



Mapeo de planos lodosos con imágenes UAV en La Bocana de Iscuandé, costa Pacífica colombiana

Mapping of mudflats with UAV images in La Bocana de Iscuandé, Colombian Pacific coast

Camilo F. Mina-Cartagena¹, José E. Fuentes^{1*} y Richard Johnston-González^{2,3,4}

0000-0003-0257-1715

0000-0003-1233-4924

0000-0002-1365-8261

1. Agesat Research Group, Geography Department, Universidad del Valle, Cali, Colombia. camilo.mina@correounivalle.edu.co, jose.fuentes@correounivalle.edu.co*

2. Cornell Laboratory of Ornithology, Cornell University, New York, USA.

3. Invemar GEO, Marine Geosciences Program, Santa Marta, Colombia.

4. Asociación para el Estudio y Conservación de las Aves Acuáticas en Colombia-Calidris, Cali, Colombia. richard.johnston@cornell.edu

* Autor de correspondencia / Corresponding author.

RESUMEN

La planificación de la conservación de los ambientes marino-costeros requiere de mapas actualizados y detallados, por lo que el objetivo de este trabajo es generar la cartografía detallada de dos planos lodosos en el delta del río Iscuandé (Bocana de Iscuandé) en la costa Pacífica colombiana (departamento de Nariño). Estas son áreas importantes para la fauna, especialmente para las aves playeras migratorias. Para abordar este problema, este estudio investigó el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) como una alternativa para recopilar información cartográfica detallada en áreas de difícil acceso utilizando métodos fotogramétricos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las imágenes de los vehículos aéreos no tripulados se utilizaron para generar mapas con un alto nivel de detalle a escala 1:10.000 que incluyen información detallada sobre entornos como los planos intermareales y los manglares que no habían sido cartografiados anteriormente. Los Vehículos Aéreos no Tripulados son una herramienta práctica para cartografiar lugares en los que las condiciones meteorológicas y de acceso dificultan el uso de imágenes por satélite o de fotografía aérea convencional. En concreto, la cartografía de zonas con alta dinámica temporal y espacial, como los planos lodosos, no es posible con otras plataformas debido a su naturaleza altamente cambiante en cortos periodos de tiempo. El principal resultado muestra que es posible cartografiar los planos intermareales mostrando que se mantienen en un relativo equilibrio entre el flujo y reflujo de las olas y las mareas temporalmente e influenciadas por el clima local. Este tipo de aplicación proporciona datos críticos para las estrategias de conservación y gestión de áreas de gran importancia ecológica.

PALABRAS CLAVES: UAV, sistema de información geográfica, planos lodosos, aves playeras, Pacífico colombiano.

ABSTRACT

Conservation planning for marine-coastal environments requires updated and detailed maps; the aim of this work is to generate detailed maps for two mudflats in the Iscuandé River Delta (Bocana de Iscuandé) in the Colombian Pacific Coast (Department of Nariño). These are important areas for fauna, especially migratory shorebirds. To address this problem, this study investigated the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as an alternative for collecting detailed mapping information in areas of difficult access using photogrammetric methods and a geographic information system (GIS). UAV images were used to generate maps with a high level of detail at a scale of 1:10,000 that include detailed information about environments such as mudflats and mangroves which had not been mapped before. UAVs are a practical tool for mapping places where weather and access conditions hinder the use of satellite images or conventional aerial photography. They are also useful for mapping areas with high temporal and spatial variability, such as mudflats, where other platforms may not reveal their short-term dynamics. Our results show that this technique has a high potential for mapping such environments, and reveal that the Iscuandé mudflats are maintained by a relative equilibrium between the ebb and flow of waves and tides, and are also influenced by the local climate. This type of application provides critical data for conservation and management strategies of areas with great ecological importance.

KEYWORDS: UAV, geographic information system, tidal mudflats, shorebirds, Colombian Pacific.

DOI: <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2022.51.2.1161>

Publicado por Invemar

Este es un manuscrito de acceso abierto bajo la licencia CC Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual

Published by Invemar
This is an open Access article under the CC BY-NC-SA

INTRODUCCIÓN

El término *vehículo aéreo no tripulado* (UAV por sus siglas en inglés) se volvió común en la década de 1990 para describir aeronaves autónomas (Hoffmann *et al.*, 2004; Rao *et al.*, 2016). En los últimos años han aumentado las aplicaciones geográficas de los UAV, que adquieren datos principalmente por medio de cámaras (Zhang, 2008). La fotografía aérea permite extraer múltiples elementos de información. Por ejemplo, con una imagen capturada se pueden identificar objetos en la superficie al combinar sus propiedades de textura, forma y tonalidad. La fotografía aérea con UAV permite identificar coberturas terrestres que no se distinguen con facilidad en imágenes satelitales debido a su resolución espacial. Las aplicaciones del mapeo UAV incluyen el modelado topográfico, el inventario de flora y fauna y las estimaciones de la cobertura terrestre. (Greenwood, 2016; Fuentes *et al.*, 2018; Fuentes, 2020).

Los UAV se han utilizado para capturar imágenes de ambientes costeros (Green *et al.*, 2019) y, junto con los sistemas de información geográfica (SIG) y la fotogrametría, para clasificar y mapear la cobertura terrestre (tipos de sedimento, vegetación y cuerpos de agua), así como para estudiar sus cambios en el tiempo (Gonçalves y Henriques, 2015). También se han utilizado métodos que se basan en UAV para mapear los cambios en el litoral (Nikolakopoulos *et al.*, 2019), para evaluar la relación entre la excavación de macrofauna y la geomorfología de las marismas (Brunier *et al.*, 2020), para monitorear la biomasa en salinas costeras (Doughty y Cavanaugh, 2019), para clasificar la cobertura de terreno costero (Meng *et al.*, 2017) y para estimar la biomasa sobre la superficie de los manglares (Navarro *et al.*, 2020). Con los UAV ha sido posible realizar estudios en áreas extensas y en períodos cortos a un bajo costo (Koh y Wich, 2012). Los UAV pueden capturar imágenes de alta resolución espacial y temporal a través de vuelos más frecuentes a baja altura (Mandujano y Rísquez, 2017). En el caso de los ambientes marino-costeros de Colombia, existen en la actualidad mapas nacionales oficiales a escalas de 1:100,000 (Ideam *et al.*, 2017) con una cantidad limitada de detalles para aplicaciones a escalas más pequeñas. En Colombia se han utilizado recientemente estos métodos para mapear afloramientos rocosos y bosques de manglar (Castellanos *et al.*, 2019) y arrecifes de coral (Sierra *et al.*, 2020). Además, se han utilizado UAV para actualizar los mapas topográficos nacionales del Instituto Geográfico Nacional (Igc) en lugares donde los métodos tradicionales se encuentran limitados por condiciones climáticas y geográficas (Vergara y Arenas, 2017).

INTRODUCTION

The term unmanned aerial vehicle (UAV) became common in the 1990s for describing autonomous robotic aircraft (Hoffmann *et al.*, 2004; Rao *et al.*, 2016). In recent years, UAV geographic applications have increased, acquiring data mainly with cameras (Zhang, 2008). Aerial photography allows the extraction of multiple pieces of information. For example, with a captured image, surface objects can be identified using a combination of texture, shape and tonality properties. Aerial photography with UAVs allows the identification of land cover that is not easily distinguishable in satellite imagery because of its spatial resolution. UAV mapping applications include topographic modeling, the inventory of fauna and forest, and land cover estimates (Greenwood, 2016; Fuentes *et al.*, 2018; Fuentes, 2020).

UAVs have been used to capture images of coastal environments (Green *et al.*, 2019) and, together with geographic information systems (GISs) and photogrammetry, also to classify and map land cover (types of sediment, vegetation and water bodies) and study their temporal changes (Gonçalves and Henriques, 2015). UAV-based methods have also been used to map coastline changes (Nikolakopoulos *et al.*, 2019), evaluate the relationship between the activity of macrofauna excavation and the geomorphology of marshes (Brunier *et al.*, 2020), monitor biomass in coastal saline flats (Doughty and Cavanaugh, 2019), classify coastal land cover (Meng *et al.*, 2017), and to estimate mangrove above-ground biomass (Navarro *et al.*, 2020). With UAVs, it has been possible to conduct studies of large areas in short periods of time and at low cost (Koh and Wich, 2012). UAVs can capture images with high spatial and temporal resolution through more frequent low-altitude flights (Mandujano and Rísquez, 2017). In the case of the marine-coastal environments of Colombia, there are currently national official maps at scales of 1:100,000 (Ideam *et al.*, 2017) with a limited amount of detail for applications at smaller scales. In Colombia, these methods have recently been used to map rocky outcrops and mangrove forests (Castellanos *et al.*, 2019), and coral reefs (Sierra-Escrigas *et al.*, 2020). In addition, UAVs have been used to update the national topographic maps from the National Geographic Institute (Igc) in places where traditional methods are limited by climatic and geographic conditions (Vergara and Arenas, 2017).

Los ambientes marinos y costeros constituyen casi la mitad del territorio nacional (Andrade, 2011) y contienen múltiples ecosistemas y especies de flora y fauna. Muchos de estos ambientes brindan servicios ecosistémicos asociados a especies y espacios bajo gestión de conservación (manglares, playas, acantilados, fondos marinos blandos, corales, praderas marinas), así como servicios de suministro y sustento a muchas comunidades locales, particularmente en la costa del Pacífico. La costa del océano Pacífico colombiano es una de las regiones con las precipitaciones anuales más altas del mundo (Rangel, 2004), superada únicamente por Mawsynram y Cherrapunji en la India, pues la región Pacífica experimenta una nubosidad constante debido al desplazamiento de masas de aire del océano Pacífico y la ubicación geográfica de la serranía del Baudó y la cordillera Occidental de los Andes (Gutiérrez *et al.*, 2019), lo que limita el acceso a imágenes satelitales con poca nubosidad.

Los planos lodosos son áreas costeras casi planas en zonas intermareales que se consideran como transiciones y conexiones entre el mar y la tierra. Consisten en sedimentos no consolidados, en general arenas y limos, con sales precipitadas producto de la deposición de limos estuarinos, arcillas y detritus de animales marinos (Eisma, 1998; Tan *et al.*, 2020). Los planos lodosos se caracterizan por ser humedales que se sumergen periódicamente en agua marina (Bayliss *et al.*, 1979). Por sus aspectos geológicos y geomorfológicos, los planos lodosos pueden observarse como capas expuestas de lodo. Desde una perspectiva ambiental y ecológica, las marismas albergan un gran número de nichos ecológicos y proveen hábitats valiosos a muchas especies, incluyendo microorganismos, crustáceos, gusanos, peces y aves (Phang y Friess, 2015). Los planos lodosos o planicies intermareales son ambientes comunes a lo largo de los litorales del Pacífico, si bien son rara vez estudiados en Colombia. Los planos lodosos pueden encontrarse en las desembocaduras de los ríos y en áreas estuarinas formadas por sedimentos arenosos, arcillosos y limosos suministrados por la erosión y la acreción costera. El transporte fluvial dispone estos sedimentos en masas de lodo expuestas o sumergidas de acuerdo con el nivel de la marea y la influencia del oleaje (Gao, 2019). Los planos lodosos incluyen áreas sin vegetación como playas salinas, estuarios y bajíos arenosos; áreas con vegetación herbácea; áreas inundadas de agua salada; y áreas de aguas dulces y salobres inundadas por la marea (Igac *et al.*, 2007).

Los planos lodosos representan áreas de alta biodiversidad que incluyen diferentes especies de macroinvertebrados bentónicos (Xue *et al.*, 2019) y aves migratorias que las usan como paradas de alimentación y descanso (Burger *et al.*, 1997). Particularmente en Colombia,

Marine and coastal environments constitute approximately half of the national territory (Andrade, 2011), comprising multiple ecosystems and species of flora and fauna. Many of these environments provide ecosystem services associated with species and spaces under conservation management (mangroves, beaches, cliffs, soft seabeds, corals, seagrasses) and provisioning and support services of many local communities, particularly on the Pacific coast. The coast of the Colombian Pacific Ocean is one of the regions with the highest annual precipitation in the world (Rangel, 2004), surpassed only by Mawsynram and Cherrapunji in India, because the Pacific region experiences consistent cloud cover due to the displacement of masses of air from the Pacific Ocean and the geographical location of the Serranía del Baudó and the Eastern Cordillera of the Andes (Gutiérrez *et al.*, 2019), which limits access to low-cloud cover satellite images.

Mudflats are nearly flat coastal areas in intertidal zones that are considered transitions and links between the sea and land. They consist of unconsolidated sediments, commonly sands and silts, with precipitated salts resulting from the deposition of estuarine silts, clays and marine animal detritus (Eisma, 1998; Tan *et al.*, 2020). Mudflats are characterized as wetlands and periodically submerged by seawater (Bayliss *et al.*, 1979). From the geological and geomorphological aspects, mudflats can be seen as exposed layers of mud from an environmental and ecological perspective, marshes host a large number of ecological niches and provide valuable habitats for many species, including microorganisms, crustaceans, worms, fish and birds (Phang and Friess, 2015). Mudflats or intertidal flats are a common environment along the Pacific coastlines, although rarely studied in Colombia. Mudflats are found at the mouths of rivers and in estuarine areas formed by sandy, clayey and silty sediments contributed by erosion and coastal accretion. River transport arranges these sediments into exposed or submerged mud masses according to tidal level and the influence of wave action (Gao, 2019). Mudflats include areas without vegetation, such as saline beaches, estuaries and sandy lowlands, areas with herbaceous vegetation, areas flooded with salt water and areas of fresh and brackish water flooded by the tide (Igac *et al.*, 2007).

Mudflats represent areas with high biodiversity, including different species of benthic macroinvertebrates (Xue *et al.*, 2019) and migratory birds that use them for food and resting stopovers (Burger *et al.*, 1997). Particularly in Colombia, mudflats are the destination for the greatest

los planos lodosos son el destino del mayor número de especies de aves playeras y migratorias, así como del mayor número de individuos (Johnston-González *et al.*, 2010). Uno de los planos lodosos más importantes para las aves playeras es la Reserva de Aves Playeras de la Bocana del Río Iscuandé, a lo largo de la costa pacífica del departamento de Nariño (Cantera *et al.*, 2009). El objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial de las técnicas UAV para el mapeo de alta resolución espacial de los planos lodosos costeros en la Bocana del Río Iscuandé del departamento de Nariño, Colombia, en diferentes condiciones climáticas.

ÁREA DE ESTUDIO

El delta del río Iscuandé está ubicado en el municipio de Santa Bárbara de Iscuandé (2° 28' N, 77° 59' W), a lo largo de la costa pacífica del departamento de Nariño. Esta área está incluida en el Complejo Marino-Costero Iscuandé-Sanquianga-Gorgona, que hace parte de la Unidad de Manejo Integrado Guapi-Iscuandé del Parque Nacional Natural Sanquianga (Figura 1). Este delta está dentro de la unidad geomorfológica de pantanos de manglar y se inunda dos veces en el día con cada marea alta. Su sustrato es fangoso y rico en materia orgánica, por lo que alberga bosques de manglar y otros organismos asociados a este ecosistema, con un rango mareal promedio de 3,7 m (Invemar *et al.*, 2003). Su relieve está determinado por la terraza aluvial del océano Pacífico y

number of shorebird and migratory species, as well as the largest number of individuals (Johnston-González *et al.*, 2010). One of the most important mudflats for shorebirds is the shorebird reserve Bocana del Río Iscuandé, along the Pacific Coast of Department of Nariño (Cantera *et al.*, 2009). The objective of this research was to test the potential of UAVs techniques for high spatial resolution mapping of coastal mudflats in the Bocana del Río Iscuandé, Nariño department, Colombia, under different weather conditions.

STUDY SITE

The Iscuandé River Delta is located in the municipality of Santa Bárbara de Iscuandé (2° 28' N, 77° 59' W) along the Pacific Coast of the Department of Nariño. This area is included in the Iscuandé-Sanquianga-Gorgona Coastal Marine Complex, which forms part of the Guapi-Iscuandé Integrated Management Unit, in the Sanquianga National Natural Park (Figure 1). This delta lies within the geomorphological unit of mangrove swamps, flooding twice daily at each high tide; its substrate is muddy and rich in organic matter, so it hosts mangrove forests and other organisms associated with this ecosystem, presenting an average tidal range of 3.7 m (Invemar *et al.*, 2003). Its relief is determined by the alluvial shelf of the Pacific Ocean and is characterized by lowlands and floodplains adjacent to the sea, traversed by estuaries. Located in the

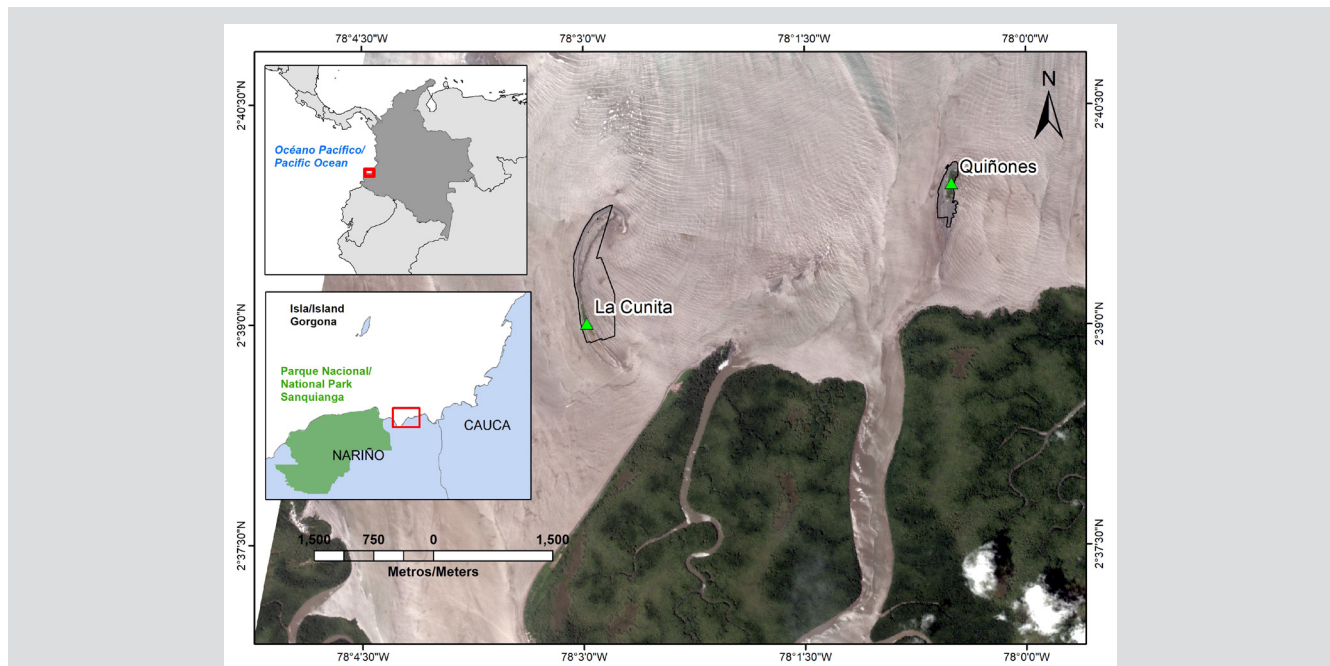


Figura 1. Ubicación de los planos lodosos La Cunita y Quiñones del Pacífico colombiano en una imagen satelital PlanetScope de agosto de 2019.

Figure 1. Location of the La Cunita and Quiñones mudflats in the Colombian Pacific in a PlanetScope satellite image from August 2019.

se caracteriza por tierras bajas y llanuras aluviales adyacentes al mar, atravesadas por estuarios. Ubicada en la región biogeográfica del Chocó Neotropical, la Bocana de Iscuandé recibe un promedio de lluvias de 3 318 a 5 909 mm año⁻¹ (Rangel, 2004). Entre sus paisajes y ecosistemas hay bosques de manglar, bosques de llanura aluvial, playas, islas de barrera y marismas, con diversas comunidades de peces, moluscos, crustáceos, bivalvos y aves playeras (Calidris *et al.*, 2017). Hay dos planos lodosos a las orillas del litoral de Iscuandé que se conocen localmente como bajo La Cunita (2°39'15" N, 78°03'00" W) y bajo Quiñones (2°39'57" N, 78°00'28" W) (Figura 1). Estos planos lodosos se reconocen como sitios de importancia biológica a nivel nacional y se declararon sitios de importancia regional dentro de la Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras (WHSRN, por sus iniciales en inglés) en 2009 debido a sus poblaciones significativas de aves migratorias (Calidris, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los meses de agosto y noviembre de 2019, se visitaron los planos lodosos de La Cunita y Quiñones de 9 a 10 am con la marea baja para obtener imágenes de los planos expuestos en condiciones óptimas de luz solar. Se capturaron las imágenes con dos UAV convencionales. Para el primer vuelo en Quiñones se utilizó el UAV DJI Phantom 3 con un sensor RGB CMOS de 1/2.3" (12 MP efectivos), con una resolución máxima de 4 000 x 3 000 píxeles. Para el segundo vuelo en Quiñones y los dos vuelos en La Cunita se utilizó un vehículo DJI Mavic Air equipado con RGB CMOS de 1/2.3" (12 MP efectivos), con una resolución máxima de 4056 x 3040 píxeles. Las imágenes se georreferenciaron mediante un sistema global de navegación por satélite (GNSS) que incluye vehículos tanto en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, EEUU) y el Sistema Global de Navegación por Satélite GLONASS (Rusia), con precisiones horizontales y verticales de aproximadamente $\pm 1,5$ m y $\pm 0,5$ m respectivamente.

Se prepararon los vuelos mediante la plataforma en línea DroneDeploy, donde el área a fotografiar se escogió usando Google Maps y se definieron variables de vuelo como la altitud y el traslape, *i.e.*, el porcentaje de área común entre fotografías. El valor de la altitud guarda una relación inversa con el número de fotos tomadas durante el vuelo, *i.e.*, a mayor altura, menos fotos tomadas, y viceversa. Se requiere una gran superposición entre imágenes para obtener resultados de alta precisión. Por lo tanto, el plan de adquisición de imágenes se diseñó con cuidado para que tuviera el traslape suficiente en función del tiempo de vuelo. Teniendo en cuenta variables

neotropical Chocó Biogeographic region, the Bocana de Iscuandé receives an average annual rainfall of 3,318 to 5,909 mm yr⁻¹ (Rangel, 2004). Among its landscapes and ecosystems are mangrove forests, floodplain forests, beaches, barrier islands and mudflats, with diverse communities of fish, mollusks, crustaceans, bivalves and shorebirds (Calidris *et al.*, 2017). There are two mudflats along the shores of the Iscuandé coastline known locally as Bajo La Cunita (2°39'15" N, 78°03'00" W) and Bajo Quiñones (2°39'57" N, 78°00'28" W) (Figure 1). These mudflats are recognized as sites of biological importance at the national level and have been declared as a Regional important site within the Western Hemisphere Shorebird Reserve Network (WHSRN) in 2009 due to their significant populations of migratory birds (Calidris, 2017).

MATERIALS AND METHODS

During the months of August and November of 2019, the mudflats of La Cunita and Quiñones were visited between 9 and 10 am at low tide to obtain images of exposed mudflats and with optimal solar light conditions. The images were captured with two conventional UAVs. For the first flight in Quiñones, the DJI Phantom 3 UAV was used, with a 1/2.3" CMOS RGB sensor (12 effective MP) with a maximum resolution of 4,000 x 3,000 pixels. For the second flight in Quiñones and the two flights in La Cunita, a DJI Mavic Air vehicle was used, equipped with a 1/2.3" CMOS RGB sensor (12 MP effective) with a maximum resolution of 4056 x 3040 pixels. The images were georeferenced using a global navigation satellite system (GNSS) that includes vehicles in both the Global Positioning System (GPS, USA) and Global Navigation Satellite System (GLONASS, Russia), with horizontal and vertical accuracies of approximately ± 1.5 m and ± 0.5 m, respectively.

The flights were prepared with the online platform DroneDeploy, in which the area to be photographed was chosen using Google Maps and flight variables such as flight height and overlap were defined, that is, the percentage of the common area between photographs. The value of the height has an inverse relationship with the number of photos taken during the flight; that is, the greater the height, the fewer photos were taken, and vice versa. A large overlap between images is required to obtain high-precision results. Therefore, the image acquisition plan was carefully designed to have sufficient overlap as a function of the flight time. Taking into account atmospheric variables such as wind speed and cloudiness, a height of 90 m was established for the

atmosféricas como la velocidad del viento y la nubosidad, se estableció una altitud de 90 m para los vuelos de La Cunita y de 150 m para Quiñones, con un porcentaje de traslape del 65 % para ambos vuelos. Se estableció una distancia de muestreo del suelo (GSD) de menos de 15 cm por tamaño del píxel, teniendo en cuenta que el tipo de terreno a mapear era una zona intermareal principalmente plana. Se ejecutaron las mismas misiones de vuelo en cada área porque DroneDeploy guarda las misiones previas para uso futuro.

Posteriormente se procesaron las imágenes en el software fotogramétrico específico para vuelos UAV Pix4Dmapper, versión 4.2.27. El software encuentra de manera automática miles de puntos comunes entre imágenes. Cada punto característico que se encuentre en una imagen se denomina punto clave [*keypoint*]. Cuando los puntos claves coinciden en dos o más imágenes, se consideran coincidentes y se utilizan para generar un punto tridimensional. Entre más puntos clave haya, con mayor precisión se podrán calcular a partir de un grupo de fotografías tomadas desde un UAV. A partir de estas fotos se crea una nube de puntos en función del porcentaje de superposición, lo cual facilita el cálculo de la paralaje y la posterior reconstrucción tridimensional de las formas presentes en las imágenes, generando una ortofotografía del área de sobrevuelo. Previo a este paso se añaden los puntos de control del suelo (GCP) de los datos tomados del GNSS para mejorar el posicionamiento de las imágenes. Como resultado se generaron cuatro ortofotos, y se escogió el sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM 17 Norte) para el área de estudio. Las ortofotos resultantes de las imágenes del vehículo DJI Phantom 3 se escalaron a 14,93 cm/píxel, mientras que las del dron DJI Mavic Air se escalaron a valores entre 4,32 y 5,39 cm/píxel (Tabla 1). En total se tomaron más de 1510 fotografías durante los cuatro vuelos sobre los dos planos lodosos.

Tabla 1. Escalas de píxeles de las ortofotos resultantes.

Mes / Month	Ortofoto / Orthophoto	Escala de píxeles (cm/píxel) / Pixel scale (cm/pixel)
Agosto / August	Cunita	4.32
	Quiñones	14.93
Noviembre / November	Cunita	4.73
	Quiñones	5.39

Las ortofotos se cargaron en ESRI® ArcGIS, versión 10.5, y se utilizaron para crear una capa de cobertura de terreno con las siguientes clases: banco de arena, manglar, pasto, estanque, matorral (*majagua*) y planos lodosos mareales. Las

La Cunita flights and 150 m for Quiñones, with an overlap percentage of 65 % for both flights. A ground sampling distance (GSD) was set for all flights to be less than 15 cm pixel size, considering that the type of terrain to be mapped was a mainly flat intertidal zone. The same flight missions were executed in each area because DroneDeploy saves previous missions for use in the future.

Subsequently, images were processed in the UAV flight-specific photogrammetric software Pix4Dmapper version 4.2.27. The software automatically finds thousands of common points between images. Each characteristic point found in an image is called a keypoint. When keypoints coincide in two or more images, they are considered coincident and are used to generate a three-dimensional point. The more keypoints there are, the more accurately they can be calculated from a group of photographs taken from a UAV. From these photos, a point cloud is created as a function of the overlap percentage, which facilitates calculation of the parallax and subsequent three-dimensional reconstruction of the shapes present in the images, thus generating an orthophotograph of the overflight area. Prior to this step, the ground control points (GCP) of the data taken with the GNSS are added to improve the positioning of the images. As a result, four orthophotos were generated and the Universal Transverse Mercator output coordinate system (UTM 17 North) was chosen for the study area. The orthophotos resulting from the images from the DJI Phantom 3 vehicle were scaled to 14.93 cm/pixel, while the DJI Mavic Air drone images were scaled to values ranging between 4.32 and 5.39 cm/pixel (Table 1). In total, more than 1510 photographs were taken in the four flights over the two mudflats.

Table 1. Pixel scales of the resulting orthophotos.

Orthophotos were uploaded to ESRI® ArcGIS version 10.5 and used to create a land cover layer with the following classes: sand spit, mangrove, grass, pond, shrubland (*majagua*) and tidal mudflats. The final mapping scale was of

escalas finales de mapeo fueron 1:5000 para Bajo La Cunita y de 1:2500 para Bajo Quiñones. La diferencia entre las escalas se relaciona con el uso de dos vehículos con sensores de resoluciones máximas diferentes. La Figura 2 resume los métodos mencionados.

Después de elaborar las ortofotos (Figura 3) se generaron los polígonos finales de fotointerpretación para realizar la cartografía temática de las dos zonas.

1:5000 for Bajo La Cunita and 1:2500 for Bajo Quiñones. The difference in scale was related to the use of two vehicles with different maximum resolution sensors. Figure 2 summarizes the above methods.

After the orthophotos were produced (Figure 3), the final photointerpretation polygons were generated to construct the thematic cartography of the two zones.

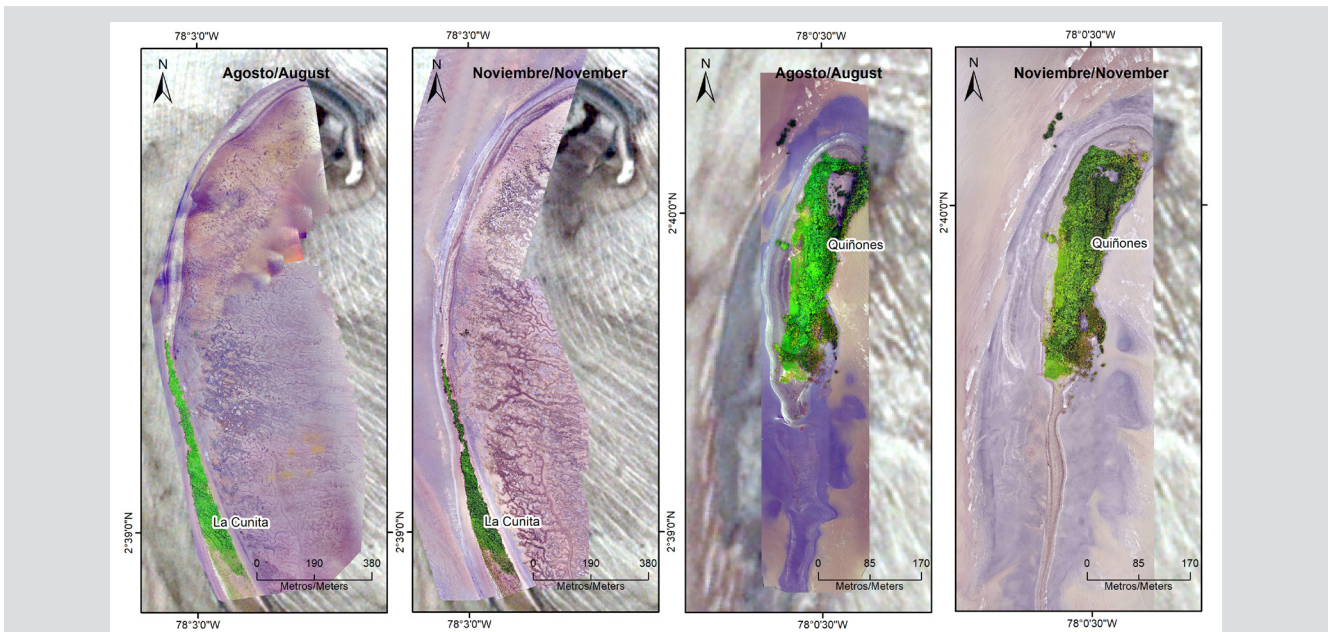
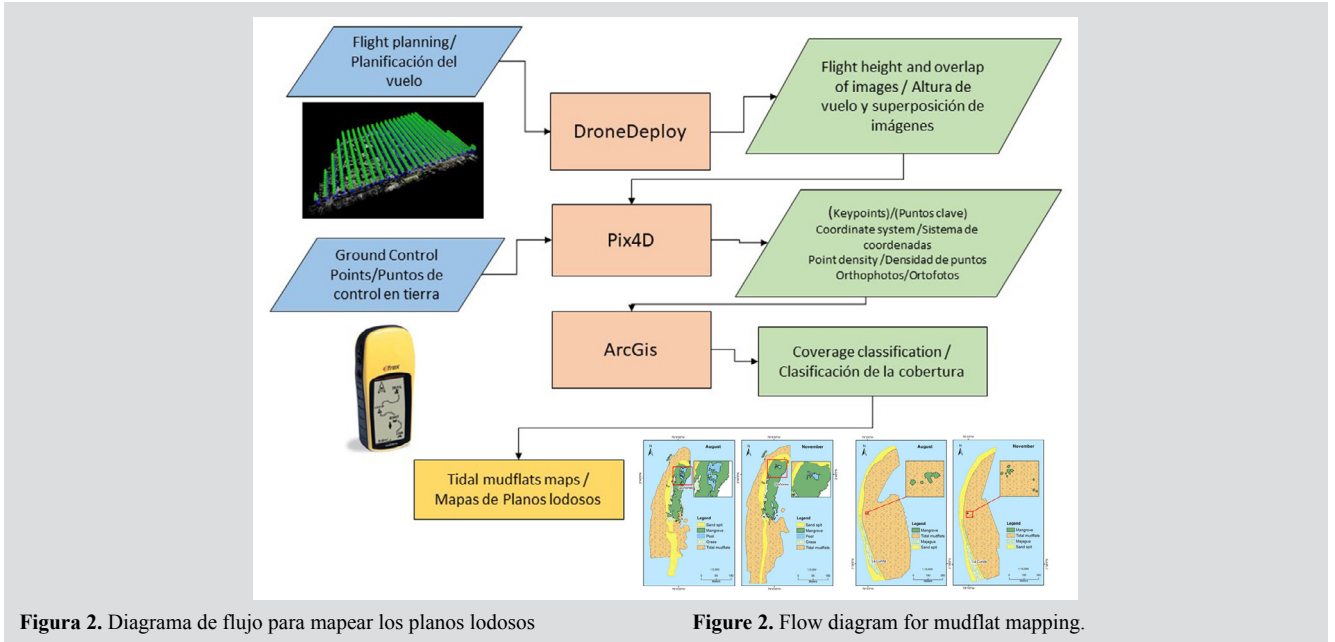


Figura 3. Ortofotos de los planos lodosos de La Cunita y Quiñones entre agosto y noviembre de 2019. El fondo es una imagen de PlanetScope de agosto de 2019.

Figure 3. Orthophotos of the La Cunita and Quiñones mudflats from August to November 2019. The background is a PlanetScope image from August 2019.

RESULTADOS

La llanura mareal de La Cunita, la más grande en el territorio, tiene una extensa área de sedimentos fangosos en su borde oriental, donde se forma una red de canales superficiales que drena en dirección occidente-oriente en función de la pendiente (Figura 4). Un banco de arena rodea la masa de sedimentos fangosos al oeste porque esta área no se inunda durante la marea alta y protege el plano lodoso del oleaje. Hay una franja de majagua (*Talipariti tiliaceum*) sobre el banco de arena y algunos individuos de mangle rojo (*Rhizophora mangle*) sobre el plano lodoso (Figura 5).

RESULTS

The Cunita tidal flat, the largest in the territory, has an extensive area of muddy sediments at its eastern margin in which a network of surface channels is formed that drains in the west-east direction as a function of the slope (Figure 4). A sandbar borders the mass of muddy sediments on the west because this area is not flooded during high tide and protects the mudflat from wave action. There is a strip of majagua (*Talipariti tiliaceum*) over the sandbar, and some individuals of red mangrove (*Rhizophora mangle*) over the mudflat (Figure 5).

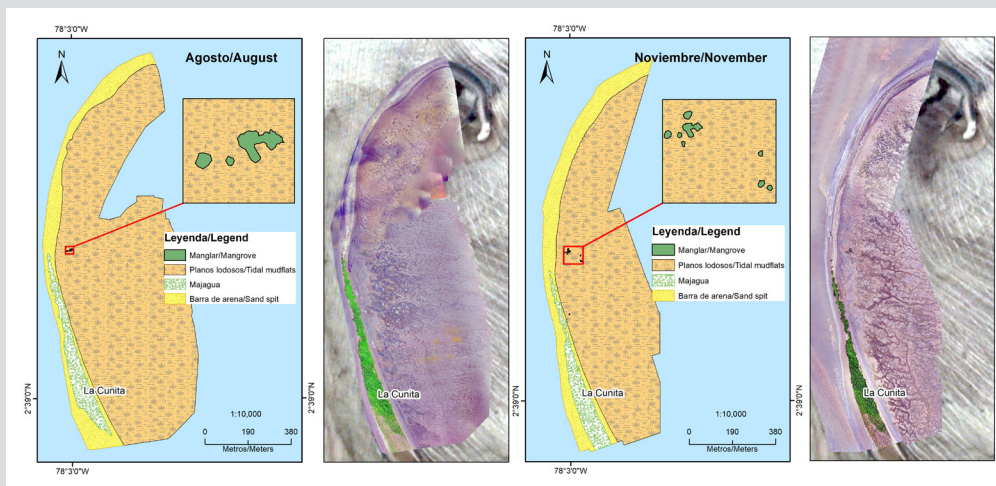


Figura 4. Mapa del Bajo La Cunita en agosto (los dos paneles de la izquierda) y noviembre (los dos paneles de la derecha) de 2019. El fondo es una imagen de PlanetScope de agosto de 2019.

Figure 4. Map of Bajo La Cunita for August (2 left panels) and November (2 right panels) of 2019. The background image is a PlanetScope image from August 2019.

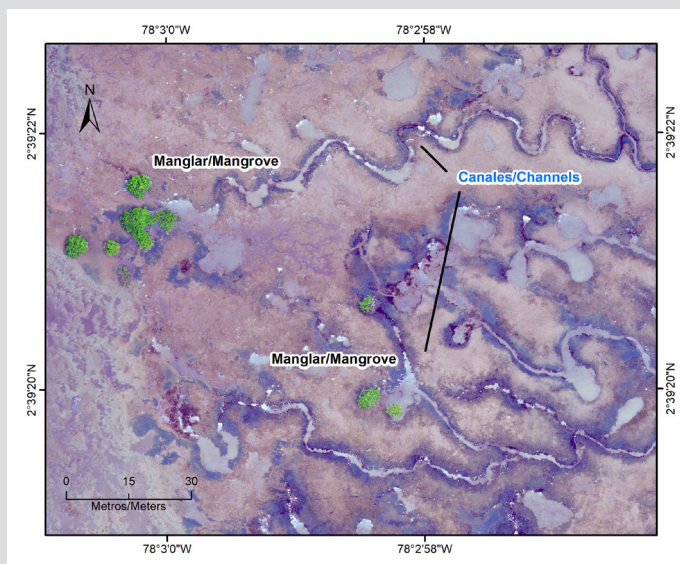


Figura 5. Sistema de canales en la zona fangosa e individuos de mangle rojo en Bajo La Cunita. El color púrpura muestra una acumulación de materia orgánica en descomposición y sedimentos.

Figure 5. Channel system in the muddy zone and red mangrove individuals in Bajo La Cunita. The purple color shows an accumulation of decomposing organic matter and sediments.

Hubo varios cambios en la extensión de las coberturas costeras entre agosto y noviembre, incluyendo la acreción del banco de arena en el extremo norte, la reducción del tamaño de la franja de arbustos de majagua y el incremento en el número de mangles rojos (Tabla 2). Aunque parece que el área de sedimentos fangosos expuestos se redujo, es más probable que este efecto se deba al muestreo. Las diferencias en la altura de la marea y la dificultad para componer mosaicos de imagen en áreas cercanas al agua hacen que sea difícil obtener un traslape perfecto, así como dilucidar cambios en el área de los planos lodosos.

There were several changes in the extension of coastal covers from August to November, including the accretion of the sand bar at the northern end, the decrease in size of the majagua shrubland strip, and the increase in the number of red mangroves (Table 2). Although the area of exposed muddy sediments apparently decreased, this effect is more likely due to sampling. Differences in tidal height and the difficulty of compositing image mosaics in areas close to the water make it difficult to obtain a perfect overlap, as well as to determine changes in the area of mudflats.

Tabla 2. Cambios en la extensión de la cobertura de terreno (ha) en La Cunita.

Table 2. Changes in land cover extent (ha) at La Cunita.

Cobertura de terreno / Land cover	Extensión / Extent (ha)	
	Agosto / August	Noviembre / November
Planos lodosos mareales / Tidal mudflats	64.95	44.73*
Banco de arena / Sand spit	9.69	11.63
Majagua	4.78	3.51
Manglar / Mangrove	0.01	0.02
Total	79.43	59.89

* Disminución aparente. Ver explicación en el texto.

* Apparent decrease, see text for explanation

Como el plano lodoso más grande del área estuarina, La Cunita alberga el mayor número de aves playeras por número de especies e individuos, tales como especímenes de la familia Scolopacidae, junto con especies de la familia Charadriidae. Las aves buscan comida en el sustrato fangoso y descansan y anidan para reproducirse en los bancos de arena con vegetación.

As the largest mudflat of the estuarine area, La Cunita houses the largest number of shorebirds by number of species and individuals, such as specimens of the family Scolopacidae along with species of the family Charadriidae. Birds seek food in the muddy substrate and rest and nest in the vegetated sand bars to reproduce.

Bajo Quiñones tiene una superficie total y un área fangosa menores que La Cunita (Figura 6). La vegetación está dominada por un grupo de mangles rojos más altos y maduros que los de La Cunita. Hay pastos halófilos junto a los manglares

Bajo Quiñones has a smaller total surface area and muddy area than La Cunita (Figure 6). The vegetation is dominated by a group of red mangroves (*Rhizophora mangle*) taller and more mature than those at La Cunita. Halophilous grasses are found next to the mangroves to the west and at the

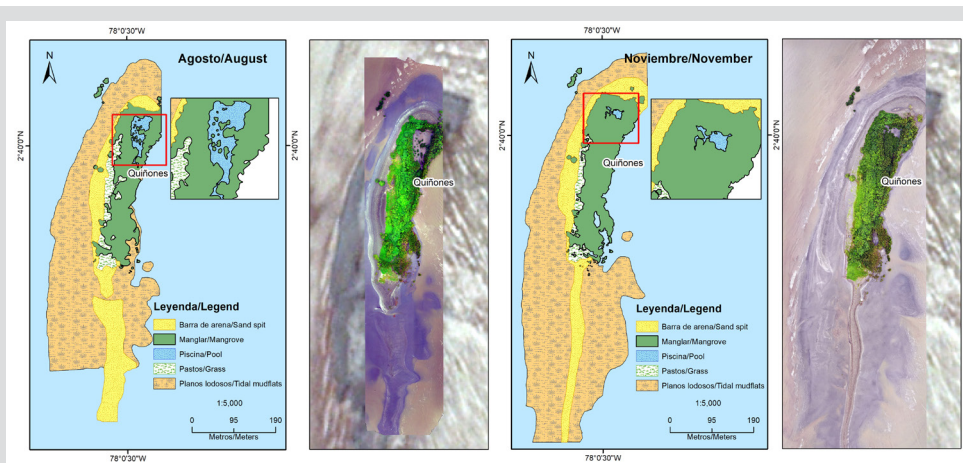


Figure 6. Map of Bajo Quiñones from August (2 left panels) and November (2 right panels) of 2019. The background image is a PlanetScope image from August 2019.

Figure 6. Map of Bajo Quiñones from August (2 left panels) and November (2 right panels) of 2019. The background image is a PlanetScope image from August 2019.

al occidente y en el centro de esta área. Hacia el norte hay un pequeño estanque de agua marina rodeado por manglares y habitado por crustáceos como el cangrejo azul. Un banco de arena atraviesa el plano lodoso de norte a sur, en pendiente hacia el este, similar al de La Cunita, pero de menor longitud.

De agosto a noviembre, la extensión de los planos lodosos intermareales expuestos aumenta (hay que tener en cuenta que los bordes de los mosaicos no coinciden en su totalidad porque la altura de la marea modifica la imagen resultante). Adicionalmente, el ancho del banco de arena disminuye, particularmente en su extremo sur (Tabla 3).

Tabla 3. Cambios en la cobertura del terreno (ha) en Bajo Quiñones.

Cobertura de terreno / Land cover	Extensión / Extent (ha)	
	Agosto / August	Noviembre / November
Planos lodosos intermareales / Tidal mudflats	9.54	10.21
Banco de arena / Sand spit	2.46	2.23
Manglar / Mangrove	2.31	2.86
Pasto / Grass	0.55	0.43
Estanque / Pool	0.22	0.04
Total	15.08	15.77

center of this area. To the north, there is a small seawater pond inhabited by crustaceans such as the blue crab (*Cardissoma crasum*) surrounded by mangroves. A sandbar traverses the mudflat from north to south, sloping eastward, similar to that one at La Cunita, but with a shorter length.

From August to November, the extent of exposed intertidal mudflats increases (note that the mosaic borders do not match entirely because the tidal height modifies the resulting image). Additionally, the width of the sand bar decreases, particularly at its southern tip (Table 3).

Table 3. Changes in land cover (ha) at Bajo Quiñones.

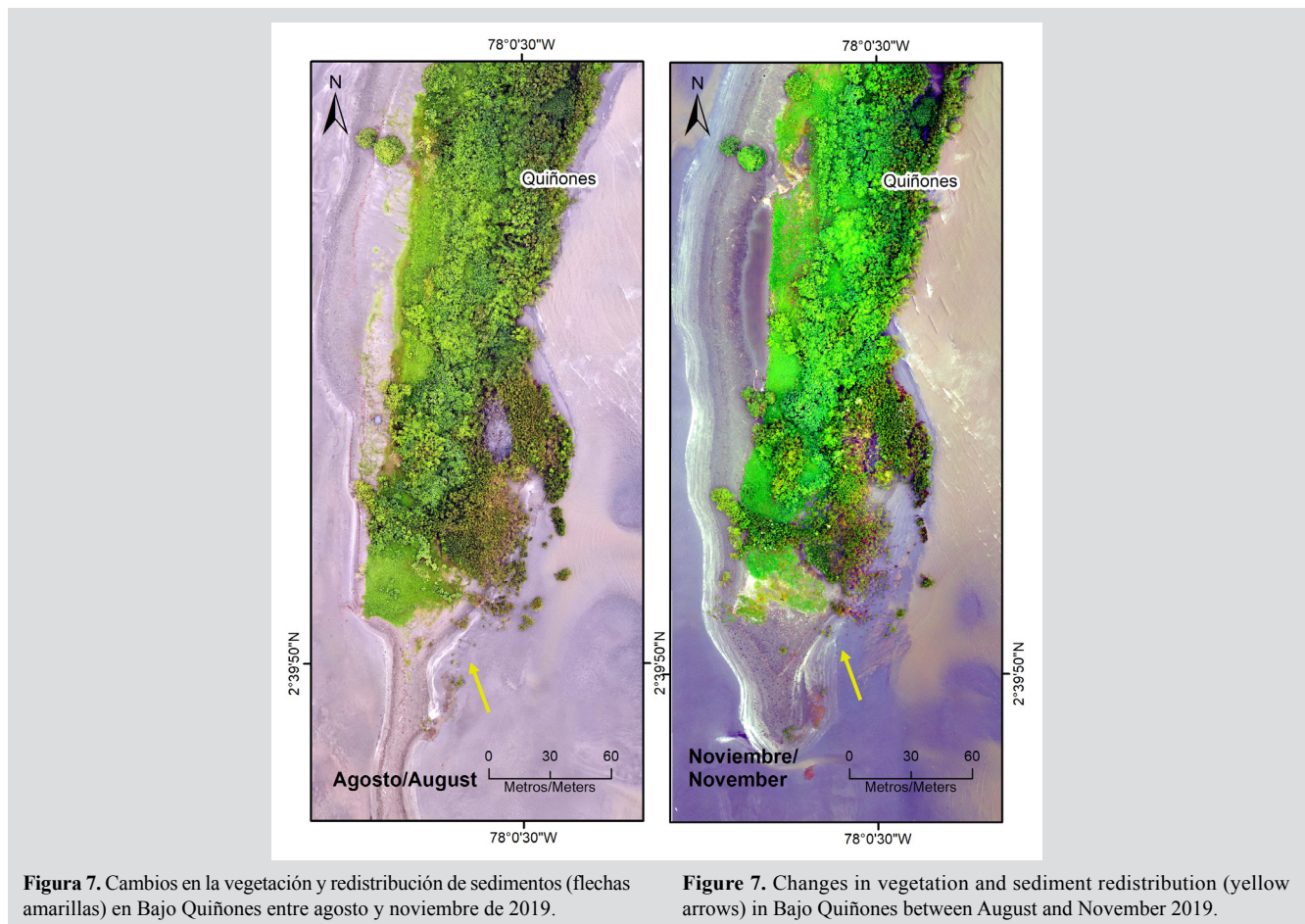


Figura 7. Cambios en la vegetación y redistribución de sedimentos (flechas amarillas) en Bajo Quiñones entre agosto y noviembre de 2019.

Figure 7. Changes in vegetation and sediment redistribution (yellow arrows) in Bajo Quiñones between August and November 2019.

Durante este periodo, el área de manglar aumenta a expensas del pasto y el agua (estanque). Además, hay una redistribución de sedimentos a lo largo de la playa (Figura 7).

Este plano lodoso alberga un menor número de individuos de aves debido al limitado espacio disponible. Sin embargo, hay presencia de aves más grandes como el pelicano pardo (*Pelecanus occidentalis*), que utiliza los grandes árboles de los manglares para descansar.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El uso de UAV para mapear planos lodosos permitió una inspección detallada de los ambientes que no habían sido mapeados debido a las limitaciones de acceso y a las condiciones de nubosidad. Es preciso anotar que el tamaño relativamente pequeño del área de estudio (< 79 ha) permite el uso de esta técnica, lo cual no sería viable en inspecciones nacionales a mayor escala, tales como el Mapa de Ecosistemas Continentales y Costeros, de carácter oficial. Además, el mapeo mediante UAV es útil para evaluar cambios espaciales en periodos cortos, tal como lo demuestran estudios realizados en otras áreas costeras (Samiappan *et al.*, 2017a, 2017b; Gonçalves *et al.*, 2018; Broussard *et al.*, 2020; Gómez-Gutiérrez y Gonçalves, 2020) y el presente estudio. En ecosistemas costeros, los modelos de elevación de alta precisión y las ortofotos derivadas de conjuntos de datos tomados por los UAV mejoran el detalle espacial y temporal del reconocimiento geomorfológico. La implementación exitosa de un reconocimiento por UAV aumentó la resolución temporal del conjunto de datos y redujo potencialmente los costos de despliegue. Esto demuestra la alta resolución espacial y temporal que brindan los UAV cuando vuelan a bajas altitudes y con la frecuencia deseada por el investigador (Mandujano *et al.*, 2017). La fotogrametría de los UAV se ha convertido en una solución relevante —y posiblemente más asequible— para el monitoreo costero, según Gonçalves y Henriques (2015). Esta afirmación coincide con la mejora en la clasificación de planos lodosos mediante la fotointerpretación de imágenes de muy alta resolución. Los resultados son precisos en la medida en que los elementos en la fotografía pueden observarse en detalle mediante el *zoom*, junto con las notas y registros hechos en el campo, para identificar especies de plantas y características geográficas con mayor facilidad. El proceso, aunque consume más tiempo, brinda resultados más precisos en comparación con la clasificación de imágenes satelitales (Schmedtmann y Campagnolo, 2015; Broussard *et al.*, 2020).

En este caso, el uso de UAVs permitió una caracterización detallada de las dinámicas espaciales y

During this period, the mangrove area increases at the expense of grass and water (pond). In addition, there is sediment redistribution along the beach (Figure 7).

This mudflat houses a smaller number of bird individuals due to the limited space available; however, larger birds such as the brown pelican (*Pelecanus occidentalis*) are present as they use large mangrove trees for resting.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The use of UAVs for mudflat mapping allowed the detailed survey of environments that had not been mapped before due to their limited access and cloud cover conditions. It should be noted that the relatively small size of the study area (< 79 ha) allows the use of this technique, which would not be feasible for larger scale national surveys such as the official Continental and Coastal Ecosystems Map. Additionally, UAV mapping is useful to assess spatial changes over a short period of time, as shown by studies in other coastal areas (Samiappan *et al.*, 2017a, 2017b; Gonçalves *et al.*, 2018; Broussard *et al.*, 2020; Gómez-Gutiérrez and Gonçalves, 2020) and in the present study. In coastal environments, high-accuracy elevation models and the orthophotos derived from UAVs datasets improve the temporal and spatial detail of geomorphological surveys, successful implementation of a UAVs survey increased the temporal resolution of the dataset and potentially reduced the cost of deployment. Demonstrating the high spatial and temporal resolution that UAVs provide when flying at very low altitudes and at the frequency desired by the researcher (Mandujano, *et al.* 2017). Photogrammetry from UAVs has become an important and possibly more affordable solution for coastal monitoring according to Gonçalves and Henriquez (2015). This assertion coincides with improved classification of mudflats through photointerpretation of very high-resolution images. The results are accurate to the extent that the elements in the photograph can be observed in detail through zooming along with the notes and records made in the field to more easily identify plant species and geographic features. The process, although more time-consuming, provides more accurate results compared to the classification of satellite imagery (Schmedtmann and Campagnolo 2015; Broussard *et al.*, 2020).

In our case, the use of UAVs allowed a detailed characterization of the spatial and temporal dynamics of the La Bocana de Iscuandé mudflats, where we found differences in their sedimentological and morphological constitution. Specifically, we found differences in the type of materials,

temporales de los planos lodosos de La Bocana de Iscuandé, donde se encontraron diferencias en la constitución sedimentológica y morfológica. En específico, se encontraron diferencias en los tipos de materiales, en la pendiente y en la actividad de la marea y de las olas, condiciones que moldean el desarrollo y evolución de estos paisajes (Gao, 2019) y les dan un alto dinamismo espacial en periodos cortos. Estas características los hacen sitios ideales para el monitoreo con la ayuda de UAV.

Las limitaciones de esta técnica en nuestro estudio incluyen la dificultad para obtener puntos de control en el suelo (GCP) de alta precisión, las diferentes resoluciones espaciales relacionadas con el uso de cámaras diferentes y el ruido de áreas con agua en movimiento. Con respecto a los GCP, no se utilizaron GCP de alta precisión, lo cual es típico de esta técnica, debido a la dificultad para acceder a las áreas fangosas expuestas al mar. Aun así, las ortofotos no mostraron ninguna distorsión significativa causada por su limitada extensión espacial y su topografía plana. Su correcto posicionamiento se corroboró con imágenes ortorrectificadas de un satélite planetario con resolución de 3 m con fecha similar a la de los vuelos aquí discutidos. El uso de UAV con resoluciones espaciales y sensores diferentes, a pesar de que no compromete el detalle del mapeo final, arrojó algunas diferencias en el tamaño de los píxeles, por lo que se aconseja usar un solo vehículo para obtener ortofotos con tamaños de píxel similares. Finalmente, las imágenes tenían un efecto de ruido por el reflejo de la luz solar en áreas con agua marina en movimiento, si bien se adquirieron cuando el sol no estaba en su cénit. Las fotos con este efecto no pudieron ser combinadas por medio del software, lo que resultó en algunas diferencias en la extensión de las ortofotos finales. Para vuelos futuros que incluyan áreas marinas, debe considerarse el uso de elementos flotantes con colores contrastantes (*i.e.*, boyas) como puntos de control para aumentar la precisión de las ortofotos.

Los UAV son herramientas prácticas para mapear espacios cuyas dimensiones y condiciones meteorológicas dificultan el estudio con imágenes satelitales o fotografía aérea convencional, *e.g.*, las áreas costeras remotas. En este estudio se utilizaron imágenes UAV para caracterizar las dinámicas de dos planos lodosos en el transcurso de cuatro meses, utilizando resoluciones espaciales y temporales muy altas. Una mayor frecuencia de vuelos y puntos de control terrestres más precisos, junto con más estudios sobre su geología, biología y calidad ambiental generan datos críticos para la planeación de conservación en lugares de gran importancia ecológica, particularmente para las aves migratorias.

slope and tidal and wave activity, conditions that shape the development and evolution of these landscapes (Gao, 2019) and give them a high spatial dynamism over short periods of time. Such characteristics make them an ideal site to monitor with the aid of UAVs.

Limitations of this technique for our study area include the difficulty in obtaining high-precision ground control points (GCP), different spatial resolutions related to the use of different cameras, and noise from areas with moving water. With regards to GCPs, we did not use high-precision GCPs, as is typical for this technique, due to the difficulty in accessing the muddy areas exposed to the sea. Even so, the orthophotos did not show any significant distortions due to their limited spatial extent and flat topography. Their correct positioning was corroborated with orthorectified images from the 3-m-resolution Planet satellite with similar dates to our flights. The use of UAVs with different spatial resolutions and sensors, despite not compromising the final mapping detail, yielded some differences in pixel size so it is advisable to use a single vehicle and thus obtain orthophotos with similar pixel size. Finally, images had a noise effect from sunlight reflection in areas with moving seawater, even if they were acquired when the sun was not at its zenith. Photos with this effect could not be merged by the software, resulting in some differences in the extent of the final orthophotos. For future flights that include marine areas, the use of floating elements of contrasting colors such as buoys should be considered to use as control points, thus increasing the accuracy of the orthophotos.

UAVs are a practical tool for mapping spaces whose dimensions and meteorological conditions make them inconvenient to study with satellite images or conventional aerial photography, for example, remote coastal areas. Here, we used UAV images to characterize the dynamics of two mudflats over a period of four months, using very high spatial and temporal resolutions. The increased flight frequency and more precise terrestrial control points, together with more studies about their geology, biology and environmental quality, will generate critical data for conservation planning in places of great ecological importance, particularly for migratory birds.



AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado con un subsidio del programa de Fraternidad de Soluciones Costeras de la Universidad de Cornell y recibió apoyo logístico de la Asociación Calidris en el marco del proyecto de pasantía Mapeo de planos lodosos en la Bocana de Iscuandé, Departamento de Nariño, a partir de imágenes UAV. También recibió apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle por medio del subsidio CI 4406 – Convocatoria Interna 124-2020 asociado al proyecto Análisis multi-temporal de la vulnerabilidad por erosión costera en la Unidad Ambiental Costera Málaga Buenaventura. Queremos agradecer al Consejo Comunitario Esfuerzo Pescador de La Bocana de Iscuandé en el municipio de Santa Bárbara, departamento de Nariño, por permitarnos acceder a su territorio, así como a la Asociación Calidris y a la Universidad del Valle por su asesoría técnica.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was funded with a grant from the Coastal Solutions Fellowship program of Cornell University and logistical support from Calidris Association for the internship project *Mapping of mudflats in the Bocana de Iscuandé in the Department of Nariño from UAV images*, and supported by the Research Vice-Principalship of Universidad del Valle under grant CI 4406 – Internal Call 124-2020 associated with the project *Multi-temporal analysis of coastal erosion vulnerability in the Málaga Buenaventura Coastal Environmental Unit*. We would like to thank the Consejo Comunitario Esfuerzo Pescador (Fisheries Effort Community Council) of La Bocana de Iscuandé in the municipality of Santa Bárbara de Iscuandé in the department of Nariño for allowing access to its territory and the Calidris Association and the University of Valle for their technical advice.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Andrade, M.G. 2011. Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ciencia-política. *Rev. Acad. Col. Cien.*, 35 (137):491-508.
- Bayliss-Smith, T. P., R. Healey, R. Lailey, T. Spencer and D. R. Stoddart. 1979. Tidal flows in salt marsh creeks. *Estuar. Coast.*, 9 (3):235-55. doi: [https://doi.org/10.1016/0302-3524\(79\)90038-0](https://doi.org/10.1016/0302-3524(79)90038-0)
- Broussard, W. P., J.M. Visser and R.P. Brooks. 2020. Quantifying vegetation and landscape metrics with hyperspatial unmanned aircraft system imagery in a coastal oligohaline marsh. *Estuar. Coast.*, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00828-8>
- Brunier, G., E. Michaud, J. Fleury, E.J. Anthony, S. Morvan and A. Gardel. 2020. Assessing the relationship between macro-faunal burrowing activity and mudflat geomorphology from UAV-based Structure-from-Motion photogrammetry. *Remote Sens. Environ.*, 241:111717. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111717>
- Burger, J., L. Niles and K.E. Clark. 1997. Importance of beach, mudflat and marsh habitats to migrant shorebirds on Delaware Bay. *Biol. Conserv.*, 79 (2):283-92. doi: [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(96\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(96)00077-8)
- Calidris. 2017. La Bocana de Iscuandé, un lugar que conservamos, Resultados del monitoreo participativo en el territorio colectivo del Consejo Comunitario Esfuerzo Pescador. Cali. 134 p.
- Cantera, J.R., A. Giraldo, V. Castrillon, F. Cortes, A. Guzman, L.M. Mejía-Ladino, H. Saenz, O.D. Solano y E. Montoya. 2009. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia. Año 2008. *Inst. Invest. Mar. Cost. Invemar*, Santa Marta.
- Castellanos-Galindo, G.A., E. Casella, J.C. Mejía-Rentería and A. Rovere. 2019. Habitat mapping of remote coasts: Evaluating the usefulness of lightweight unmanned aerial vehicles for conservation and monitoring. *Biol. Conserv.*, 239:108282. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108282>
- Doughty, C.L. and K.C. Cavanaugh. Mapping coastal wetland biomass from high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. *Rem. Sens.*, 11 (5): 540. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11050540>
- Eisma, D. 1998. Intertidal deposits: river mouths, tidal flats, and coastal lagoons. Vol. 16. CRC. Boca Raton, USA. 234 p.
- Fuentes, J. 2020. Comparación de modelos de altura de la vegetación para estimación de biomasa en un bosque de manglar en el Caribe Colombiano. *Entor. Geo.*, (19): 1-18. doi: <https://doi.org/10.25100/eg.v0i19.9471>
- Fuentes, J., D. Varga and J. Pinto. 2018. The use of high-resolution historical images to analyse the leopard pattern in the arid area of La Alta Guajira, Colombia. *Geosci. J.*, 8 (10):366.
- Gao, S. 2019. Geomorphology and sedimentology of tidal flats: 359-381. In Perillo, G.M.E., E. Wolanski, D.R. Cahoon and C.S. Hopkinson (Eds). *Coastal wetlands*. Elsevier.
- Gómez-Gutiérrez, Á. and G.R. Gonçalves. 2020. Surveying coastal cliffs using two UAV platforms (multirotor and fixed-wing) and three different approaches for the estimation of volumetric changes. *Int. J. Rem. Sens.*, 41 (21):8143-75. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1752950>
- Gonçalves, J.A. and R. Henriques. 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 104:101-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Gonçalves, J.A., L. Bastos, S. Madeira, A. Magalhães and A. Bio. 2018. Three-dimensional data collection for coastal management – efficiency and applicability of terrestrial and airborne methods. *Int. J. Rem. Sens.*, 39 (24):9380-99. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1523591>

- Green, D.R., J.J. Hagon, C. Gómez and B.J. Gregory. 2019. Using low-cost UAVs for environmental monitoring, mapping, and modelling: Examples from the coastal zone: 465-501. In: Krishnamurthy, R.R., M.P. Jonathan, S. Srinivasalu and B. Glaeser (Eds). Coastal management. Academic.
- Greenwood, F. 2016. Drones on the horizon: new frontier in agricultural innovation. ICT Update.
- Gutiérrez, M.A., K.E. Meneses y L.M. Vásquez. 2019. Boletín meteomarinero mensual del Pacífico colombiano No. 74/Febrero. San Andrés de Tumaco. 31 p.
- Hoffmann, G., D.G. Rajnarayan, S.L. Waslander, D. Dostal, J.S. Jang and C.J. Tomlin. 2004. The Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (Starmac). Paper presented at the Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04.
- Ideam, Igac, IAvH, Sinchi, IIAP e Inveemar. 2017. Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1:100.000. Bogotá. 177 p.
- Igac, Ideam, IAvH, Inveemar, Sinchi e IIAP. 2007. Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Inveemar, CRC, Corponariño e IIAP. 2003. Formulación del plan de manejo integrado de la zona costera del complejo de las bocanas Guapi Iscuandé, Pacífico colombiano. Fase I Caracterización y diagnóstico. Inveemar, Santa Marta. 575 p.
- Johnston-González, R., C. Ruiz-Guerra, D. Eusse-González, L.F. Castillo-Cortés, Y. Cifuentes-Sarmiento, P. Falk-Fernández y V. Ramírez De Los Ríos. 2010. Plan de conservación para aves playeras en Colombia. Asociación Calidris, Cali. 44 p.
- Koh, L.P. and S.A. Wich. 2012. Dawn of drone ecology: Low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. Trop. Conserv. Sci., 5 (2):121-32. doi: <https://doi.org/10.1177/194008291200500202>
- Mandujano, S., M. Pazmany y A. Rísquez-Valdepeña. 2017. Drones: una nueva tecnología para el estudio y monitoreo de fauna y hábitats. Agro. Pro., 10: 79–84.
- Meng, X., N. Shang, X. Zhang, C. Li, K. Zhao, X. Qiu and E. Weeks. 2017. Photogrammetric UAV mapping of terrain under dense coastal vegetation: An object-oriented classification ensemble algorithm for classification and terrain correction. Rem. Sens., 9 (11):1187.
- Navarro, A., M. Young, B. Allan, P. Carnell, P. Macreadie and D. Ierodiaconou. 2020. The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. Rem. Sens. Environ., 242:111747. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111747>
- Nikolakopoulos, K., A. Kyriou, I. Koukouvelas, V. Zygouri and D. Apostolopoulos. 2019. Combination of aerial, satellite, and UAV photogrammetry for mapping the diachronic coastline evolution: The case of Lefkada Island. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 8 (11):489. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi8110489>
- Phang, V.X., L.M. Chou and D.A. Friess. 2015. Ecosystem carbon stocks across a tropical intertidal habitat mosaic of mangrove forest, seagrass meadow, mudflat and sandbar. Earth Surf. Process. Landf., 40(10): 1387-1400. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.3745>
- Rangel, J.O. 2004. Colombia diversidad biótica IV: El Chocó biogeográfico/costa pacífica. Univ. Nal. Col., Inst. Cienc. Nat.
- Rao, B., A.G. Gopi and R. Maione. 2016. The societal impact of commercial drones. Technol., 45: 83-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.02.009>
- Reid, W. V. 1998. Biodiversity hotspots. Trends Ecol. Evol., 13 (7): 275-280. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01363-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01363-9)
- Roldán-Pérez, G. 2016. Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat., 40 (155): 254-274. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>
- Samiappan, S., G. Turnage, L.A. Hathcock and R. Moorhead. 2017a. Mapping of invasive phragmites (common reed) in Gulf of Mexico coastal wetlands using multispectral imagery and small unmanned aerial systems. Int. J. Remote Sens., 38 (8-10):2861-82. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1271480>
- Samiappan, S., G. Turnage, L. Hathcock, L. Casagrande, P. Stinson and R. Moorhead. 2017b. Using unmanned aerial vehicles for high-resolution remote sensing to map invasive *Phragmites australis* in coastal wetlands. Int. J. Remote Sens., 38 (8-10):2199-217. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1239288>
- Schmedtmann, J. and M.L. Campagnolo. 2015. Reliable crop identification with satellite imagery in the context of common agriculture policy subsidy control. Rem. Sens., 7, 9325-9346. doi: <https://doi.org/10.3390/rs70709325>
- Sierra-Escrigas, S.L., R.D.P. Peluffo and R. García-Urueña. 2020. Shallow coral reef community mapping and update on its ecological units using aerial images at Isla Arena, Colombian Caribbean. Int. J. Rem. Sens., 41 (21):8198-215. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1763495>
- Tan, K., J. Chen, W. Zhang, K. Liu, P. Tao and X. Cheng. 2020. Estimation of soil surface water contents for intertidal mudflats using a near-infrared long-range terrestrial laser scanner. ISPRS J. Photogramm. Rem. Sens., 159:129-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.003>
- Vergara, A. y D. Arenas. 2017. Evaluación de la viabilidad del uso de aeronaves no tripuladas para la elaboración de cartografía catastral multipropósito. Anal. Geo., 54: 122.
- Xue, J., J. Yang, Q. Wang, R.B. Aronson and H. Wu. 2019. Community structure of benthic macroinvertebrates in reclaimed and natural tidal flats of the Yangtze River estuary. Aq. Fish., 4 (5):205-213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.04.001>
- Zhang, C. 2008. An UAV-based photogrammetric mapping system for road condition assessment. Int. Arch. Photogramm. Rem. Sens. Spatial Inf. Sci., 37:627-32.

RECIBIDO/RECEIVED: 05/03/2021

ACEPTADO/ACCEPTED: 07/04/2022