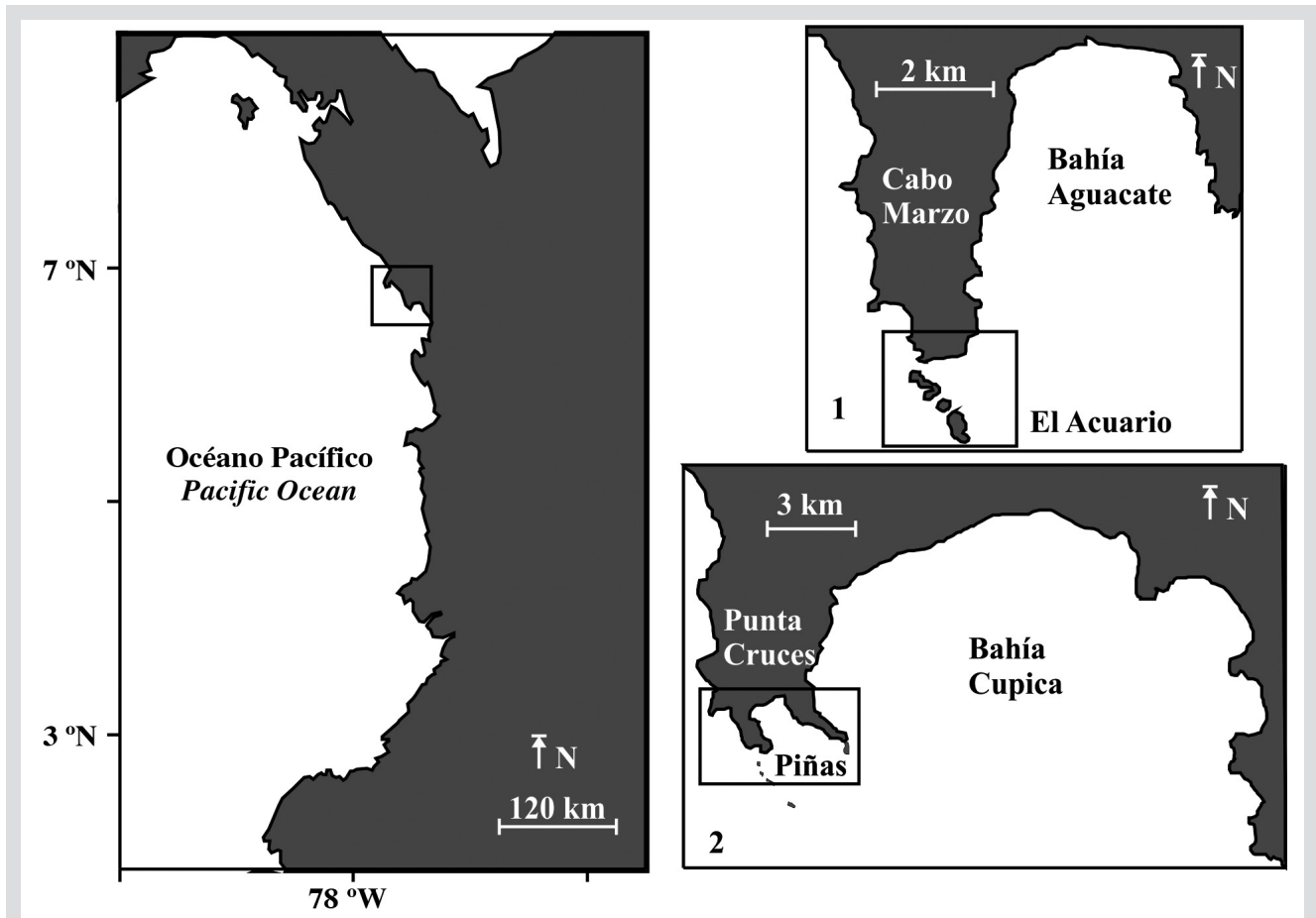


Figura 1. Mapa de la costa del Pacífico colombiano que muestra el área de estudio general indicada por un cuadrado negro. Los sitios de estudio en particular son: (1) Cabo Marzo y bahía Aguacate, (2) Punta Cruces y bahía Cupica, los cuales se muestran por separado, con Piñas y El Acuario señalados por cuadrados negros.

Figure 1. Map of Colombian Pacific coast showing the general study site indicated by a black square. The specific study sites (1) Cabo Marzo and Bahía Aguacate (2) Punta Cruces and Bahía Cupica are shown separately with Piñas and El Acuario indicated by black squares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para crear un mapa, primero se ha de establecer la clasificación del hábitat, cuyo objetivo es proporcionar un lenguaje a través del cual se puedan comunicar y gestionar los datos y la información sobre los hábitats. Una mayor comprensión de cómo los hábitats se relacionan entre sí y con el entorno circundante es esencial para desarrollar una gestión basada en el ecosistema (McDougall *et al.*, 2007). Hay una serie de elementos y cuestiones a considerar al clasificar los hábitats marinos. Es fundamental tener en cuenta que la clasificación del hábitat depende de la escala en que se realice; sin embargo, el esquema debe ser adaptable a varias escalas según sea necesario para la gestión.

Para este estudio, el hábitat se definió como las condiciones físicas y ambientales que proveen espacio vital a una comunidad biológica en particular junto con la propia

MATERIALS AND METHODS

The goal of habitat classification is to provide a language through which data and information regarding habitats can be communicated and managed. Greater understanding of how habitats relate to each other and the environment around them is essential for ecosystem-based management (McDougall *et al.*, 2007). There are a number of elements and issues to take into consideration when classifying marine habitats. It is critical to take into account that habitat classification is scale dependent; however, the scheme should be adaptable to various scales as needed for management.

For this research habitat was defined as both the physical and environmental conditions that support a particular biological community together with

comunidad. (Lund y Wilbur, 2008), utilizando el término como sinónimo de “biotopo”. Esta definición asume que se deben establecer límites definidos entre los tipos de hábitats adyacentes para la representación espacial de patrones biológicos. Por lo tanto, se elaboró un sistema jerárquico de clasificación estandarizado y adecuado para la zona de estudio. Este enfoque también permite agregar otras categorías en el futuro. Para realizar la clasificación, se tuvo en cuenta la literatura previa sobre los tipos de hábitat y los elementos de biodiversidad de las costas colombianas siguiendo a Segura-Quintero *et al.* (2012).

La clasificación del hábitat intermareal se mapeó de acuerdo con las categorías resumidas en la Tabla 1. Las reglas de mapeo para el nivel 2 (tipo de costa) que se aplicaron en este estudio fueron: (i) se identificó como playa de arena aquella donde toda la zona intermareal estuvo compuesta de arena; (ii) se identificó como costa rocosa aquella donde toda la zona intermareal estuvo compuesta de roca; (iii) las costas mixtas incluyeron una combinación de arena y roca; (iv) los islotes se reconocieron como una entidad propia, y por lo tanto no se clasificaron en su tipo de hábitat; (v) se identificó como estuario de río la región de la desembocadura de un río; y (vi) los manglares se mapearon como unidades biogeomorfológicas.

Tabla 1. Esquema de clasificación jerárquica utilizado para codificar las zonas intermareales a lo largo de la costa del área de estudio.

Nivel 1 / Level 1	Nivel 2: tipo de costa Level 2: Coast type	Nivel 3: tipo de hábitat Level 3: habitat type
Costa intermareal <i>Intertidal shore line</i>	Arenosa / <i>Sandy</i>	Playa de arena / <i>Sandy beach</i>
	Mixta / <i>Mixed</i>	Costa mixta / <i>Mixed shore</i>
	Rocosa / <i>Rocky</i>	Playa de bloques de roca / <i>Boulder beach</i>
		Playa de gránulos / <i>Granule beach</i>
		Costa de acantilado rocoso / <i>Cliff rocky shore</i>
	Costa rocosa protegida / <i>Sheltered rocky shore</i>	
Islote / <i>Islet</i>	Islote costero / <i>Coastal islet</i>	
Estuario / <i>River mouth</i>	Estuario de río / <i>River mouth shore</i>	
Manglar / <i>Mangroove</i>	Parche de manglar / <i>Mangroove patch</i>	

El tipo de costa rocosa se subdividió por tipos de hábitat, según las siguientes reglas de mapeo. Las costas de acantilados rocosos se reconocieron cuando la roca es casi perpendicular a la línea de agua. Cuando la roca crea algún tipo de refugio en la zona intermareal, se denominó costa rocosa protegida. La fuerte variación de las mareas en la región, unida a las costas rocosas protegidas, permite la formación de charcos, que generalmente contienen

community itself (Lund and Wilbur, 2008) and the term is used synonymously with “biotopo”. This definition makes the assumption that in order to spatially represent biological patterns, we must impose distinct boundaries between adjacent habitat types. Therefore, a standardized hierarchical classification system suitable for the study area was developed. This approach also allows other categories to be added in the future. The classification was made taking into account previous literature concerning habitat types and biodiversity elements of the Colombian coasts classified by Segura-Quintero *et al.* (2012).

The intertidal habitat classification was mapped according to the categories summarised in Table 1. The mapping rules for level 2, coast type rules applied in this study were: (i) a sandy beach was identified where the entire intertidal was comprised of sand, (ii) a rocky shore was identified where the entire intertidal was comprised of rock, (iii) mixed shores comprised of a combination of sand and rock; (iv) islets are recognised as a feature in their own right and thus are not categorised into their habitat types; (v) a river mouth shore was identified along the river mouth region; (vi) Mangroves are mapped as biogeomorphical units.

Table 1. The hierarchical classification scheme used to code intertidal environments along the study site shoreline.

Rocky coast type was further subdivided by habitat types, by the following mapping rules. Cliff rocky shores were recognized when the rock is almost perpendicular to the water. When the rock creates some kind of shelter at the intertidal region, we named it sheltered rocky shore. The region’s strong tidal variation, coupled with sheltered rocky shores enable the formation of puddles, which generally have species specially adapted

especies especialmente adaptadas a este tipo de hábitat. Se identificó una playa de bloques cuando el depósito de la playa consistía en gran parte de bloques de roca (256-4096 mm), y se reconoció la playa de gránulos cuando el depósito de la playa consistía principalmente de gránulos (2-4 mm).

Se identificaron los hábitats submareales a lo largo de la costa hasta 50 m de profundidad. La zona submareal se mapeó de acuerdo con la Tabla 2. Para la clasificación submareal, se definió el nivel 2 de tipo de sustrato de acuerdo con el tamaño de grano del sedimento y la existencia de estructuras biogénicas (coral). Se reconocieron dos categorías principales (desnudo y coralino). El sustrato desnudo se definió como un lecho marino donde el cubrimiento por corales osciló entre 0 y 10%. Las divisiones de nivel 3 se basaron en el tipo de sustrato del lecho marino. El sustrato puede estar compuesto por lecho de roca o sedimentos no consolidados: grava, arena, limo y arcilla. Cuando el lecho marino estuvo compuesto por sedimentos no consolidados, se determinó el tipo de hábitat por el tamaño de grano principal: roca (256-4096 mm), adoquín (64-256 mm), guijarro (4-64 mm), gránulo (2-4 mm), arena gruesa (0,50-2,00), arena mediana (0,25-0,50), arena fina (0,125-0,25 mm), arena muy fina (0,0625-0,125 mm), y barro (<0,0625).

Tabla 2. Esquema de clasificación jerárquica utilizado para codificar las zonas intermareales a lo largo de la costa del área de estudio.

Nivel 1 <i>Level 1</i>	Nivel 2 <i>Level 2</i>	Nivel 3: tipo de sustrato <i>Level 3: Substrate type</i>	Nivel 4: tipo de hábitat <i>Level 4: habitat type</i>
Submareal <i>Subtidal</i>	Desnudo <i>Bare</i>	Grava / <i>Gravel</i>	Gránulo / <i>Granule</i>
			Guijarro / <i>Pebble</i>
			Adoquín / <i>Cobble</i>
		Bloque de roca / <i>Boulder</i>	
		Arena / <i>Sand</i>	Arena muy fina / <i>Very fine sand</i>
		Arena fina / <i>Fine sand</i>	
		Arena media / <i>Medium sand</i>	
		Arena gruesa / <i>Coarse sand</i>	
		Limo y arcilla / <i>Silty and Clay</i>	Barro / <i>Mud</i>
		Sustrato rocoso / <i>Bedrock</i>	Sustrato rocoso / <i>Bedrock</i>
Coralino <i>Coral</i>	Arrecife de coral consolidado <i>Consolidated coral reef</i>		Masivo / <i>Massive</i>
			Ramificado / <i>Branching</i>
			Mixto / <i>Mixed</i>
		Arrecife de coral no consolidado / <i>Unconsolidated coral reef</i>	Masivo / <i>Massive</i>
			Ramificado / <i>Branching</i>
		Mixto / <i>Mixed</i>	

to this habitat type. Boulder beach was identified where beach deposit consists largely of boulders (256-4096 mm) and Granule beach was recognized where beach deposit consists largely of granule (2-4 mm).

Subtidal habitats were identified along the coast on the continental shelf down to 50 m. The subtidal region was mapped according to Table 2. For subtidal classification, we use the substrate type to define level 2: sediment grain size and biogenic structures (coral). Two main categories are recognised (bare and coral). Bare is define as having a seabed with 0 to less than 10% colonization by corals. Level 3 divisions were based on the seabed's substrate type. The substrate may be comprised of bedrock or unconsolidated sediments-gravel, sand, silt and clay. When the seabed was comprised of unconsolidated sediments, the habitat type was determined by the major grain size: boulder (256-4096 mm), cobble (64-256 mm), pebble (4-64 mm), granule (2-4 mm), coarse sand (0.50-2.00), medium sand (0.25-0.50), fine sand (0.125-0.25 mm), very fine sand (0.0625-0.125 mm), and mud (<0.0625).

Table 2. Hierarchical classification scheme used to code intertidal environments along the study site shoreline.

Se consideró un arrecife de coral como la estructura biogenética compuesta por un sustrato endurecido formado por corales constructores de arrecifes. A menudo, el sustrato rocoso es la base de estos arrecifes, pero la presencia de coral o restos de coral en la superficie del sustrato rocoso superior al 10% fue razón suficiente para categorizar el hábitat dominante como un arrecife de coral. El sustrato consistente en 10% o más de fondo duro de arrecife se consideró coralino; y se subdividió a continuación para el nivel 3, en base al tipo de sustrato, en un arrecife de coral consolidado o arrecife de coral no consolidado. En base al tipo de hábitat, se determinó un nivel 4 adicional con la ayuda de estándares de clasificación ecológica para las costas y el mar. El nivel 4 se subdividió en función de la especie de coral dominante: masivo, ramificado, o mixto (Tabla 2). Se identificó el tipo de hábitat de coral masivo en las zonas donde dominaron los corales masivos que tienen forma característica de bolas o rocas y se identificó el tipo de hábitat de coral ramificado en las zonas donde dominaba el coral que crecía en forma de árbol y tenía numerosas ramas, algunas con ramas secundarias. Las zonas donde la abundancia de coral masivo y ramificado fueron similares, se reconocieron como hábitats de coral mixto.

El trabajo de campo fue desafiante debido a las limitaciones logísticas y de recursos impuestas por la zona de estudio. La clasificación de la zona submareal se realizó a lo largo de transectos paralelos a la costa geográficamente ubicados utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Los tipos de hábitats fueron clasificados in situ y georreferenciados. Para hacer una clasificación de la zona submareal cercana a la orilla en las zonas menos profundas, se realizó una observación de campo bajo el agua en ambos sitios de estudio. Las metodologías utilizadas para la medición de la zona submareal dependieron de la profundidad del agua. Los métodos utilizados para la medición de los primeros metros, cerca de la orilla, donde existen límites poco definidos en las características del fondo marino, fueron el buceo de apnea y el registro fotográfico y de video.

Más lejos de la costa, donde hay cambios graduales en las características del fondo marino, se utilizó el dragado como técnica de muestreo. La clasificación de la zona submareal en las zonas más profundas se realizó mediante el análisis granulométrico de las muestras tomadas con draga. En términos generales las muestras de sedimento se obtuvieron con una draga Van Veen en puntos específicos de una cuadrícula (0,005°). Se tomó una submuestra representativa de sedimento, se secó y se pasó a través de un conjunto de tamices con abertura de malla estándar de EE. UU. (US Standard Sieve), utilizando la escala Phi para clasificar el sedimento por clases de tamaño de grano. Se construyó un histograma y una curva acumulativa

Coral Reef is comprised of a hardened substrate formed by reef building corals. Often bedrock is the base for these reefs but the presence of coral or remnant coral on the bedrock surface above 10% is reason to categorize the dominant habitat as coral reef. Substrate consisting of 10% or greater reef hard bottom was considered coral and subdivided by substrate type for level 3 into consolidated coral reef or unconsolidated coral reef. A further level 4 was determined based on habitat type, assisted by coastal and marine ecological classification standards. Level 4 was subdivided based on the dominant specie massive, branching or mixed (Table 2). We identify as massive coral habitat type areas dominated by massive corals that are characteristically ball- or boulder-shaped and relatively slow growing. This type includes reefs dominated by submassive corals, which are similar to massive corals. Branching habitat type was identified at areas where was dominant coral that grow in a tree-like shape and have numerous branches, some with secondary branches. Areas where massive and branching coral abundance were similar were recognized as mixed coral habitat.

Fieldwork was challenging due to logistic and resources limitations imposed by the study site. Shoreline subtidal classification was made along transects parallel to the coast geographically located using Global Positioning System (GPS). Habitat types were classified in situ and geo-referenced. In order to make near shore subtidal classification of the shallower areas, both study sites were subjected to underwater field observation. Subtidal survey methodologies used were dependant on water depth. Underwater snorkel, photo and video survey were the methods used for the first meters, close to the shore, where discontinuous boundaries exist between seafloor features. Further offshore, where there are gradational shifts in seafloor characteristics, we use grab as the sampling technique. Subtidal classification of the deeper areas was accomplished by analysing grain size of grab samples.

Sediment grab samples was collected from discreet point locations of a grid (0.005°). A representative subsample of dry sediment was toked and ran it though a set of US Standard Sieve Mesh and the Phi Scale to classify the sediment by size classes. A histogram and accumulative curve were constructed for all the samples. The median and the mean grain size were computed using R software. For the map, we used the statistical median of the samples, which represents the value of the middle item

para todas las muestras. La mediana y el tamaño medio de grano se calcularon utilizando el software estadístico R. Para la representación gráfica se utilizó la mediana estadística de las muestras, que representa el valor del elemento medio en un conjunto de datos ordenados por rango. La mediana gráfica se calculó con el punto de corte del 50% y la media gráfica se calculó utilizando el tamaño medio de grano para un porcentaje acumulado del 16, 50 y 84%.

La línea de costa y algunas características intermareales se delinearón a partir de las imágenes aéreas de Google Earth disponibles para la zona de estudio. El software ArcGis 10 (Sistema de información geográfica de ESRI) y sus extensiones se usaron para mapear datos a partir de una base de datos de Excel. La proyección WGS84 (Universal Transversal de Mercator) se utilizó para todos los archivos de formas. La clasificación de la costa fue mapeada a partir de puntos de GPS convertidos en líneas. Para producir capas continuas de los datos de cobertura del tamaño de grano segmentado y clasificado a partir del análisis, utilizamos las medianas del tamaño de grano. Los puntos de la cuadrícula fueron transformados a formato raster.

RESULTADOS

Los tipos de hábitats intermareales encontrados en ambos sitios de estudio fueron muy heterogéneos (Fig. 2, Fig. 3). La mayor extensión de manglar se encontró en bahía Cupica, a lo largo del río Cupica (Fig. 4). El manglar de Cupica se extendió detrás de una playa de arena que funciona como barra. La presencia de unos pocos islotes y riscos a lo largo de la costa y diferentes tipos de playas es también característica en ambos sitios de estudio (Fig. 4). El tipo de sustrato submareal de la zona de aguas poco profundas de ambos sitios mostró una disminución gradual del tamaño del grano con la profundidad (Fig. 5). Este rasgo dominó las zonas de limo y arcilla situadas en la parte interior de las bahías. El Acuario en Cabo Marzo y Piñas en Punta Cruces exhiben más heterogeneidad en el hábitat del fondo marino. Debido a que en estudios anteriores sólo se ha encontrado un crecimiento significativo de arrecifes de coral en Piñas y El Acuario, se hicieron mapas más detallados para estos lugares. La Figura 6 muestra la distribución espacial de las formaciones de coral. Se observó que los corales se formaban sobre todo en arrecifes de coral no consolidados con una pequeña densidad de colonias (Fig. 7). En El Acuario, se encontró principalmente tipos de coral ramificado, pero también comunidades mixtas de coral ramificado y coral masivo. La zona de Piñas presentó mayor abundancia del tipo de coral masivo.

in a set of data arranged in rank order. Graphic median was calculated with the breakpoint of 50%, and Graphic mean was calculated by the mean grain size of the cumulative 16, 50 and 84 percent.

Coastline and some intertidal features were delineated from Google Earth aerial imagery available for the study zone. ArcGis 10 (Geographic Information System from ESRI) and its extensions were used to map data from an Excel database. The WGS84 (Universal Transverse Mercator) projection was used for all shape files. Shoreline classification was mapped from GPS points converted into lines. To produce continuous coverage data layers of the segmented grain size classed from the analysis, we used the median grain size data. The points of the grid were transformed to a raster shape.

RESULTS

The intertidal habitat types found at both study sites are very heterogeneous (Fig. 2, Fig. 3). The largest stand of mangrove is found in Bahía Cupica, along Cupica River (Fig. 4). Cupica Mangrove extends behind a sandy beach. The presence of bit quantity of islets and crags along the shore, it is also characteristic at both study sites (Fig. 4), and different types of beaches (Fig. 4). Subtidal substrate type of shallow water area of both sites, show a gradual decrease of grain size with depth (Fig. 5). This trait dominates silt and clay areas situated at the inner part of the bays. El Acuario at Cabo Marzo and Piñas at Punta Cruces exhibit more seabed habitat heterogeneity. Due to the fact that at previous studies they only found significant coral reef growth at Piñas and El Acuario, more detailed maps were made for these locations. Figure 6 shows coral formations spatial distribution. Coral were found forming on mainly unconsolidated coral reef with small colony density (Fig. 7). At El Acuario, we found mainly branching coral types, but also mixed communities of branching and massive coral. Piñas area presented more abundant massive type of coral.

El Acuario and Piña were identified as two main areas highly heterogenic based on grain size, which simultaneously are the areas where the coral formations were found, stressing the importance of these areas for the coastal ecosystem of the region. Another characteristic emphasised from the subtidal maps is the simultaneous fast decrease of grain size with the steep slope, probably related with ocean currents patterns of the region. The

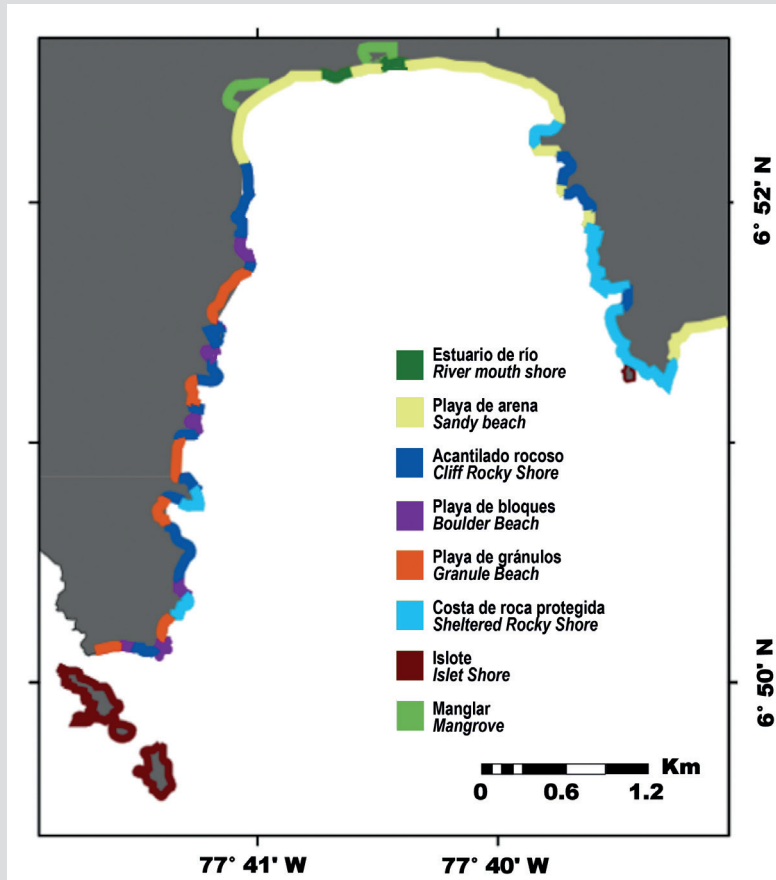


Figura 2. Tipos de hábitat a lo largo de la costa de Cabo Marzo y bahía Aguacate.

Figure 2. Habitat types along Cabo Marzo and Bahía Aguacate shoreline.

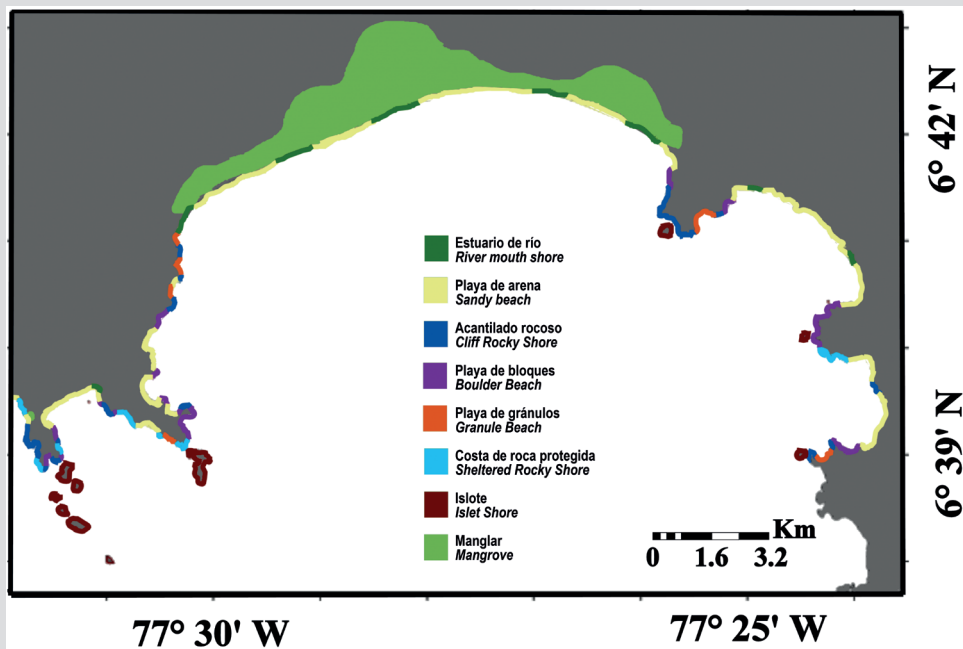


Figura 3. Tipos de hábitat a lo largo de Punta Cruces y bahía Cupica.

Figure 3. Habitat types along Punta Cruces y Bahía Cupica.

Hábitat manglar intermareal / Intertidal mangrove habitat type



Hábitat costa roca intermareal / Intertidal rocky shore habitat type



Tipo playa arenosa y mixta intermareal / Intertidal sandy beach and mixed beach type



Figura 4. Imágenes de los hábitats intermareales identificados en bahía Aguacate y bahía Cupica.

Figure 4. Images of intertidal habitat type registered in Bahía Aguacate and Bahía Cupica.

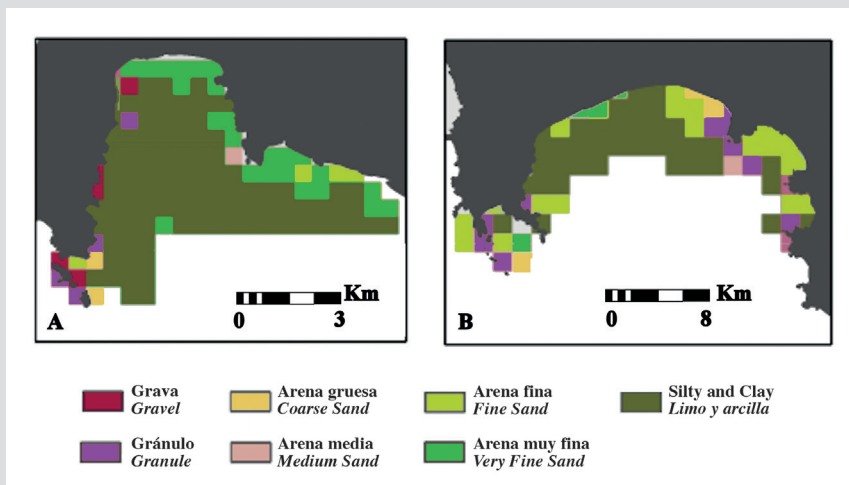


Figura 5. Hábitats por tamaño de grano del sedimento (A) Cabo Marzo y bahía Aguacate; (B) Punta Cruzes y bahía Cupica.

Figure 5. Habitat types of sediment grain size (A) Cabo Marzo and Bahía Aguacate; (B) Punta Cruzes and Bahía Cupica.

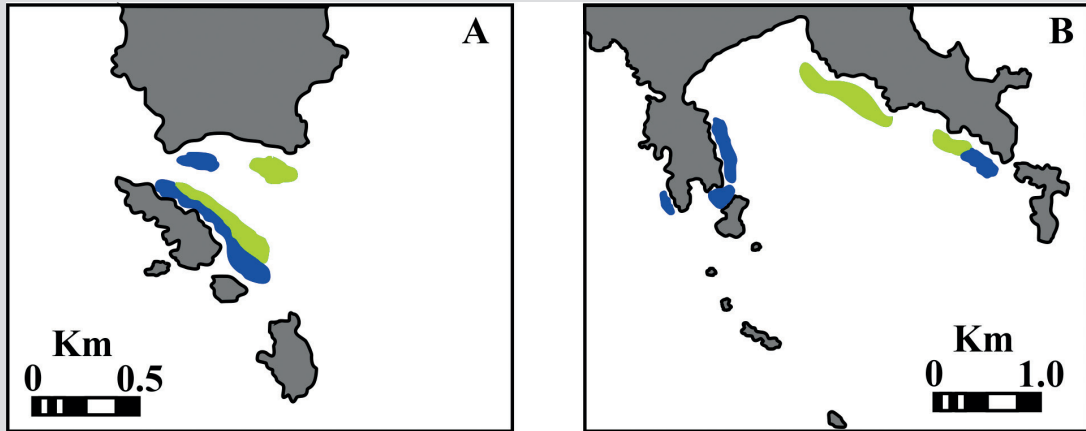


Figura 6. Distribución espacial de coral en (A) El Acuario y (B) Piñas. Azul: arrecife de coral ramificado. Verde: arrecife de coral masivo.

Figure 6. Coral spatial distribution at (A) El Acuario (B) Piñas. Blue: branching coral reef. Green: massive coral reef.

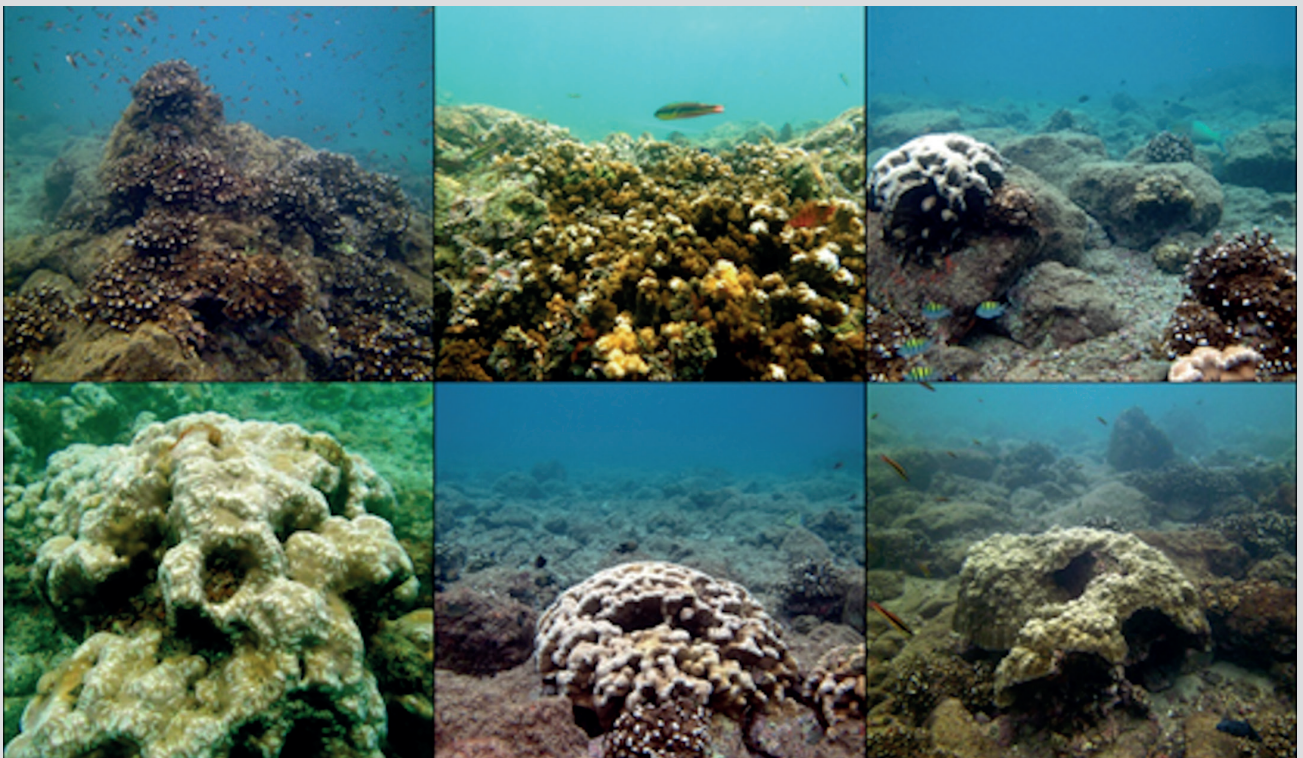


Figura 7. Imágenes del tipo de arrecife de coral no consolidado (ramificado y masivo) del hábitat submareal en El Acuario (Cabo Marzo) y Piñas (Punta Cruces).

Figure 7. Images of subtidal habitat unconsolidated coral reef type (branching and massive) in El Acuario – Cabo Marzo and Piñas – Punta Cruces.

El Acuario y Piña fueron identificadas como dos zonas principales altamente heterogéneas en función del tamaño de grano, las cuales son al mismo tiempo las zonas donde se encontraron las formaciones de coral, resaltando la importancia que tienen estas zonas para el ecosistema costero de la región. Otra característica destacada de los mapas submareales fue la disminución rápida y simultánea del tamaño del grano con

inshore-offshore pattern clearly reflected the hydrodynamic conditions of the area, from highly hydrodynamic shallow depth to the calmer deeper areas. Based on the map we can identify two sedimentary areas: the inshore are characterized by coarser sands and the offshore area that includes finer sediments. At the inner part of both bays (Bahía Aguacate, Bahía Cupica) there was an area of predominant silt/clay

la pendiente pronunciada, probablemente relacionada con los patrones de circulación local en la región. El patrón de corrientes (costa adentro/costa afuera) reflejó las condiciones hidrodinámicas de la zona, desde una zona superficial muy hidrodinámica hasta las zonas más profundas y tranquilas. Teniendo en cuenta el mapa, podemos identificar dos zonas sedimentarias: la cercana a la costa se caracteriza por arenas más gruesas, y la alejada de la costa incluye sedimentos más finos. En la parte interior de ambas bahías (Aguacate, Cupica) había una zona donde predominaba el sedimento de limo y arcilla. Este sedimento más fino se debe principalmente a la proximidad a los estuarios, que abastecen a esta región con grandes cantidades de partículas finas.

DISCUSIÓN

La mayoría de las tecnologías y métodos actuales utilizados para la cartografía marina requieren realizar un muestreo indirecto o remoto (datos satelitales, sonar multihaz y de haz único, sonar de barrido lateral, LiDAR) (Mumby *et al.*, 1999; Mishra *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2011; Micallef *et al.*, 2012). Estos métodos son extremadamente costosos y requieren una tecnología avanzada, que no está siempre disponible; además, tienen limitaciones debido a factores ambientales como la turbidez del agua (Van Rein HB *et al.*, 2009). A pesar de que la selección de las técnicas de muestreo in situ, por ejemplo observaciones mediante buceo con tubo respirador o equipo de buceo autónomo o toma de muestras con draga, requieren un gran esfuerzo de muestreo para crear un mapa representativo, elegimos este enfoque porque son precisos y fáciles de realizar en lugares remotos.

La clasificación del hábitat utilizada en este estudio se basó en las unidades biogeográficas y tipo de sustrato, porque son parámetros conservadores que influyen tanto en la comunidad bentónica (*p.ej.*, macrofauna, meiofauna) como en la comunidad pelágica que vive por encima (*p.ej.*, comunidades de peces) (Bartley *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2011). Además, las unidades biogeográficas—manglares (zona intermareal) y formaciones de coral (zona submareal)—representan hábitats marinos costeros clave que albergan biodiversidad y ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos (Friess and Webb, 2014; Yee *et al.*, 2015)

En la zona intermareal, los resultados de este estudio muestran una costa diversa y heterogénea, que puede atribuirse a las características únicas de la geología, el clima y la oceanografía locales. La geología es el determinante de primer orden de la naturaleza y distribución de los ecosistemas y hábitats costeros (*p.ej.*, costas rocosas protegidas) a gran y

sediment. This finer sediment is mainly due to the proximity to the river mouths that supplies this region with large amounts of fine particles.

DISCUSSION

The majority of today's technologies and methods used for ocean mapping involve indirect or remote sampling (satellite data, multibeam and single-beam sonar, sidescan sonar, LiDAR) (Mumby *et al.*, 1999; Mishra *et al.*, 2006; Brown *et al.*, 2011; Micallef *et al.*, 2012). These methods are extremely expensive and require advanced technology, which is not always available. Moreover, they have limitations due to environmental factors such as water turbidity (Van Rein HB *et al.*, 2009). In spite of the fact that the selection of in situ sampling techniques, for instance snorkel/SCUBA dive observations or grab samples, require extensive sampling effort in order to create an adequate fidelity map, we chose this approach because they are accurate and easily implemented at remote locations.

The habitat classification used in this research was based in biogeomorphic units and substrate type because these are conservative parameters which influence both the benthic community (e.g. macrofauna, meiofauna) and the pelagic community living above (e.g. fish assemblages) (Bartley *et al.*, 2001; Huang *et al.*, 2011). Moreover, biogeomorphic units—mangroves, at intertidal level; and coral formations, at subtidal level—represent key marine coastal habitats hosting biodiversity offering a wide range of ecosystems services (Friess and Webb, 2014; Yee *et al.*, 2015)

At the intertidal level results of this study illustrate a diverse and heterogeneous shoreline, which may be attributed to the unique characteristics of the local geology, climate and oceanography. The geology is the first order determinant of the nature and distribution of coastline ecosystems and habitats (e.g. sheltered rocky shores) at broad and fine scales, respectively (Harris *et al.*, 2013). Regional climate and oceanography are also major influences. Local tropical climate is characterised by abundant rainfall along the coast. Freshwater-input-associated systems are highly influenced by rainfall patterns and rivers flood sporadically (Poveda, 2004; Rangel and Arellano, 2004). This has implications for the distribution of coastal habitats, like mangroves, that are associated with fresh water systems. In addition, abundant rainfall also increases weathering and erosion, resulting in an increase of terrigenous sediment to

pequeña escala, respectivamente (Harris *et al.*, 2013). El clima y la oceanografía regional también son las principales influencias. El clima tropical local se caracteriza por abundantes lluvias a lo largo de la costa. Los sistemas asociados a la entrada de agua dulce están muy influenciados por los patrones de precipitación, y los ríos generan inundaciones esporádicas (Poveda, 2004; Rangel and Arellano, 2004). Esto tiene implicaciones para la distribución de los hábitats costeros, como los manglares, que están asociados con los sistemas de agua dulce. Además, las abundantes lluvias también aumentan la meteorización y erosión, lo que causa un aumento de sedimentos terrígenos hacia la costa e incremento de la zona de playas arenosas (McLachlan y Brown, 2006; Short, 2010).

Otros factores climáticos que influyen en las características de la costa y submareales son la temperatura y el viento, que afectan a la prevalencia y morfología de los diferentes hábitats costeros (Harris *et al.*, 2013). La variación anual de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) tiene un efecto directo sobre el clima de la región, influyendo en todos los procesos oceanográficos locales (Giraldo y Ramírez, 2010; Poveda *et al.*, 2011; Hoyos *et al.*, 2013; Villegas *et al.*, 2016) y, por lo tanto, en la biología de los hábitats costeros. En resumen, la naturaleza y heterogeneidad de los hábitats costeros, y las características a lo largo de la costa norte del Pacífico Colombiano son en gran parte resultado de los patrones de interacción de la geología, clima (lluvia, régimen de vientos, temperatura y humedad), y oceanografía (temperatura superficial del mar, corrientes, y clima de olas) subyacentes. La costa estudiada muestra una topografía altamente variable con una compleja diversidad de hábitats costeros, desde playas hasta acantilados. Los mapas muestran una mayor presencia de acantilados rocosos en la costa orientada al oeste, playas de bloques orientadas al este, y la mayoría de las playas arenosas se encuentran orientadas al sur. Además, la región muestra una gran abundancia de islotes y riscos; estas características podrían modificar los patrones de hidrografía costera en la zona, facilitando la concentración de las primeras etapas de los recursos hidrobiológicos de la región.

Al mapear la distribución espacial de los hábitats costeros, se espera facilitar la cuantificación de los patrones biológicamente relevantes de la costa y el fondo marino. Esto ayudará a abordar importantes preguntas ecológicas relacionadas con las interacciones de los animales con el medio ambiente en posteriores estudios, e incrementar la capacidad de la comunidad local para gestionar los ecosistemas costeros de manera efectiva. Una gestión adecuada necesita integrar también los aspectos sociológicos, culturales y económicos

the coast and increasing area of sandy beaches (McLachlan and Brown, 2006; Short, 2010).

Other climatic factors that influence shoreline and subtidal features include temperature and wind, which affect the prevalence and morphology of different coastal habitats (Harris *et al.*, 2013). The annual variation of the intertropical convergence zone (ITCZ) has a direct effect on the climate in the region influencing all local oceanographic processes (Giraldo and Ramírez, 2010; Poveda *et al.*, 2011; Hoyos *et al.*, 2013; Villegas *et al.*, 2016), therefore, the biology of coastal habitats. In summary, the nature and heterogeneity of coastal habitats and features along the north Colombian Pacific coast is largely the result of interacting patterns in the underlying geology, climate (rainfall, wind regime, temperature and humidity) and oceanography (sea surface temperature, currents, and wave climate). The shoreline studied show a highly variable topography that leads to a complex diversity of coastal habitats, from beaches to cliffs. The maps show bigger presence of cliff rocky shore at shoreline oriented to west, boulder beaches oriented to the east and most sandy beaches oriented to the south. In addition, the region exhibits high abundance of islets and crags; these features might modify the nearshore hydrography patterns of the region, promoting the concentration of early stages of the hydrobiological resources of the region.

By mapping the spatial distribution of coastal habitats, we expect to facilitate quantification of biologically relevant patterns on the shoreline and seafloor. This will help to address important ecological questions pertaining to animal-environment interactions at further studies, and facilitate the local community's ability to manage coastal ecosystems effectively. Proper management needs also to integrate sociological, cultural and economic aspects of the region. Therefore, there is need to increase sustainable and eco-friendly economical activities as a way of money income. The present study contributed towards filling a knowledge gap, by offering a map with the spatial distribution of key habitat types.

de la región. Por lo tanto, es necesario aumentar el número de las actividades económicas sostenibles y respetuosas con el ecosistema para obtener ingresos económicos. El presente estudio ha contribuido a llenar un vacío de conocimiento, al elaborar un mapa que representa la distribución espacial de los tipos de hábitats clave en la región.

AGRADECIMIENTOS

A Andrés Cuellar, Diego Córdoba, Gustavo Ramírez, Carlos Muñoz y Melina Rodríguez por su apoyo durante el trabajo de campo. A la comunidad de Piñas por su colaboración durante el desarrollo de este estudio. Esta investigación fue cofinanciada por el programa marino de Conservación Internacional Colombia y la Universidad del Valle. La autora fue becada por el Programa de Maestría Erasmus Mundus en Biodiversidad Marina y Conservación (EMBC).

ACKNOWLEDGEMENTS

To Andres Cuellar, Diego Cordoba, Gustavo Ramírez, Carlos Muñoz and Melina Rodríguez for its support during field sampling. A special thanks to the Piñas local community for their assistance during the study. Conservation International Colombia (Marine Program) and Universidad del Valle provided funding for this project. The first author had a fellowship of Erasmus Mundus Master Programme in Marine Biodiversity and Conservation, EMBC.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Barbier, E.B., S.D. Hacker, C. Kennedy, E.W. Koch, A.C. Stier and B.R. Silliman. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.*, 81(2): 169-193.
- Bartley, J.D., R.W. Buddemeier and D.A. Bennett. 2001. Coastline complexity: a parameter for functional classification of coastal environments. *J. Sea Res.*, 46(2): 87-97.
- Beaman, R.J., T.C. Bridge, C. Lüter, J. Reitner and G. Wörheide. 2016. Spatial patterns in the distribution of benthic assemblages across a large depth gradient in the Coral Sea, Australia. *Mar. Biodiv.*, 46(4): 795-808.
- Becking, L.E., D.F. Cleary, N.J. Voogd, W. Renema, M. Beer, R.W. Soest and B.W. Hoeksema. 2006. Beta diversity of tropical marine benthic assemblages in the Spermonde Archipelago, Indonesia. *Mar. Ecol.*, 27(1): 76-88.
- Brown, C.J., S.J. Smith, P. Lawton and J.T. Anderson. 2011. Benthic habitat mapping: a review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 92(3): 502-520.
- Cantera, J.R., L. Herrera y R. Neira. 2008. Manglares de las localidades de Cambura (Punta Cruces) y Bahía Cupica: 61 – 76. En: Giraldo, A. y B. Valencia (Eds.). *Chocó. Paraíso por naturaleza: Punta Cruces y Cabo Marzo*. Dep. Biol., Univ. Valle. Cali. 94 p.
- Castellanos G. y A. Villa. 2008. Peces de zonas rocosas someras en las localidades de Punta Cruces y Cabo Marzo: 53 - 60. En: Giraldo, A. y B. Valencia (Eds.). *Chocó. Paraíso por naturaleza: Punta Cruces y Cabo Marzo*. Dep. Biol., Univ. Valle. Cali. 94 p.
- Cusson, M. and E. Bourget. 2005. Global patterns of macroinvertebrate production in marine benthic habitats. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 297: 1-14.
- Friess, D.A. and E.L. Webb. 2014. Variability in mangrove change estimates and implications for the assessment of ecosystem service provision. *Global Ecol. Biogeogr.*, 23(7): 715-725.
- Giraldo, A. y D.G. Ramírez. 2010. Fitoplancton costero en cabo Marzo y punta Cruces, margen nororiental del océano Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 28: 172-202.
- Giraldo A., B. Valencia, T.I. Martínez y D.G. Ramírez. 2008. Condiciones oceanográficas en punta Cruces y cabo Marzo: 7 - 22. En: Giraldo, A. y B. Valencia (Eds.). *Chocó. Paraíso por naturaleza: punta Cruces y cabo Marzo*. Dep. Biol., Univ. Valle, Cali. 94 p.
- Harborne, A.R., P.J. Mumby, C.V. Kappel, C.P. Dahlgren, F. Micheli, K.E. Holmes and D.R. Brumbaugh. 2008. Tropical coastal habitats as surrogates of fish community structure, grazing, and fisheries value. *Ecol. Appl.*, 18(7): 1689-1701.
- Hoyos, N., J. Escobar, J.C. Restrepo, A.M. Arango and J.C. Ortiz. 2013. Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Appl. Geogr.*, 39: 16-25.
- Huang, Z., B.P. Brooke and P.T. Harris. 2011. A new approach to mapping marine benthic habitats using physical environmental data. *Cont. Shelf Res.*, 31(2): S4-S16.



- Lee, S.Y., J.H. Primavera, F. Dahdouh-Guebas, K. McKee, J.O. Bosire, S. Cannicci, K. Diele, F. Fromard, N. Koedam, C. Marchand, I. Mendelssohn, N. Mukherjee and S. Record. 2014. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global Ecol. Biogeogr.*, 23(7): 726-743.
- Lund, K. and S.D. Wilbur. 2007. Habitat classification feasibility study for coastal and marine environments in Massachusetts. *Mass. Of. Coast. Zone Manag.*, Boston. 31 p.
- McLachlan, A. and A.C. Brown. 2006. The ecology of sandy shores. Academic Press. San Diego. 372 p.
- Micallef, A., T.P. Le Bas, V.A. Huvenne, P. Blondel, V. Hühnerbach and A. Deidun. 2012. A multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Cont. Shelf Res.*, 39: 14-26.
- Mishra, D., S. Narumalani, D. Rundquist and M. Lawson. 2006. Benthic habitat mapping in tropical marine environments using QuickBird multispectral data. *Photogr. Eng. Rem. Sens.*, 72(9): 1037-1048.
- Moberg, F. and C. Folke. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecol. Econ.*, 29(2): 215-233.
- Mumby, P.J., E.P. Green, A.J. Edwards and C.D. Clark. 1999. The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. *J. Environ. Manag.*, 55(3): 157-166.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Col. Cienc.*, 28(107): 201-222.
- Poveda, G., D.M. Álvarez and O.A. Rueda. 2011. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Clim. Dyn.*, 36: 2233-2249.
- Rangel, O. y H. Arellano. 2004. Clima del Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica de Colombia. 39-82 p. En: Rangel, J.O. (Ed.). *Diversidad Biótica IV. El chocó Biogeográfico/Costa Pacífica*. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Conservación Internacional. Bogotá. 997 p.
- Roberts, C.M., S. Andelman, G. Branch, R.H. Bustamante, J.C. Castilla, J. Dugan, B.S. Halpern, K.D. Lafferty, H. Leslie, J. Lubchenco, D. McArdle, H.P. Possingham, M. Ruckelshaus and R.R. Warner. 2003. Ecological criteria for evaluating candidate sites for marine reserves. *Ecol. Appl.*, 13(1): S199-S214.
- Segura-Quintero, C., D.C. Alonso and L.F. Ramírez. 2012. Gap representativeness analysis in the marine protected areas of the National System of Natural Parks of Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 41(2): 299-322.
- Short, A.D. 2010. Role of geological inheritance in Australian beach morphodynamics. *Coast. Eng.*, 57: 92-97.
- Shumchenia, E.J. and J.W. King. 2010. Comparison of methods for integrating biological and physical data for marine habitat mapping and classification. *Cont. Shelf Res.*, 30(16): 1717-1729.
- Villegas, N., I. Málikov y D. Díaz. 2016. Variabilidad mensual de la velocidad de surgencia y clorofila a en la región del Panamá Bight. *Rev. Mutis*, 6(2): 82-94.
- Wright, D.J. and W.D. Heyman. 2008. Introduction to the special issue: marine and coastal GIS for geomorphology, habitat mapping, and marine reserves. *Mar. Geod.*, 31(4): 223-230.
- Yee, S.H., J.F. Carriger, P. Bradley, W.S. Fisher and B. Dyson. 2015. Developing scientific information to support decisions for sustainable coral reef ecosystem services. *Ecol. Econ.*, 115: 39-50.
- Zapata, F.A., J.L. García y A. Tobón. 2008a. Formaciones coralinas en las localidades de Piñas (Punta Cruces) y El Acuario (Cabo Marzo). 23 - 34. En: Giraldo, A. y B. Valencia (Eds.). *Chocó. Paraíso por naturaleza: Punta Cruces y cabo Marzo*. Dep. Biol., Univ. Valle, Cali. 94 p.
- Zapata F.A., A. Tobón y J.L. García. 2008b. Peces asociados a sistemas rocosos y coralinos en punta Cruces y cabo Marzo: 35 - 52. En: Giraldo, A. y B. Valencia (Eds.). *Chocó. Paraíso por naturaleza: Punta Cruces y cabo Marzo*. Dep. Biol., Univ. Valle, Cali. 94 p.

RECIBIDO / RECEIVED: 23/06/2016

ACEPTADO /ACCEPTED: 13/08/2017