



Biomasa de pastos marinos y su rol como sumideros de carbono en las localidades de la isla de San Andrés y La Guajira, Caribe colombiano

Seagrass biomass and their role as carbon reservoirs in the localities of San Andrés Island and La Guajira, Colombian Caribbean

Andrés Acosta-Chaparro*, Laura Sánchez-Valencia, Diana Isabel Gómez-López,

0000-0002-0618-5689

0000-0002-1408-7050

0000-0002-4361-0330

Juan David González-Corredor y Raúl Navas-Camacho

0000-0002-5065-4913

0000-0002-6062-315X

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" Invemar, Santa Marta D. T. C. H., Colombia. andres.acosta@invemar.org.co*, laura.sanchez@invemar.org.co, diana.gomez@invemar.org.co, juan.gonzales@invemar.org.co, raul.navas@invemar.org.co

* Autor de correspondencia.

RESUMEN

Los pastos marinos se han destacado por ser muy efectivos en la fijación de carbono atmosférico, entre otros, debido a su capacidad de producir biomasa vegetal. Por lo anterior, se cuantificaron los valores de densidad de vástagos (m^3), biomasa (corazonadores) y el carbono presente en 12 localidades con *Thalassia testudinum* del Caribe colombiano (La Guajira y San Andrés isla). Las muestras biológicas se procesaron en laboratorio hasta obtener los valores de peso seco aéreo, subterráneo y total, y la estimación del carbono se realizó a partir de la relación del 35 % de la biomasa seca. Se realizaron pruebas estadísticas para determinar diferencias significativas entre las estaciones, resaltando la biomasa aérea en La Guajira y la biomasa subterránea en San Andrés. Se calculó que el carbono total en la biomasa viva de las praderas de La Guajira fue de 197 484 Mg C y en San Andrés 1835,4 Mg C. La diferencia entre áreas se debió a factores geomorfológicos e intrínsecos particulares. Se destaca que, aunque el carbono retenido en la biomasa (aérea y subterránea) es comparativamente menor al que se encuentra en los sedimentos, constituye el pilar de conservación tanto del sumidero de carbono como para la sostenibilidad del ecosistema.

PALABRAS CLAVE: Pastos marinos, Colombia, biomasa, carbono azul.

ABSTRACT

Seagrass meadows have stood out for being very effective fixing atmospheric carbon, among others, due to their ability to produce plant biomass. Therefore, the values of shoot density (m^3), biomass (cores) and carbon present in 12 locations with *Thalassia testudinum* at the Colombian Caribbean (La Guajira and San Andrés Island) were quantified. The biological samples were processed in laboratory until obtaining the values of aerial, underground and total dry weight, and the estimation of the carbon was establishing from a ratio of 35 % of the dry biomass. Statistical tests were carried out to determine significant differences between the sites, highlighting the aerial biomass in La Guajira and the underground biomass in San Andrés. It was calculated that the total carbon in the seagrasses' biomass from La Guajira were 197 484 Mg C and in San Andrés 1835.4 Mg C. The difference between locations were due to particular geomorphological and intrinsic factors. It is highlighted that, although the carbon retained in the biomass (aerial and underground) is comparatively lower than in sediments, it constitutes the pillar of conservation of both carbon sink as well as for the sustainability of the ecosystem.

KEYWORDS: Seagrass, Colombia, biomass, blue carbon.

INTRODUCCIÓN

Los pastos marinos representan menos de un 2 % de la cobertura a nivel global, sin embargo, son diez veces más eficientes para secuestrar carbono que otros sistemas biológicos terrestres (McLeod *et al.*, 2011; Murray *et al.*, 2011, Ramírez-García *et al.*, 2019), lo que los convierte en importantes sumideros de carbono en las zonas costeras, en una temática denominada carbono azul (Nellemann y Corcoran, 2009; Pendleton *et al.*, 2012, Macreadie *et al.*, 2019). Las praderas de pastos marinos almacenan tanto el carbono producido en sus tejidos (autóctono) como el proveniente de fuentes distintas (alóctono) (seston, macroalgas, etc.), acumulándolo en sus sedimentos (Duarte *et al.*, 2005, 2010; Kennedy *et al.*, 2010; Fourqurean *et al.*, 2012). Se calcula que globalmente las praderas de pastos marinos secuestran entre 20,73 a 50,69 Tg C/año (Charpy-Roubaud y Sournia, 1990; Duarte y Cebrián, 1996; Duarte *et al.*, 2005, 2010), lo que corresponde entre 10 y 18 % de la captura de carbono en los océanos, con un estimado diario de hasta $1,21 \pm 0,3 \text{ g/m}^2$ en los rizomas y raíces de la biomasa subterránea (Duarte y Chiscano, 1999).

El hecho de secuestrar carbono, se debe principalmente a su capacidad de producir biomasa vegetal, la cual juega un papel primordial en el almacenamiento de este en los sedimentos anóxicos, llegando incluso a hacerlo por décadas (Duarte *et al.*, 2005), por lo que entre más extensas y altas sean las praderas que conforman, mayor secuestro de carbono tendrá. Autores como Fourqurean *et al.* (2012) estiman que el carbono almacenado globalmente como biomasa promedia en $2,52 \pm 0,48 \text{ Mg C/ha}$ y de este, dos tercios corresponden a lo almacenado en rizomas y raíces, que finalmente podrá quedar sepultado por incluso milenios, convirtiéndolo en un gran sumidero de carbono a largo plazo (Pergent *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 1997; Ricart *et al.*, 2020). En Colombia, son pocas las estrategias y los estudios enfocados en esta temática, centrándose principalmente en la evaluación de atributos estructurales sin resaltar la importancia de estos en los reservorios de carbono, por este motivo, el presente estudio buscó cuantificar la biomasa y el carbono presente en esta, de las praderas de pastos marinos más representativas del Caribe colombiano, como lo son las de San Andrés y La Guajira.

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en dos regiones del Caribe colombiano donde el desarrollo y presencia de las praderas de pastos marinos es destacada. Una de ellas, en el Caribe

INTRODUCTION

Seagrasses represent less than 2 % of global cover, however, they are ten times more efficient at sequestering carbon than other terrestrial biological systems (McLeod *et al.*, 2011; Murray *et al.*, 2011, Ramírez-García *et al.*, 2019), which makes them important carbon sinks in coastal areas, this process is called Blue Carbon (Nellemann and Corcoran, 2009; Pendleton *et al.*, 2012, Macreadie *et al.*, 2019). Seagrass meadows store the carbon produced in their tissues (autochthonous) and from different sources (allochthonous) (seston, macroalgae, etc.), accumulating in their sediments (Duarte *et al.*, 2005, 2010; Kennedy *et al.*, 2010; Fourqurean *et al.*, 2012). It is estimated that seagrasses globally sequester between 20.73 to 50.69 Tg C/year (Charpy-Roubaud and Sournia, 1990; Duarte and Cebrián, 1996; Duarte *et al.*, 2005, 2010), which corresponds between 10 and 18 % of carbon sequestration in the oceans, with a daily estimate of $1.21 \pm 0.3 \text{ g/m}^2$ in the rhizomes and roots of the underground biomass (Duarte and Chiscano, 1999).

The fact of sequestering carbon is due to its ability to produce biomass, fulfilling a primary role in its storage in anoxic sediments, even for decades (Duarte *et al.*, 2005), it means that if the seagrass meadow is more extensive, it will have greater carbon sequestration. Authors such as Fourqurean *et al.* (2012) estimate that the average carbon stored globally is $2.52 \pm 0.48 \text{ Mg C/ha}$ and of this, two-thirds correspond to the stored in rhizomes and roots, which may ultimately be buried for even millennia, turning it into a large sink of long-term carbon (Pergent *et al.*, 1994; Mateo *et al.*, 1997; Ricart *et al.*, 2020). In Colombia, there are few studies related to this theme, mainly focusing on the evaluation of structural attributes without highlighting their importance as carbon reservoirs, for this reason, we sought to quantify the biomass and its role in the carbon present in two of the most representative seagrass meadows from the Colombian Caribbean, San Andrés Island and La Guajira.

STUDY AREA

The study was carried out in two regions of the Colombian Caribbean where the presence of seagrass meadows is marked. The first one is the area of La Guajira, where more than 80 % of the total seagrass in the country is found (Díaz *et al.*, 2003). The other region was in the western Caribbean, on the island of San Andrés, a site that is part of the SeaFlower Biosphere Reserve since 2000 and

continental, es La Guajira, en donde se encuentra más de 80 % del total de los pastos marinos del país (Díaz *et al.*, 2003). La otra región fue en el Caribe occidental insular, en la isla de San Andrés, la cual hace parte de la Reserva de Biósfera SeaFlower desde 2000 y desde 2005 hace parte de la sección sur del Área Marina Protegida (AMP) establecida al interior de la Reserva (Gómez-López *et al.*, 2012).

La Guajira

La plataforma continental en esta región constituye el extremo más norte de Colombia, presenta amplitudes que varían entre 8 y 17 km con un perfil de fondo que aumenta progresivamente y que constituye el talud continental, a su vez, cuenta con una extensión de pastos marinos de 56 424 ha básicamente de *Thalassia testudinum* (K.D. Koenig, 1805) que se extienden entre 0 y 15 metros de profundidad (Gómez-López *et al.*, 2014).

Los sedimentos de la plataforma continental de La Guajira, generalmente presentan contenidos de carbonatos, compuestos principalmente por restos de moluscos (bivalvos y gastrópodos) y equinodermos (ofiuros y otros organismos). Desde el punto de vista granulométrico, los depósitos sedimentarios son principalmente arenosos, con fracciones areno-lodosas hacia la Sierra Nevada y lodosas desde Bahía Honda hacia el oeste (Corpoguajira e Invemar, 2012). La intensidad de los vientos noreste y este, en la zona, transportan continuamente grandes cantidades de sedimentos que afectan la transparencia de las aguas. Además, estos vientos traen consigo un fuerte oleaje que genera continuamente resuspensión del material depositado en los fondos poco profundos y un efecto de surgencia, con afloramiento de aguas subsuperficiales (Gutiérrez-Leones *et al.*, 2015).

La toma de datos en esta zona se realizó en dos sectores: Media Guajira, en las estaciones de Musichi donde se muestreo una pradera extensa a 1 m de profundidad, constituida por *T. testudinum*; y Carrizal, estación donde se muestreo una pradera a 0,8 m de profundidad. En el sector de la Alta Guajira se muestrearon seis praderas, una en Cabo de la Vela (0,5 m de profundidad), dos en Bahía Portete (1,5 m de profundidad) y tres Bahía Hondita (1 m de profundidad) (Fig. 1).

San Andrés

La isla de San Andrés se encuentra ubicada en la porción occidental del mar Caribe, a unos 800 km de la costa de Colombia y a unos 110 de la de Nicaragua, posee una longitud de aproximadamente 12 km y un ancho de alrededor de 4 km en su sector más amplio. Por el lado de barlovento, posee una barrera arrecifal que separa un costado expuesto

has been part of a Marine Protected Area (AMP) since 2005 (Gómez-López *et al.*, 2012).

La Guajira

This area constitutes the northernmost point of the Colombian continental platform, it has amplitudes that vary between 8 and 17 km with a bottom that increases progressively. In turn, it has an extension of seagrass meadows of 56 424 ha, basically of *Thalassia testudinum* (K.D. Koenig, 1805) that extends between 0 and 15 m deep (Gómez-López *et al.*, 2014).

The sediments of La Guajira generally present carbonate content, composed mainly of remains of mollusks (bivalves and gastropods) and echinoderms (brittle stars and other organisms). The sedimentary deposits are mainly sandy, with sandy-muddy fractions towards the Sierra Nevada and muddy in Hondita Bay (Corpoguajira and Invemar, 2012). The intensity of the northeast and east winds in the area continually removes large amounts of sediment deposited in the shallow bottoms that affect the water's transparency. Also, produces an upwelling effect, with the outcropping of subsurface waters (Gutiérrez-Leones *et al.*, 2015).

The data in this area was carried out in two sectors: the Media Guajira, at Musichi, where an extensive meadow was sampled at a depth of 1 m; and Carrizal, a station sampled at 0.8 m. In the Alta Guajira, 6 meadows were sampled, one in Cabo de la Vela (0.5 m depth), 2 in Portete Bay (1.5 m) and 3 in Hondita Bay (1 m) (Fig. 1).

San Andres Island

Is located in the western area of the Caribbean Sea, at about 800 km from the coast of Colombia and about 110 from Nicaragua, it has a length of approximately 12 km and a width of 4 km in its broader sector. On the windward side, it has a barrier reef that separates a side exposed to the waves and winds, and a second environment that is generally calm, where a lagoon basin of variable extension is present (Díaz *et al.*, 1996, 2000; Gamboa *et al.*, 2010). Fragments of corals, sea urchins, and other animals have been deposited there, as well as calcareous macroalgae of species such as *Penicillus* spp., *Caulerpa* spp., and *Halimeda* spp., this last, as the most representative (Díaz *et al.*, 2003), rising the bioclastic sands that dominate as the most common type of sediment. In this sector, there are formations of seagrass meadows that consolidate the sediment layer with an approximate extension of 399 ha (Gómez-López *et al.*, 2014).

al oleaje y vientos, y un segundo ambiente por lo general protegido y calmo, donde se observa una cuenca lagunar que varía su extensión a la costa (Díaz *et al.*, 1996, 2000; Gamboa *et al.*, 2010). En esta cuenca se han depositado fragmentos de corales, erizos y otros animales, así como macroalgas calcáreas de especies como *Penicillus* spp., *Caulerpa* spp. y *Halimeda* spp., siendo estas últimas las más representativas (Díaz *et al.*, 2003), dando origen a las arenas bioclásticas que dominan como el tipo de sedimento más común. En este sector, se encuentran formaciones de praderas de pastos marinos que ayudan a consolidar la capa de sedimento con una extensión aproximada que en la isla llega a ser de 399 ha (Gómez-López *et al.*, 2014).

Stations were located in Cotton Cay (2 m), Mar Azul, and Hooker Bay (both approximately at 1 m), all of them located inside the pre-reef lagoon, next to the windward side of the island (Fig. 1) and constituted predominantly by *T. testudinum*.

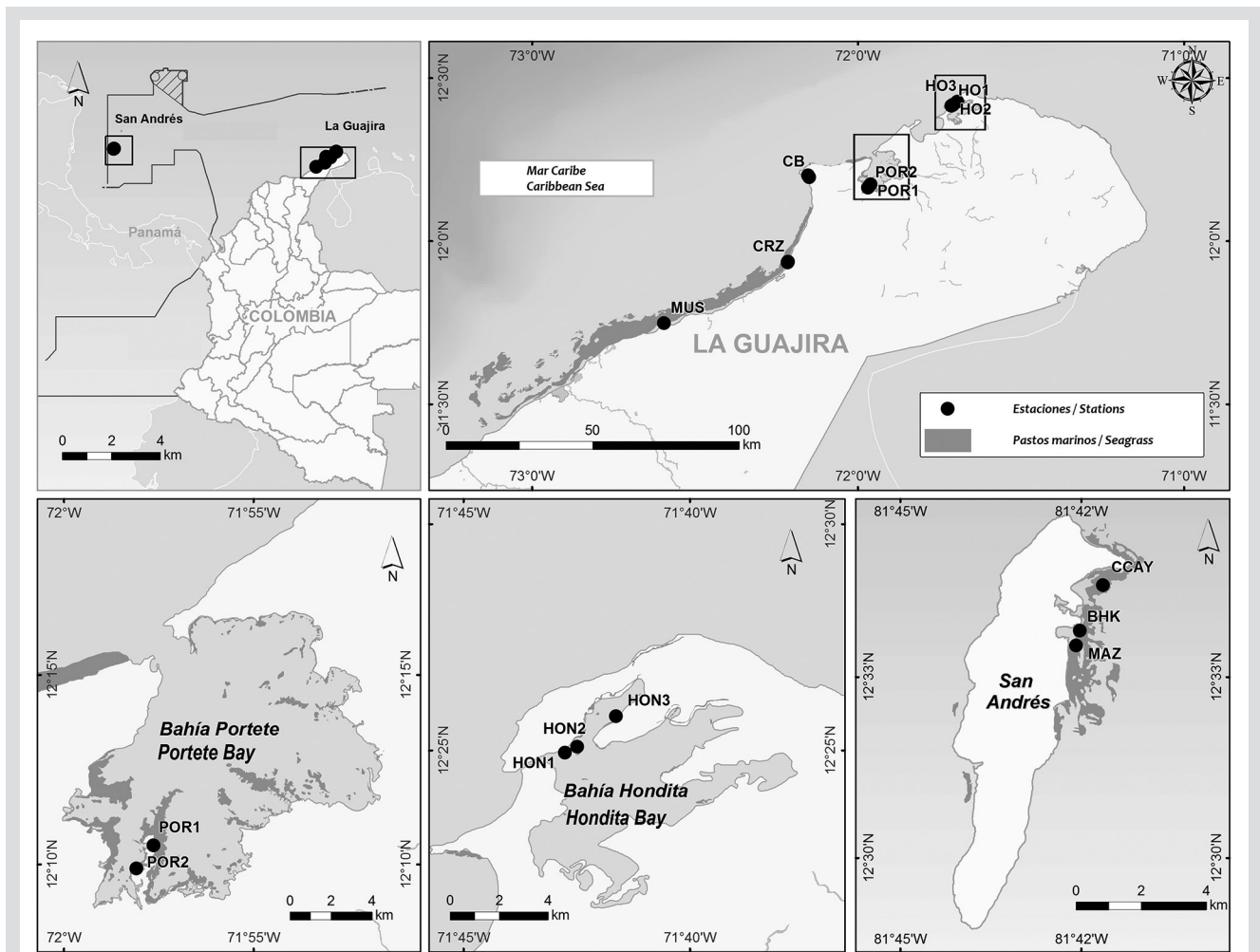


Figura 1. Mapa de las diferentes estaciones de muestreo ubicadas en la zona de La Guajira y San Andrés, (Guajira con POR: Bahía Portete, CB: Cabo de la Vela, CRZ: Carrizal, HON: Bahía Hondita; San Andrés con CCAY: Cotton Cay, BHK: Bahía Hooker, MAZ: Mar Azul) (Laboratorio servicios de Información geográfica – Invemar, 2020).

Figure 1. Sampling stations located in La Guajira and San Andrés, (Guajira with POR: Portete Bay, CB: Cabo de la Vela, CRZ: Carrizal, HON: Hondita Bay; San Andrés with CCAY: Cotton Cay, BHK: Hooker Bay, MAZ: Mar Azul) (Geographic Information Services Laboratory – Invemar, 2020).

En esta área se ubicaron tres estaciones en los lugares conocidos como Cotton Cay (2 m de profundidad), Mar Azul y Bahía Hooker (las dos a aproximadamente a 1 m de profundidad), todos ellos ubicados al interior de la laguna prearrecifal, al costado de barlovento de la isla (Fig. 1) y constituidas predominantemente por *T. testudinum*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el segundo semestre de 2017, y haciendo uso de un cuadrante de PVC de 50 x 50 cm, se tomaron datos de densidades (vástagos/m²), en cada uno de los sitios de muestreo siguiendo los protocolos descritos en el manual de SeagrassNet (Short *et al.*, 2008), posterior a ello, se realizó la extracción de la biomasa en sectores con alta densidad de pastos marinos (> 200 vástagos/m²) con ayuda de un nucleador de PVC (8 cm de diámetro y 40 cm de largo) que se insertó a través del sedimento, teniendo especial atención en no cortar las hojas, y llegando hasta el componente de rizomas y raíces de las plantas. El nucleador fue tapado en la parte superior y extraído del fondo con la muestra inmersa en él, tomando tres réplicas por estación. Cada una de estas fue tamizada para retirar sedimento particulado y puesta en bolsas herméticas dentro de una nevera con hielo para su traslado al laboratorio.

Fase de laboratorio

De cada estación se obtuvo el peso de la biomasa húmeda (g), separando a su vez las hojas y rizomas verticales (en adelante sección aérea) y las raíces y rizomas horizontales (en adelante sección subterránea). Las muestras fueron llevadas al laboratorio de calidad ambiental marina de Invemar, donde se limpiaron con HCl al 10 % para obtener únicamente el peso de la biomasa de la planta y minimizar el error por otros componentes asociados. Posteriormente, cada muestra fue puesta en bolsas de papel previamente rotuladas que se secaron en un horno a 60 °C durante 72 horas hasta obtener un peso constante del valor de la biomasa seca (g PS).

Procedimientos numéricos

Para calcular en cada estación los datos de biomasa (g PS/m²), se extrapoló el valor inicial del peso correspondiente a las muestras a 1 m². Adicionalmente, posterior a determinar que los datos no correspondían a una distribución normal, los resultados se compararon con una prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de comparaciones múltiples de Tukey, con el fin de determinar diferencias entre las estaciones a nivel de su biomasa aérea, subterránea y total, haciendo uso del programa Statgraphics Centurion XVI.

MATERIALS AND METHODS

During the second semester of 2017, using a 50 x 50 cm PVC quadrant, density data (stems/m²) were taken at each of the sampling sites following the protocols described in the SeagrassNet manual (Short *et al.*, 2008). Biomass extraction was carried out in sectors with a high density of seagrass (> 200 stems/m²) using a PVC corer (8 cm diameter and 40 cm long) inserted through the sediment, taking special care with the leaves, and reaching the rhizomes and roots of the plants. The corer was covered at the top and extracted from the bottom, taking 3 replicates per station. Each of these was cleaned to remove particulate sediment and placed in hermetic bags in a refrigerator with ice for transfer to a laboratory.

Laboratory phase

The weight of the wet biomass (g) was obtained from each station, separating the vertical leaves and rhizomes (aerial section) and the horizontal roots and rhizomes (underground section). The samples were sent to the marine environmental quality laboratory of Invemar, where they were cleaned with 10 % HCl to obtain the weight of the biomass of the plant and minimize the error due to other associated components. Subsequently, each sample was placed in previously labeled paper bags and dried at 60 °C for 72 hours to obtain a constant weight of the dry biomass value (g DW).

Numerical procedures

To calculate the biomass (g DW/m²) at each station, the initial value of the weight corresponding to the samples was extrapolated to 1 m². Additionally, after determining the data did not correspond to a normal distribution, the results were compared with a Kruskal-Wallis test and a Tukey multiple comparison test, to determine differences between the stations at the level of their aerial, underground and total biomass, using the Statgraphics Centurion XVI program.

The carbon content was determined using the methodology described by Fourqurean *et al.* (2012) where the calculated value corresponds to 35 % of the dry weight of the biomass. This procedure was carried out with each sampled station, to finally convert the values to Mg C/ha and thus extrapolate the value at the seagrass extension in the two sampling areas (La Guajira and San Andrés).

El contenido de carbono se determinó teniendo en cuenta lo descrito por Fourqurean *et al.* (2012), en el que se calcula que el valor corresponde al 35 % del peso seco de la biomasa. Este procedimiento se realizó con cada estación muestreada, para finalmente convertir los valores encontrados a Mg C/ha y así extrapolar el valor a la extensión de pastos correspondiente a las dos áreas de muestreo (La Guajira y San Andrés).

RESULTADOS

Los registros de biomasa aérea indican que las estaciones de Bahía Hondita 3 y Bahía Hondita 2 presentaron los datos más altos, con valores de 923,2 y 1068,4 g PS/m², seguidos por Cotton Cay y Carrizal, que superaron los 700 g PS/m². Por su parte, en la biomasa subterránea, las estaciones de Bahía Hondita 2 y Bahía Hooker destacaron con valores de 866,8 g PS/m² y 1057,1 g PS/m² respectivamente, seguidos de Cotton Cay, con 725,5 g PS/m². Cabe resaltar que 6 de las 11 estaciones presentaron una biomasa total que supera los 1000 g PS/m² mientras que las estaciones Bahía Hondita 1 y Bahía Portete 1 y 2 de La Guajira, registraron los menores valores.

RESULTS

Aerial biomass in Hondita Bay 3 and 2 presented the highest data, with values of 923.2 and 1068.4 g DW/m², followed by Cotton Cay and Carrizal, with values above 700 g DW/m². In the underground biomass, Hondita Bay 2 and Hooker Bay stood out with values of 866.8 g DW/m² and 1057.1 g DW/m² respectively, followed by Cotton Cay, with 725.5 g DW/m². Six of the stations presented total biomass that exceeds 1000 g DW/m², while the Hondita Bay 1 and Portete Bay 1 and 2 stations registered the lowest reported values.

Tabla 1. Variables de biomasa aérea, subterránea (a 50 cm de profundidad) y total (promedio + desviación estándar, g PS/m²) y densidad (vástagos/m²) para cada una de las estaciones.

Table 1. Variables of aerial, underground (at 50 cm depth) and total biomass (average + standard deviation, g DW/m²) and density (shoots/m²) for each one of the stations.

Área / Area	Localidad / Locality	Biomasa aérea / Aerial biomass	Promedio aérea / Aerial average	Biomasa subterránea / Underground biomass	Promedio subterránea / Underground average	Biomasa total / Total biomass	Promedio total / Total average	Densidad / Density
San Andrés	Bahía Hooker	407.87 ± 62.1	590.93	1057.169 ± 139.5	735.51	1465.1	1326.4	320
	Cotton Cay	748.11 ± 31.2		725.56 ± 47.4		1473.7		384
	Mar Azul	616.79 ± 18.5		423.79 ± 44.8		1040.6		400
La Guajira	Carrizal	728.1 ± 31.2	626.16	476.19 ± 45	426.66	1204.3	1052.8	288
	Cabo de la Vela	462.38 ± 58.4		112.74 ± 26.8		575.1		256
	Bahía Hondita/ Hondita Bay 1	550.47 ± 94.1		348.19 ± 13.1		898.7		352
	Bahía Hondita/ Hondita Bay 2	1068.43 ± 44.3		866.82 ± 67.3		1935.3		384
	Bahía Hondita/ Hondita Bay 3	923.2 ± 96.4		417.16 ± 51.9		1340.4		384
	Musichi	655.92 ± 37.3		703.67 ± 53.8		1359.6		336
	Bahía Portete/ Portete Bay 1	358.13 ± 11.3		277.55 ± 44.2		635.7		240
	Bahía Portete/ Portete Bay 2	262.63 ± 49.1		210.90 ± 22		473.5		288

Las densidades presentaron valores más altos en Mar Azul (400 vástagos/m²) y Bahía Hondita 2 (384 vástagos/m²) y más bajos en Bahía Portete 1 y 2 (por debajo de 280 vástagos/m²). Se destaca de igual modo que los valores más altos de la biomasa aérea corresponden a La Guajira y los de la subterránea a San Andrés. En la comparación entre las estaciones, se evidenciaron diferencias significativas a nivel de la biomasa aérea (Kruskal Wallis = 19,24, valor p = 0,03), la biomasa subterránea (Kruskal Wallis = 23,53, valor p = 0,008), así como en la total (Kruskal Wallis = 20,53, valor p = 0,02).

Densities presented higher values in Mar Azul (400 stems/m²) and Hondita Bay 2 (384 stems/m²) and lower values in Portete Bay 1 and 2 (below 280 stems/m²). The highest values of aerial biomass correspond to La Guajira and the underground to San Andrés. In the comparison between the stations, significant differences were evidenced at the level of aerial biomass (Kruskal Wallis = 19.24, value p = 0.03), underground biomass (Kruskal Wallis = 23.53, value p = 0.008), as well as in the total (Kruskal Wallis = 20.53, p-value = 0.02).

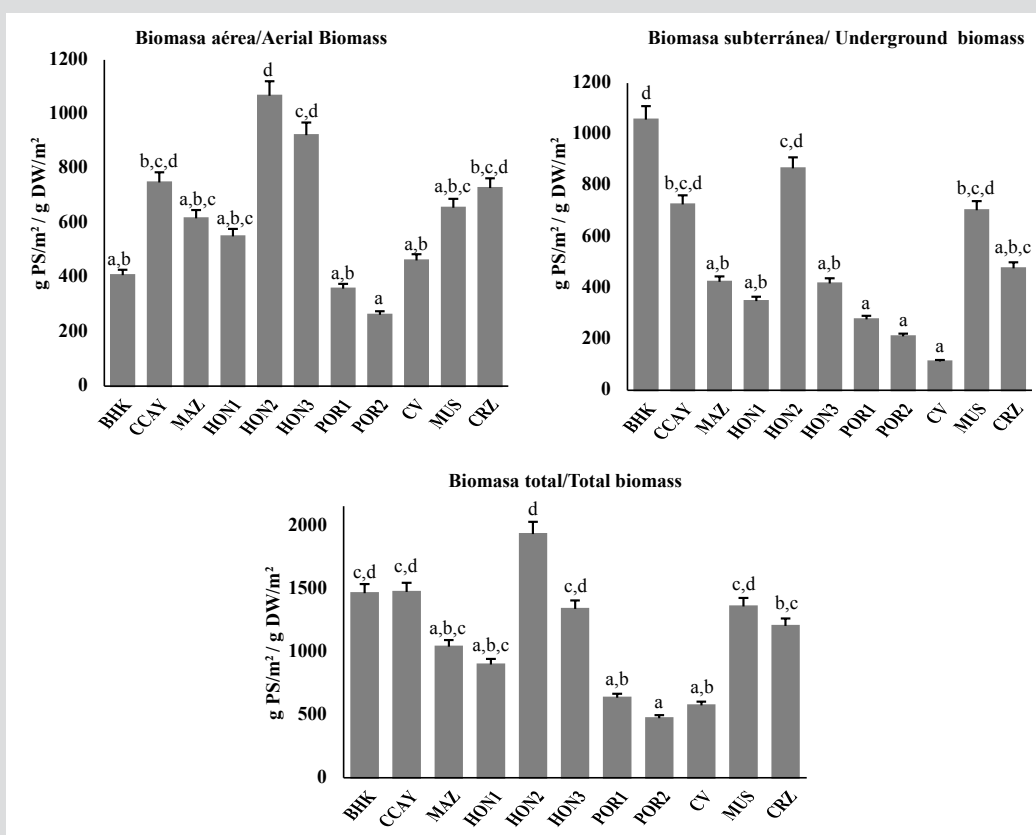


Figura 2. Valores de biomasa aérea, subterránea y total para cada una de las estaciones, siendo POR: Bahía Portete, CV: Cabo de la Vela, CRZ: Carrizal, HON: Bahía Hondita, CCAY: Cotton Cay, BHK: Bahía Hooker y MAZ: Mar Azul (letras diferentes representan diferencias significativas entre estaciones, $p < 0,05$).

Figure 2. Values of aerial, underground and total biomass for each of the stations, POR: Portete Bay, CV: Cabo de la Vela, CRZ: Carrizal, HON: Hondita Bay, CCAY: Cotton Cay, BHK: Hooker Bay and MAZ: Mar Azul (different letters represent significant differences between stations, $p < 0.05$).

Por otro lado, San Andrés presentó una mayor presencia de carbono en su biomasa total (4,6 Mg C/ha) frente a La Guajira (3,5 Mg C/ha), sin embargo, La Guajira presentó un valor más alto a nivel de la sección aérea, especialmente en Bahía Hondita 2 (3,7 Mg C/ha), mientras que en San Andrés destacó la subterránea, especialmente en Bahía Hooker (3,7 Mg C/ha). Estaciones como Bahía Portete 1, Bahía Portete 2 y Cabo de la Vela, presentaron los valores

San Andrés presented a greater presence of carbon in its total biomass (4.6 Mg C/ha) compared to La Guajira (3.5 Mg C/ha), however, La Guajira presented a higher value at the aerial section, especially in Hondita Bay 2 (3.7 Mg C/ha), while in San Andrés the underground one stood out, especially in Hooker Bay (3.7 Mg C/ha). Stations such as Portete Bay 1, Portete Bay 2, and Cabo de la Vela, presented the lowest values in both sections

más bajos en ambas secciones (por debajo de 1,6 Mg C/ha). Las estaciones que tuvieron una presencia más destacada de carbono sumando ambas secciones fueron Cotton Cay en San Andrés con 5,2 Mg C/ha y Bahía Hondita 2 para La Guajira con 6,8 Mg C/ha. Estaciones como Bahía Portete 1 y 2, presentaron los valores más bajos (menores a 2,2 Mg C/ha).

(below 1.6 Mg C/ha). The stations with the highest presence of carbon in both sections combined were Cotton Cay in San Andrés with 5.2 Mg C/ha and Hondita Bay 2 for La Guajira with 6.8 Mg C/ha. Stations such as Portete Bay 1 and 2 presented the lowest values (less than 2.2 Mg C/ha).

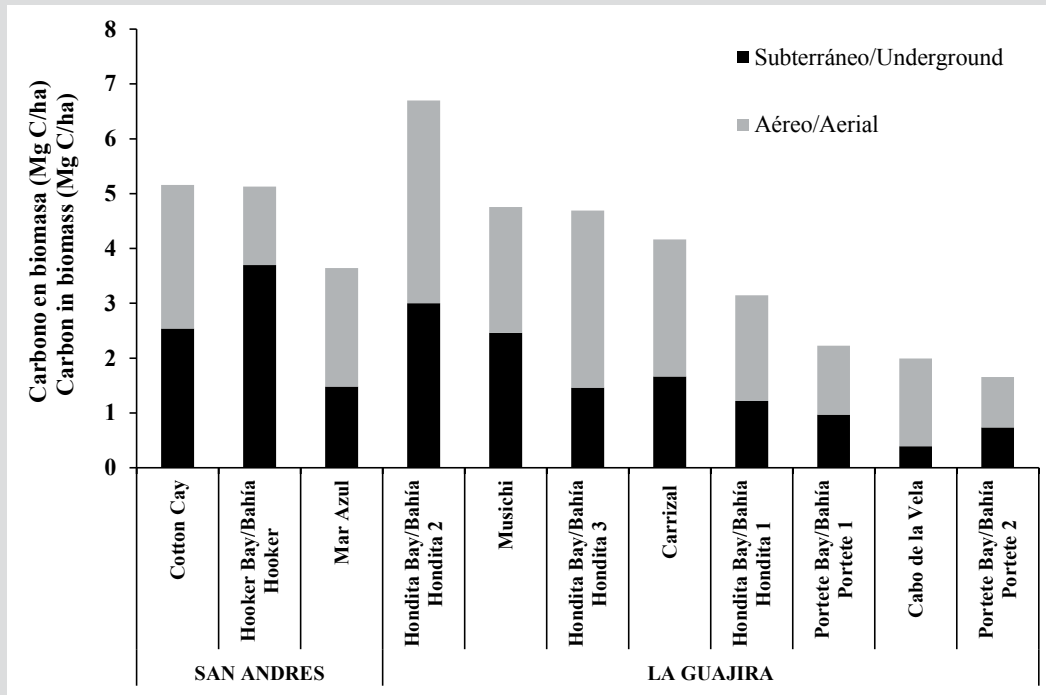


Figura 3. Valores de carbono (Mg C/ha) para cada sección de la planta en cada una de las estaciones trabajadas.

Figure 3. Carbon values (Mg C/ha) for each section of the plant in the stations.

Teniendo en cuenta los valores promedio de carbono registrados en ambas regiones y la extensión de las praderas de cada área, se estimó que los valores del stock de carbono asociado a las biomásas de pastos marinos son de 197 484 Mg C para La Guajira y de 1835,4 Mg C para San Andrés.

Taking into account the average values of carbon registered in both regions and the seagrass extension of each one, it was estimated that the carbon stock associated with the biomass of seagrasses is 197484 Mg C for La Guajira and 1835.4 Mg C for San Andrés.

DISCUSIÓN

Las diferencias registradas a nivel de las biomásas pueden deberse a diferentes factores relacionados a las condiciones de cada sitio, en el caso específico de La Guajira, la resuspensión de sedimentos es frecuente en la mayoría de los casos (Corpoguajira e Invemar, 2012), lo que hace que sus aguas sean extremadamente turbias, factor que contribuye a estimular el incremento del área foliar para la obtención de luz y llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, aumentando su biomasa aérea (Kraemer y Hanisak 2000, Díaz *et al.*, 2003). Esto se reafirma con estudios de monitoreo realizados por

DISCUSSION

The differences in the biomass may be due to factors related to the conditions of each site, in the specific case of La Guajira, the resuspension of sediments is frequent in most cases (Corpoguajira and Invemar, 2012), which makes its waters extremely cloudy, a factor that stimulates the increase of the leaf area to obtain light and carry out the photosynthesis process, increasing its aerial biomass (Kraemer y Hanisak 2000; Díaz *et al.*, 2003). This is reaffirmed by monitoring studies carried out by Invemar (Gómez-López *et al.*, 2018), where it was observed that

Invemar (Gómez-López *et al.*, 2018), donde se pudo observar que aquellas con mayor longitud corresponden a La Guajira (23,3 cm), mientras que en San Andrés se tomaron datos comparativamente más bajos (18,4 cm).

De forma distinta sucede en San Andrés, dado que los puntos donde se encuentran las praderas presentan condiciones de eutrofización producto de su cercanía al muelle de la isla y al centro poblado de esta (Gómez-López *et al.*, 2012). Esta situación trae consigo un aumento de las fracciones fangosas y lodosas, una disminución del oxígeno disponible y la proliferación de algas oportunistas (Burkholder *et al.*, 2007). En este sentido, especies como *Halimeda* spp, *Chaetomorpha* spp y *Cladophora* spp, son características de la zona (Gómez-López *et al.*, 2012; Albis-Salas y Gavio, 2015), y pueden crecer encima de las praderas, limitando en algunos casos, el crecimiento foliar (Duarte y Cebrián, 1996). A su vez, el mayor desarrollo de biomasa subterránea en esta región puede estar ligado a la alta fuente de sedimentos disponibles para atrapar en su sistema rizoidal, llegando incluso a formar terrazas que en algunos sectores de la isla pueden llegar a tener una altura entre 30 cm a 1 m sobre el fondo. Este sistema rizoidal les otorga un mejor mecanismo de fijación ante la presión por factores físicos como la remoción por embarcaciones y la presencia de vientos y corrientes por efecto de los alisios del nororiente (Albis-Salas *et al.*, 2006).

Comparando los resultados con estudios anteriores realizados en las mismas estaciones (Tabla 1), se puede identificar que los valores expuestos en este estudio corresponden a los rangos indicados anteriormente sin variaciones marcadas, sumándose a ellos los casos de Bahía Hondita 1, Bahía Hondita 2, Bahía Hondita 3 y Carrizal, que no contaban con registros anteriores, siendo estos los primeros. La excepción a esto corresponde a Cotton Cay, dado que el valor de abril de 2018 varía considerablemente en relación al valor de 1473,7 g PS/m² del presente estudio. Esto pudo deberse a la variación del atributo según la época de muestreo, dado que el primer caso corresponde a una temporada seca y el segundo a una lluviosa (Gómez-López *et al.*, 2012). Esta variación se ha documentado en otras localidades del Caribe colombiano, donde se han registrado cambios notorios en los parámetros de estructura en las praderas entre los dos semestres del año, debido a que este fenómeno genera variaciones en los nutrientes, la salinidad y en la disponibilidad de luz en la columna de agua (Gavio *et al.*, 2010). Ejemplo de ello es lo documentado por Gómez-López y Alonso (2016) en las praderas de Ballena y Manaure en La Guajira, así como las de Triganá y Pinorroa en Chocó Darién.

those with greater length correspond to La Guajira (23.3 cm), while in San Andrés is comparatively lower (18.4cm).

In San Andrés, seagrass meadows have conditions of eutrophication as a result of their proximity to the populated center (Gómez-López *et al.*, 2012). This situation generates an increase in muddy and muddy fractions, a decrease in available oxygen, and the proliferation of opportunistic algae (Burkholder *et al.*, 2007). In this sense, species such as *Halimeda* spp, *Chaetomorpha* spp, and *Cladophora* spp, are characteristic of the area (Gómez-López *et al.*, 2012, Albis-Salas and Gavio, 2015), and can grow on top of the seagrasses, limiting in some cases, leaf growth (Duarte and Cebrián, 1996). In turn, the greater development of underground biomass in this area may be linked to the high source of sediments available in its rhizoid system, even forming terraces that can reach a height between 30 cm to 1 m above the bottom. This rhizoidal system gives them a better fixing mechanism against pressure from physical factors such as removal by boats and the presence of winds and currents due to the effect of the Northeast Winds (Albis-Salas *et al.*, 2006).

Comparing the results with previous studies carried out in the same stations (Table 1), the values shown in this study seem to be similar, adding to them the cases of Hondita Bay 1, Hondita Bay 2, Hondita Bay 3, and Carrizal, which did not have previous records. The exception corresponds to Cotton Cay since the value reported for April 2018 varies considerably comparing the 1473.7 g PS/m² of the present study. This could be due to the variation of the sampling season since the first case corresponds to a dry season and the second to a rainy one (Gómez-López *et al.*, 2012). This variation has been documented in other localities of the Colombian Caribbean, where notorious changes have been registered in the structure parameters of the seagrasses between the two semesters of the year because this phenomenon generates variations in nutrients, salinity, and availability of light in the water column (Gavio *et al.*, 2010). An example of this is documented by Gómez-López and Alonso (2016) in the Ballena and Manaure seagrass in La Guajira, as well as those of Triganá and Pinorroa in Chocó Darién.

Table 2. Valores de peso seco en diferentes localidades del Caribe.

Lugar / Site	Valor / Value	Autor / Author
Florida, EEUU	1564 g PS/m ²	Powell <i>et al.</i> (1989)
Cancún, México	693 + 105 g PS/m ²	Gallegos <i>et al.</i> (1993)
Bahía Portete / Portete Bay, Colombia	765 – 1278 g PS/m ²	Castillo-torres (2002)
Cabo de la Vela, Colombia	657 – 1344 g PS/m ²	Castillo-torres (2002)
San Andrés, Colombia	801 – 1743 g PS/m ²	Castillo-torres (2002)
Bahía Portete / Portete Bay, Colombia	868.20 – 954.09 g PS/m ²	Albis-Salas <i>et al.</i> (2006)
Cabo de la Vela, Colombia	956.49–1821.09 g PS/m ²	Albis-Salas <i>et al.</i> (2006)
Cahuita, Costa Rica	828.8 + 391 g PS/m ²	Fonseca <i>et al.</i> (2007)
Costa Rica	786.5 + 287 g PS/m ²	Nielsen-Muñoz y Cortés (2008)
Quintana Roo, México	1857 g PS/m ²	Arellano-Méndez <i>et al.</i> (2015)
San Andrés, Colombia	573.94 g PS/m ²	Sánchez-Valencia <i>et al.</i> (2019)

Table 2. Dry Weight values of total biomass in different sites of the Caribbean.

Por otro lado, los valores promedio de biomasa total se encontraron en un punto intermedio respecto a estudios realizados en otros países (Tabla 1). Las variaciones entre estos sitios pudieron deberse a componentes fisicoquímicos en la columna de agua, el tipo de sustrato en el que se desarrollan (Lee *et al.*, 2007; Ralph *et al.*, 2007) y variables como la temperatura y salinidad, que pueden generar cambios en la composición y estructura de la pradera. En el caso de este estudio, estas variables parecen no intervenir de manera negativa en la biomasa, dado que los valores promedio de temperatura (La Guajira: 28,6 °C; San Andrés: 29,1 °C) y salinidad (La Guajira: 36,6 ups; San Andrés: 35,9 ups) (Invemar, 2020), se encuentran cercanos a los rangos óptimos reportados para *T. testudinum*, de aproximadamente 30 °C para temperatura, y entre 24-35 para salinidad (Mazzotti *et al.*, 2007). Zonas con una biomasa menor, pueden ser resultado de temperaturas elevadas y aguas euri o estenohalinas, causando efectos deletéreos por la proliferación de fitoplancton y macroalgas, o bien por dinámicas naturales de la pradera en su ciclo anual (Burkholder *et al.*, 2007).

En cuanto al carbono presente en la biomasa de las dos áreas de estudio, cabe resaltar que son pocos los estudios enfocados en determinar este dato, especialmente en la región Caribe, sin embargo, los valores registrados en este estudio, superan el promedio mundial de 2,5 + 0,4 Mg C/ha Fourqurean *et al.* (2012). Cabe aclarar que este se trata de un promedio de estudios realizados en diferentes regiones del mundo y con diferentes especies de pastos marinos, por lo cual el resultado podría variar significativamente según la especie, como en el caso de las praderas de *Posidonia oceanica* en el Mediterráneo con valores promedio de 7,2 + 1,5 Mg C/ha (Fourqurean

The average values of total biomass were found at an intermediate point comparing studies in other countries (Table 2). The variations between these sites could be due to physicochemical components in the water column, the type of substrate in which they develop (Lee *et al.*, 2007; Ralph *et al.*, 2007), and variables such as temperature and salinity, which can generate changes in the composition and structure of the meadow. In the case of this study, these variables do not seem to intervene negatively in biomass, because the average values of temperature (La Guajira: 28.6 °C; San Andrés: 29.1 °C) and salinity (La Guajira: 36.6 ups; San Andrés: 35.9 ups) (Invemar, 2020), are close to the optimal ranges reported for *T. testudinum*, of approximately 30 °C for temperature, and between 24-35 for salinity (Mazzotti *et al.*, 2007). Areas with lower biomass may be the result of high temperatures and euri or stenohaline waters, causing deleterious effects due to the proliferation of phytoplankton and macroalgae, or to the natural dynamics of the meadow in its annual cycle (Burkholder *et al.*, 2007).

Regarding the carbon present in the biomass of the two study areas, it should be noted that there are few studies focused on determining this data, especially in the Caribbean region, however, the values recorded in this study exceed the world average of 2.5 + 0.4 Mg C/ha reported by Fourqurean *et al.* in 2012. It should be noted that this is an average of studies carried out in different regions of the world and with different species of seagrasses, so the result could vary significantly depending on the species, as in the case of *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean that reported average values of 7.2 + 1.5 Mg C/ha (Fourqurean *et al.*, 2012). Particularly, in the case of *T.*

et al., 2012). Particularmente, en el caso de las praderas de *T. testudinum*, se registran datos presentes en el Caribe mexicano de 14,5 Mg C/ha (ArellanoMéndez *et al.*, 2015) y de 0,39 + 0,05 Mg C/ha (Congdom *et al.*, 2017); así mismo, Fourqurean *et al.* (2012) presentan valores de 0,84 + 0,1 Mg C/ha para el Atlántico occidental en la parte del trópico. Estos valores son contrastantes con respecto al de este estudio, evidenciando no solo la variabilidad del comportamiento de esta especie y cómo la distribución geográfica y los patrones intrínsecos de cada sitio pueden afectar este resultado, sino también lo importante que es seguir investigando todo lo referente a carbono azul.

Si bien los reservorios de carbono asociados a la biomasa tienden a ser comparativamente más bajos al compararlos con los valores calculados para el sedimento (Ricart *et al.*, 2020), cuyo promedio global es de 194,2 + 20,2 Mg C/ha (Fourqurean *et al.*, 2012), su importancia no radica sólo en esta función, teniendo en cuenta que también cumplen un papel fundamental para la prestación de algunos servicios ecosistémicos importantes, entre los que destaca la regulación climática, dado que el mantenimiento de la estructura de las praderas, permite llevar a cabo de manera más eficiente su función como reservorio de carbono en sedimentos (Pergent *et al.*, 1994; Romero *et al.*, 1994; Mazarrasa *et al.*, 2015).

A nivel del Caribe colombiano esto cobra mayor importancia, teniendo en cuenta los datos registrados en Serrano *et al.* (2021), los cuáles muestran una aproximación al cálculo del carbono en los sedimentos de los pastos marinos del país, destacando que el valor de los stocks en los sedimentos de La Guajira y San Andrés superan los promedios globales, alcanzando los 240 Mg C/ha. Esto, sumado a lo registrado por Guerra *et al.* (2020) para San Andrés, donde se calculó que el valor de carbono en los sedimentos osciló entre 91 y 144 Mg C/ha, y lo hallado por Congdon *et al.* (2017) y Gullström *et al.* (2018), donde se evidenció que el contenido de carbono en sedimentos es más alto en zonas donde la cobertura y la biomasa tiende a ser mayor, refrenda el hecho de que la protección del sistema de biomasa aérea y subterránea repercute directamente en los reservorios de los sedimentos, y por ende en la optimización de los procesos de captura de carbono.

CONCLUSIONES

Se evidenciaron diferencias significativas en las estaciones a nivel de la biomasa aérea, subterránea y total, mostrando la variación que hay según las condiciones particulares en las que se desarrollan las praderas de cada lugar.

testudinum meadows, there is data present in the Mexican Caribbean with values of 14.5 Mg C/ha (Arellano-Méndez *et al.*, 2015) and 0.39 + 0.05 Mg C/ha (Congdom *et al.*, 2017), and for the tropical western Atlantic with the Fourqurean *et al.* (2012) reported values of 0.84 + 0.1 Mg C/ha. These results are contrasting with the one reported in this study, showing the variability of the behavior of this species and how the geographical distribution and the intrinsic patterns can affect the results. Also, shows how important it is to continue investigating the related theme of Blue Carbon.

The carbon values associated with biomass tend to be comparatively lower when compared to the values calculated for the sediment (Ricart *et al.*, 2020), whose global average is 194.2 + 20.2 Mg C/ha (Fourqurean *et al.*, 2012), but their importance does not depend only in this function, taking into account that they also play a fundamental role in the provision of some important ecosystem services, especially climate regulation. This means that the maintenance of the seagrass structure, allows it to more efficiently carry out its function as a carbon reservoir in sediments (Pergent *et al.*, 1994; Romero *et al.*, 1994; Mazarrasa *et al.*, 2015).

At level of the Colombian Caribbean, this becomes more important, taking into account the data recorded in Serrano *et al.* (2021), which shows an approximation of the carbon values in the sediments of the country's seagrasses, highlighting that the stocks in the sediments of La Guajira and San Andrés exceed global averages, reaching 240 Mg C/ha. This, added to the study from Guerra *et al.* (2020) for San Andrés, where the value of carbon in the sediments ranged between 91 and 144 Mg C/ha, and the information reported by Congdon *et al.* (2017) and Gullström *et al.* (2018), where it was shown that the carbon content in sediments is higher in areas where coverage and biomass tend to be greater, endorses the fact that the protection of the aerial and underground biomass system has a direct impact on the reservoirs of sediments, and therefore in the optimization of carbon capture processes.

CONCLUSIONS

Significant differences were evidenced in the stations at the level of aerial, underground, and total biomass, showing the variation that exists according to the particular conditions in which the seagrass develops.

The aerial section predominated in La Guajira, presumably due to turbidity factors that stimulate its growth to optimize light capture, while in San Andrés the underground

En La Guajira predominó la sección aérea, presumiblemente debido a factores de turbidez que estimulan su crecimiento para optimizar la captación de luz, mientras que en San Andrés predominó la sección subterránea, debido a que las estaciones se encuentran en sustratos fangosos por lo que requieren mecanismos de fijación al fondo más fuertes.

Los valores de biomasa total se encuentran de manera generalizada cercanos a los valores registrados por diversos autores en las mismas localidades de estudio, y en un punto intermedio con respecto a otras regiones del Caribe como Costa Rica, México y Florida.

Los valores de carbono (Mg C/ha) en San Andrés y en La Guajira superan el dato del promedio mundial calculado con datos de varias especies, sin embargo, presentaron una variación con respecto a los registrados en otras regiones del Caribe correspondientes a la misma especie (*T. testudinum*).

Los stocks de carbono registrados para San Andrés y La Guajira corresponden a estimaciones basadas en los datos recopilados aquí; sin embargo, se requieren de estudios a futuro donde se tenga en cuenta la variabilidad de las coberturas a lo largo de ambas regiones, para dar un dato con un grado de certidumbre mayor.

Si bien los valores de reservorios de carbono asociados a la biomasa son comparativamente más bajos con respecto a los sedimentos, la presencia y mantenimiento de la estructura en la pradera representa un factor primordial en el mantenimiento de este reservorio.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Acción MAPCO cofinanciada según contrato de subvención ENV/2016/380-256 de la Unión Europea, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-Invemar y Fundación Natura Colombia con la asesoría del IMEDEA-CSIC de España y la Universidad Edith Cowan de Australia. Los autores agradecen a la Dra. Núria Marbà del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados de España por sus valiosos aportes y sugerencias en la elaboración del documento, al personal de Coralina que acompañó las actividades de campo en el sector de San Andrés. La presente publicación es responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la Unión Europea. Esta es la contribución # 1334 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - Invemar.

section predominated because the stations are located in areas of the muddy substrate, requiring stronger fixing mechanisms to the bottom.

Total biomass values are similar to the values reported by various authors in the same study areas, and at an intermediate point concerning other Caribbean areas such as Costa Rica, Mexico, and Florida.

Carbon values (Mg C/ha) in San Andrés and La Guajira exceed the world average data calculated with data from several species, however, they presented a variation for those reported in other areas of the Caribbean corresponding to the same species (*T. testudinum*).

The carbon stocks reported for San Andrés and La Guajira correspond to estimates based on the data compiled in this study, however, future studies are required to take into account the variability of coverage throughout both regions.

Although the values of carbon reservoirs associated with biomass are comparatively lower concerning sediments, the presence and maintenance of the structure in the grassland represent a primary factor in the maintenance of this reservoir.

ACKNOWLEDGMENTS

Acknowledgments to the MAPCO Action co-financed according to grant contract ENV/2016/380-256 of the European Union, Institute of Marine and Coastal Research-Invemar, and Fundación Natura Colombia with the advice of IMEDEA-CSIC of Spain and the Edith Cowan University of Australia. The authors thank Dr. Núria Marbà from the Mediterranean Institute for Advanced Studies in Spain for her valuable contributions and suggestions in preparing the document, and the Coralina staff who accompanied the field activities in the San Andrés sector. This publication is the sole responsibility of the authors and does not necessarily reflect the views of the European Union. This is contribution # 1334 of the Marine and Coastal Research Institute - Invemar.



BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Albis-Salas, M. R. and B. Gavio. 2015. Notes on the marine algae of the International Biosphere Reserve Seaflower, Caribbean Colombia IV: New records of macroalgal epiphytes on the seagrass *Thalassia testudinum*. Bol. Invest. Mar. Cost., 44(1), 55-70. ISSN 0122-9761
- Albis-Salas, M. R., D. I. Gómez-López y G. Duque. 2006. Estructura y producción primaria de las praderas de *Thalassia testudinum* en La Guajira, Caribe colombiano, en época climática seca. Acta Biol. Colomb., 11, 100 p. ISSN: 1900-1649.
- Arellano-Méndez, L., S. Morales-Ojeda y J. Herrera-Silveira. 2015. Carbono orgánico de las praderas de *Thalassia testudinum* en bahía de la Ascensión (Quintana Roo, México). Una primera estimación del contenido de carbono azul en una laguna costera del Caribe mexicano: 476-481. En: Paz, F. y J. Wong. (Eds). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014. Texcoco, México. pp. ISBN: 978-607-96490-2-9.
- Burkholder, J. M., D. A. Tomasko and B.W. Touchette. 2007. Seagrasses and eutrophication. J Exp Mar Bio Ecol., 350 (1-2): 46-72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.024>.
- Castillo-Torres, P. 2002. Caracterización estructural y evaluación del estado ambiental de las praderas de pastos marinos del Caribe colombiano. Tesis Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 81 p.
- Charpy-Roubaud, C. and A. Sournia, A. 1990. The comparative estimation of phytoplanktonic and microphytobenthic production in the oceans. Mar. Microb. Food Webs, 4: 31– 57.
- Congdon, V. M., S. S. Wilson and K. H. Dunton. 2017. Evaluation of relationships between cover estimates and biomass in subtropical seagrass meadows and application to landscape estimates of carbon storage. Southeastern Geographer, 57(3), 231-245.
- Corpoguajira e Invemar. 2012. Atlas marino costero de La Guajira. Santa Marta, Colombia: Serie de Publicaciones Especiales de Invemar No. 27. 188 p. ISBN: 978-958-8448-45-9.
- Díaz, J. M., G. Díaz-Pulido, J. Garzón-Ferreira, J. Geister y J. A Sánchez. 1996. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano. I. Complejos arrecifales oceánicos. Ser. Publ. Esp. Invemar, 2, 83 p. ISBN: 958-95950-3-0.
- Díaz, J. M., L. M. Barrios-Suárez, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. Santa Marta, Colombia: Invemar, Serie de Publicaciones Especiales No.5. 179 p. ISBN: 958-95950-8-1.
- Díaz, J. M., L. M. Barrios-Suárez y D. I. Gómez-López. (Eds.). 2003. Praderas de pastos marinos en Colombia: Estructura y distribución de un ecosistema estratégico. Ser. Publ. Espec., 10, 162 p. ISBN: 958-97301-5-9.
- Duarte, C. and J. Cebrián. 1996. The fate of marine autotrophic production. Limnol. Oceanogr. Bull., 41: 1758-1766. <https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.8.1758>
- Duarte, C. and C. Chiscano. 1999. Seagrass biomass and production: a reassessment. Aquat. Bot., 65: 159-174. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00038-8)
- Duarte, C. M., J. J. Middelburg and N. Caraco. 2005. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. Biogeosciences, 2(1): 1-8. <https://doi.org/10.5194/bg-2-1-2005>
- Duarte, C., N. Marbà, E. Gacia, J. Fourqurean, J. Beggins, C. Barrón and E. Apostolaki. 2010. Seagrass community metabolism: Assessing the carbon sink capacity of seagrass meadows. Global Biogeochem. Cycles, 24: 1-8. <https://doi.org/10.1029/2010GB003793>
- Fourqurean, J. W., C. M. Duarte, H. Kennedy, N. Marbà, M. Holmer, M. A. Mateo and O. Serrano. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nat. Geosci., 5(7), pp 505. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>.
- Fonseca, A. C., V. Nielsen y J. Cortés. 2007. Monitoreo de pastos marinos en Perezoso, Cahuita, Costa Rica (sitio Caricom). Rev. Biol. Trop., 55(1): 55-66. ISSN 0034-7744.
- Gallegos, M. E., M. Merino, N. Marbà and C. M. Duarte. 1993. Biomass and dynamics of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: elucidating rhizome growth. Mar. Ecol. Prog. Ser., 185-192. <https://doi.org/10.3354/meps095185>
- Gamboa, L., B.O. Posada, O.C. González, G. Hurtado y C.A. Andrade-Amaya. 2010. Descripción física del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina: 35-53. En Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. ISBN: 978-958-8448-50-3.
- Gavio, B., P. Palmer-Cantillo and J. E. Mancera. 2010. Historical analysis (2000–2005) of the coastal water quality in San Andrés Island, SeaFlower Biosphere Reserve, Colombian Caribbean. Mar. Pollut. Bull., 60(7), pp 1018-1030. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.01.025>
- Gómez-López, D. I. y D. Alonso. (Eds.). 2016. Levantamiento de información para la caracterización y diagnóstico de las praderas de pastos marinos con fines de elaborar una propuesta de zonificación de la zona marino-costera del departamento de La Guajira y Chocó Caribe. Fase II: época climática seca. Informe Técnico final Temática 2. En: Vides et al. (Eds). Levantamiento de información ambiental de sistemas marinos y costeros sobre el Caribe colombiano Fase II. Convenio 167 ANH- Invemar, Santa Marta.
- Gómez-López, D. I., C. Segura-Quintero, P.C. Sierra-Correa y J. Garay-Tinoco. 2012. Atlas de la Reserva de Biósfera Seaflower. Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Ser. Publ. Espec. Invemar, 28. ISBN: 978-958-8448-50-3.
- Gómez-Lopez, D. I., C. Díaz-Sanchez, E. Galeano, L. Muñoz, S. Millán, N. Bolaños y C. Garcia. 2014. Informe técnico final Proyecto de Actualización cartográfica del atlas de pastos marinos de Colombia: Sectores Guajira, Punta San Bernardo y Chocó: Extensión y estado actual. PRY- BEM-005-13 (convenio interadministrativo 2131068) Fonade-Invemar. Santa Marta. 136 p.
- Gómez-López, D.I., A. Acosta-Chaparro, J.D. González, L. Sanchez, R. Navas-Camacho y D. Alonso. 2018. Reporte del estado de los arrecifes coralinos y pastos marinos en Colombia (2016-2017). Ser. Publ. Gen. Invemar, 101. 100 p.
- Guerra-Vargas, L. A., L. G. Gillis and J. E. Mancera-Pineda. 2020. Stronger together: do coral reefs enhance seagrass meadows “Blue Carbon” potential? Front. Mar. Sci., 7, 628.

- Gullström, M., L. D. Lyimo, M. Dahl, G. S. Samuelsson, M. Eggertsen, E. Anderberg and M. Björk. 2018. Blue carbon storage in tropical seagrass meadows relates to carbonate stock dynamics, plant–sediment processes, and landscape context: insights from the western Indian Ocean. *Ecosystems*, 21(3), 551-566. doi: <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0170-8>
- Gutiérrez Leones, G. A., M. A. Correa Ramírez, H. Fritz y S. Ernesto. 2015. Análisis de la variabilidad espacio-temporal del sistema de surgencia de La Guajira en el dominio espacio-frecuencia, empleando el MTM-SVD (Multi Taper Method Singular Value Decomposition). *Bol. Cient. CIOH*, (33), 87-106. doi https://doi.org/10.26640/01200542.33.87_106.
- Invemar. 2020. Sistema de Información Ambiental Marina de Colombia – SIAM. Base de datos de la Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM (segundo muestreo 2017 La Guajira y San Andrés). Invemar. Disponible en: <http://www.invemar.org.co/siam/redcam>
- Kraemer, G.P. and M.D. Hanisa. 2000. Physiological and growth responses of *Thalassia testudinum* to environmentally-relevant periods of low irradiance. *Aquat. Bot.*, 67(4): 287-300. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00096-6)
- Lee, K.-S., S.R. Park and Y.K. Kim. 2007. Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 350 (1-2): 144–175. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.016>.
- Macreadie, P. I., A. Anton, J. A. Raven, N. Beaumont, R. M. Connolly, D. A. Friess and C. M. Duarte. 2019. The future of Blue Carbon science. *Nature communications*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
- Mateo, M.A., J. Romero, M. Pérez, M.M. Littler and D.S. Littler. 1997. Dynamics of millenary organic deposits resulting from the growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 44: 103-110. <https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0116>.
- Mazarraza, I., N. Marbà, C.E. Lovelock, O. Serrano, P.S. Lavery, J.W. Fourqurean and C.M. Duarte. 2015. Seagrass meadows as a globally significant carbonate reservoir. *Biogeosciences*, 12(16), 4993-5003. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4993-2015>
- Mazzotti, F.J., L.G. Pearlstine, R. Chamberlain, T. Barnes, K. Chartier and D. DeAngelis. 2007. Stressor-response models for seagrasses, *Halodule wrightii* and *Thalassia testudinum*. Final report to the South Florida Water Management District and the US Geological Survey. Univ. Florida, Florida Lauderdale Res. Educ. Cent., Fort Lauderdale, USA.
- McLeod, E., G. L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Björk, C. M. Duarte and B. R. Silliman. 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front. Ecol. Environ.*, 9(10), pp 552-560. <https://doi.org/10.1890/110004>.
- Murray, B., L. Pendleton, W. Jenkins and S. Sifleet. 2011. Green payments for blue carbon economic incentives for protecting threatened coastal habitats. <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/blue-carbon-report-paper.pdf>.
- Nielsen-Muñoz, V. y J. Cortés, J. 2008. Abundancia, biomasa y floración de *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) en el Caribe de Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, 56(4), pp 175-189. ISSN: 0034-7744.
- Nellemann, C. and E. Corcoran. (Eds.). 2009. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon: a rapid response assessment. United Nations Environment Programme /Earthprint. ISBN: 978-82-7701-060-1.
- Pendleton, L., D.C. Donato, B.C. Murray, S. Crooks, W.A. Jenkins, S. Sifleet, C. Craft, J.W. Fourqurean, J.B. Kauffman, N. Marba, P. Megonigal, E. Pidgeos, D. Herr, D. Gordon and A. Baldera. 2012. Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS One*, 7(9). <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9501-3>.
- Pergent, G., J. Romero, C. Pergent-Martini, M. A. Mateo and C. F. Boudouresque. 1994. Primary production, stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 106(1-2): 139-146. <https://doi.org/10.3354/meps106139>.
- Powell, G.V., J.W. Kenworthy and J.W. Fourqurean. 1989. Experimental evidence for nutrient limitation of seagrass growth in a tropical estuary with restricted circulation. *Bull. Mar. Sci.*, 44(1), 324-340.
- Ralph, P.J., M.J. Durako, S. Enriquez, C.J. Collier and M.A. Doblin. 2007. Impact of light limitation on seagrasses. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 350 (1-2): 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.017>.
- Ramírez-García P., K. Pedraza-Venegas y A. Granados-Barba, 2019. Los pastos marinos y la captura de carbono azul una razón para estudiarlos en el CASGM: 281-300. En: Granados-Barba A., L. Ortiz-Lozano, C. González-Gándara y D. Salas-Monreal (Eds). *Estudios Científicos en el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México*. Univ. Autón. Campeche. 376 p. ISBN 978-607-8444-54-0. <https://doi.org/10.26359/epomex0319>
- Ricart, A.M., P.H. York, C. Bryant, M. Rasheed, D. Lerodiaconou and P. Macreadie. 2020. High variability of Blue Carbon storage in seagrass meadows at the estuary scale. *Sci. Rep.*, 10: 5865. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62639-y>.
- Romero, J., M. Pérez, M.A. Mateo and E. Sala. 1994. The belowground organs of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* as a biogeochemical sink. *Aquat. Bot.*, 47(1): 13-19. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0304-3770(94)90044-2)
- Sánchez-Valencia, L., A. Acosta-Chaparro, J.D. González-Corredor, R. Navas-Camacho, D.I. Gómez-López y N. Bolaños. 2019. Estado de los pastos marinos en las islas de San Andrés y Providencia en 2016 y 2018. *Ser. Publ. Gen.*, 105. Invemar-Coralina.
- Serrano, O., D.I. Gómez-López, L. Sánchez-Valencia, A. Acosta-Chaparro, R. Navas-Camacho, J. González-Corredor and N. Marbà. 2021. Seagrass blue carbon stocks and sequestration rates in the Colombian Caribbean. *Scient. Rep.*, 11(1): 1-12.
- Short, F.T., L.J. McKenzie, R.G. Coles, K.P. Vidler and J.L. Gaeckle. 2008. *SeagrassNet manual for scientific monitoring of seagrass habitat*, Univ. New Hampshire Publ., ISBN: 095-797-4124.