



PRADERA

RED DE SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LAS PRADERAS DE FANERÓGAMAS MARINAS EN LA REGIÓN BIOGEOGRÁFICA ATLÁNTICA



Con el apoyo de:



INFORME TÉCNICO

"CAPACIDAD DE LAS PRADERAS CANTÁBRICAS DE *ZOSTERA NOLTEI* PARA SECUESTRAR CARBONO A CORTO PLAZO"

Informe técnico: Capacidad de las praderas Cantábricas de *Zostera noltei* para secuestrar carbono a corto plazo

Este proyecto cuenta con el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica a través de la Fundación Biodiversidad.

Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.



ÍNDICE



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA.....	2
2.1. Capacidad de secuestro de carbono de <i>Zostera noltei</i>	2
2.1.1. Muestreo.....	2
2.1.2. Procesado y análisis de muestras	4
2.1.3. Tratamiento de los datos	6
2.2. Modelo predictivo del secuestro biológico de carbono	6
2.2.1. Adquisición de imágenes.....	6
2.2.2. Índices espectrales de vegetación	7
2.2.3. Modelos predictivos del secuestro de carbono	9
2.3. Análisis de patrones espacio-temporales	10
3. RESULTADOS.....	12
3.1. Capacidad de secuestro de carbono de <i>Zostera noltei</i>	12
3.1.1. Diferencias entre componentes analizados	12
3.1.2. Diferencias entre praderas.....	14
3.2. Modelo predictivo del secuestro biológico de carbono	20
3.2.1. Análisis retrospectivo de secuestro de C_{org}	22
3.2.2. Análisis espacial de secuestro de C_{org}	29
REFERENCIAS.....	39
APÉNDICE A	Apéndice A.1



MEMORIA



1. INTRODUCCIÓN

La fanerógama marina *Zostera noltei* es una especie protegida (Hábitat 1140 según la Directiva Hábitats 92/43/CEE), que coloniza los estuarios del norte de España y que está incluida en el Catálogo Español de Especies Amenazadas (Real Decreto 139/2011).

El efecto combinado de presiones de origen natural y antrópico ha favorecido que en las últimas décadas las praderas de *Zostera noltei* de los estuarios cantábricos hayan reducido su tamaño, se hayan fragmentado, e incluso hayan desaparecido de algunas zonas.

Detener y revertir esta tendencia requiere diseñar modelos de gestión adaptativos que reconozcan el estado de conservación, reconecten las áreas fragmentadas, e identifiquen las praderas que deben ser protegidas, y las que están dañadas y necesitan ser restauradas. La hipótesis que sustenta el proyecto PRADERA es que la caracterización y vigilancia de comunidades mono-específicas puede abordarse a partir de aproximaciones combinadas de teledetección y datos *in situ*. La ventaja de la teledetección respecto otras técnicas de vigilancia, reside en su capacidad para observar grandes extensiones de forma periódica, en la homogeneidad de la toma de datos y en la gran oferta de imágenes disponibles. Esta serie de ventajas permite diseñar metodologías y protocolos para sistematizar y estandarizar el seguimiento del estado de conservación y para cuantificar cambios en la provisión de servicios ecosistémicos en zonas de alto valor ambiental.

Además de por su alto valor ecológico y de conservación, las praderas de *Z. noltei* se caracterizan por proporcionar servicios ecosistémicos que contribuyen a mejorar, entre otras, la calidad del agua, el sustento de pesquerías, la protección costera, el control de inundaciones o las oportunidades recreativas, sociales y de salud. Pero, además, las praderas actúan como sumideros de carbono, jugando un papel muy relevante en la mitigación del cambio climático. En consecuencia, cuantificar el secuestro de carbono en una selección de estuarios cantábricos e integrar dicho conocimiento científico-técnico en los futuros planes de gestión y de mitigación del cambio climático a escala regional se ha convertido en una de las prioridades del proyecto PRADERA.

El proyecto PRADERA, que da continuidad al proyecto NANO también apoyado por la Fundación Biodiversidad (<http://nano.ihcantabria.com>), tiene por objetivo actualizar el inventario, diseñar y aplicar una red de seguimiento para caracterizar y evaluar el estado de conservación y documentar los cambios espacio-temporales en los depósitos de carbono de las praderas de *Zostera noltei* (hábitat 1140) en la Región Biogeográfica Atlántica y, específicamente, en la costa cantábrica. En este marco general se engloba el objetivo específico de la Actividad A3, que es estimar la capacidad de las praderas atlánticas de *Zostera noltei* para secuestrar carbono a corto plazo (depósitos en la biomasa viva) y establecer su relación con índices espectrales obtenidos a partir de imágenes de satélite para analizar patrones espacio-temporales de secuestro de carbono, cuya metodología y principales resultados se describen en el presente informe.

2. METODOLOGÍA

La metodología describe los análisis para evaluar la capacidad de secuestro de carbono de *Zostera noltei*, el tratamiento de las imágenes de satélite para calcular los índices de vegetación y el modelo predictivo de secuestro biológico de carbono.

2.1. Capacidad de secuestro de carbono de *Zostera noltei*

2.1.1. Muestreo

Se seleccionaron un total de 10 praderas de dos zonas de la región biogeográfica Atlántica, 6 en la Bahía de Santander (Cantabria) y 4 en la Bahía de Cádiz (Cádiz) (Figura 1, Tabla 1), con el objetivo de cubrir la mayor variabilidad posible en términos de características de las praderas (densidad, homogeneidad, biomasa, etc.).



Figura 1. Praderas muestreadas en a) Cantabria (Bahía de Santander) y b) Cádiz (Bahía de Cádiz).

Pradera	Región	Lon./Lat. 30N	Fecha	Nº de muestras	Especie dominante
Somo	Cantabria	439031/4811258	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>
Pedreña	Cantabria	437455/4810737	2/07/18	7	<i>Zostera noltei</i>
Pontejos	Cantabria	434191/4806982	14/08/18	5	<i>Zostera noltei</i> y <i>Zostera marina</i>
Puntal	Cantabria	438833/4811266	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>
San Bartolomé 1	Cantabria	436902/4808122	3/07/18	3	<i>Zostera noltei</i>
San Bartolomé 2	Cantabria	436819/4808107	3/07/18	5	<i>Zostera noltei</i>
Santibañez 1	Cádiz	208550/4040935	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>
Santibañez 2	Cádiz	208601/4040940	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>
Cádiz 1	Cádiz	207631/4043080	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>
Cádiz 2	Cádiz	207524/4043162	25/09/18	5	<i>Zostera noltei</i>

Tabla 1. Praderas muestreadas, localización, fecha de muestreo, número de muestras de biomasa obtenidos por pradera y especie dominante.

La capacidad de secuestro de carbono a corto plazo de *Zostera noltei* en biomasa se midió como el contenido de C_{org} en porcentaje de peso seco y por unidad de superficie en la biomasa aérea (o biomasa foliar). De forma adicional se cuantificó el contenido en C_{org} en la biomasa subterránea viva (raíces y rizomas) de las praderas para poder evaluar la capacidad de secuestro a largo plazo. Asimismo, se estimó la relación entre los depósitos de carbono a corto plazo y a largo plazo y en algas verdes, ya que estudios previos demuestran que es difícil discernir por teledetección entre la presencia de algas verdes y de *Zostera noltei*.

En cada pradera se tomaron entre un mínimo de 3 y un máximo de 7 muestras de biomasa (Tabla 1) dentro de un área de aproximadamente 10 m de diámetro. Las muestras de biomasa se tomaron utilizando *cores* de biomasa, que consisten en tubos de PVC de diámetro conocido (10-25 cm de D) que se clavan en el sedimento de las praderas incluyendo la masa foliar, con cuidado de no cortar las hojas, hasta aproximadamente ~10-40 cm (la profundidad a la que llegan las raíces de fanerógamas marinas) y que permiten obtener muestras representativas y homogéneas de biomasa por unidad de superficie (Figura 2). En el caso de las muestras tomadas en Santander, el *core* de biomasa tenía unas dimensiones de 13 cm de D y se clavaba hasta aproximadamente 20 cm de profundidad. En el caso de las muestras tomadas en Cádiz, el *core* de biomasa tenía unas dimensiones de 20 cm de D y se clavaba hasta un máximo de 8-10 cm de profundidad. Las muestras resultantes se transfirieron directamente a una bolsa de malla y se lavaron con agua salada para eliminar todo el sedimento posible (Figura 2). Cada muestra de biomasa se guardó por separado y se almacenó a -20°C hasta su procesado.



Figura 2. Muestreo de biomasa en la Bahía de Santander. A la izquierda el core de biomasa utilizado, clavándolo hasta una profundidad de 20 cm. A la derecha, un ejemplo de muestra resultante en la bolsa de malla antes de ser lavada para eliminar sedimento.

2.1.2. Procesado y análisis de muestras

El procesado de muestras se hizo una vez descongeladas y siguiendo el protocolo descrito en Howard et al. (2014). Cada muestra se separó en diferentes submuestras representativas de los diferentes componentes: biomasa aérea o foliar, biomasa subterránea viva y muerta de *Zostera* spp., algas verdes y detritos (Figura 3).



Figura 3. Procesado de muestras en el laboratorio.

En una de las praderas muestreadas se encontró presencia de *Zostera marina* entre los haces de *Zostera noltei* (Tabla 1). Debido a que no es posible distinguir estas especies por imágenes satélite, la biomasa de ambas especies se trató de forma conjunta. La diferenciación entre biomasa subterránea viva y muerta puede ser difícil en algunos casos, especialmente en especies de pequeño porte como *Zostera noltei* (Howard et al., 2014). Siguiendo el protocolo de Howard et al. (2014), consideramos como vivas aquellas raíces y rizomas de un color más claro y más turgentes. Sin embargo, reconocemos cierta

incertidumbre en los resultados de biomasa relativos a estos dos componentes por separado. Por otro lado, consideramos como detritos la muestra remanente una vez separado el resto de componentes, formado por restos de materia orgánica no identificada o material inorgánico del sedimento (p. eg. restos de conchas, etc.). La biomasa aérea (hojas vivas) se sumergió en HCl al 10% aproximadamente 2 minutos para disolver el posible contenido en carbono inorgánico debido a epífitos carbonatados y, posteriormente, se aclaró con abundante agua dulce.

Las diferentes submuestras se pusieron a secar durante un mínimo de 72 h a 60°C. Una vez secas se colocaron en un desecador durante un mínimo de 2 horas hasta alcanzar la temperatura ambiente y se pesaron (Peso seco, PS).

El contenido en materia orgánica se midió en todas las submuestras mediante la técnica LOI (*Loss on Ignition*) o pérdida por ignición, que consiste en someter la muestra a una temperatura de 450°C durante dos horas y estimar el contenido en materia orgánica como la diferencia de peso de la muestra antes y después de la ignición (Gacia et al., 2003).

El C_{org} se midió en 5 submuestras de biomasa viva aérea (hojas), en 5 submuestras de biomasa subterránea viva (raíces y rizomas) y en 5 submuestras de algas verdes procedentes de diferentes praderas de la Bahía de Santander utilizando un analizador elemental (laboratorio IHLab BIO de IHCantabria). Para poder estimar la concentración de C_{org} en las submuestras para las que sólo se midió materia orgánica, se aplicó la ecuación resultante de hacer un análisis de regresión lineal entre la concentración de materia orgánica y la concentración de carbono orgánico en aquellas submuestras para las que sí que se midieron ambos parámetros, para *Zostera noltei* (incluyendo los valores de biomasa aérea y subterránea viva) y para algas verdes, por separado (Howard et al., 2014) (Figura 4).

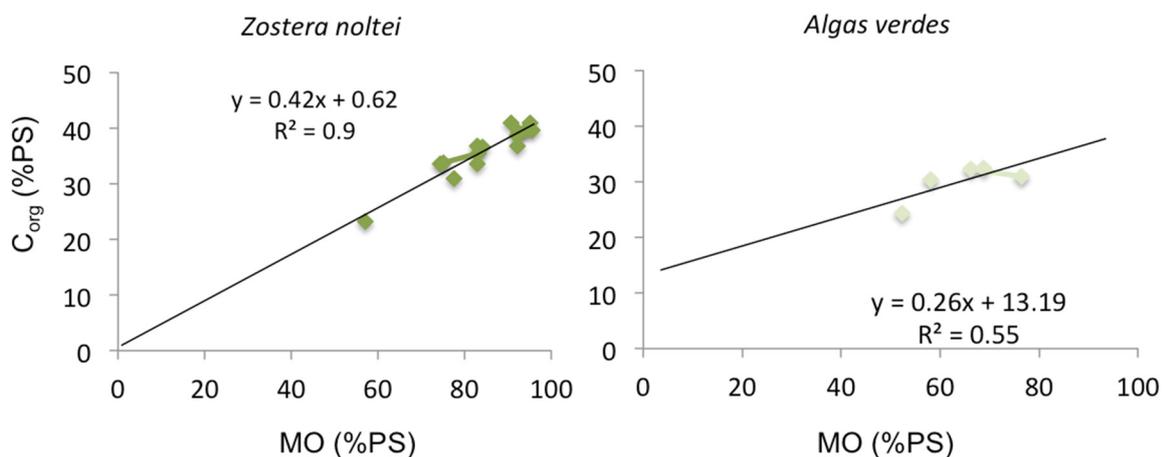


Figura 4. Relación entre la materia orgánica (%PS) medida por el método LOI y la concentración de C_{org} (%PS) medida con analizador elemental.

2.1.3. Tratamiento de los datos

Con los resultados obtenidos se estimó la biomasa por unidad de superficie (g PS cm^{-2}), la concentración de materia orgánica y de carbono orgánico tanto en porcentaje de peso seco (%PS) como en contenido en la pradera por unidad de superficie (mg MO cm^{-2} , $\text{mg C}_{\text{org}} \text{PS cm}^{-2}$), de los diferentes componentes considerados: biomasa aérea foliar, biomasa subterránea viva, biomasa subterránea muerta y algas verdes.

Para la estimación de la biomasa de cada componente por unidad de superficie para cada muestra se dividió el peso seco entre la superficie muestreada, calculada como $S_{\text{muestreada}} = \pi * r^2$, siendo "r" el radio del core de sedimento utilizado en el muestreo.

El contenido en materia orgánica y carbono orgánico por unidad de superficie para cada componente se estimó multiplicando la concentración en %PS por la biomasa por unidad de superficie.

A partir de estos datos se llevaron a cabo diferentes análisis. En primer lugar, se analizaron las diferencias entre los distintos componentes de la biomasa de las praderas (aérea, subterránea viva, subterránea muerta, algas verdes y detritos) en términos de peso seco por unidad de superficie y materia orgánica y carbono orgánico (en porcentaje de peso seco y por unidad de superficie) para todo el conjunto de praderas. En segundo lugar, se analizaron las diferencias entre praderas en términos de biomasa (mg PS cm^{-2}) y contenido en materia orgánica y carbono orgánico (%PS y mg PS m^{-2}) para los diferentes componentes de la pradera. Estas diferencias se analizaron aplicando Análisis de la Varianza (ANOVA) y el post-hoc test de Tukey-Kramer.

2.2. Modelo predictivo del secuestro biológico de carbono

El objetivo de esta tarea fue analizar si existe correlación entre los índices de vegetación y parámetros biofísicos calculados a partir de imágenes espectrales capturadas por los sensores remotos de Sentinel-2 y Landsat y el contenido en C_{org} en la biomasa foliar de praderas de *Zostera noltei* cuantificado como se describe en la sección anterior, que permitiesen desarrollar un modelo predictivo del secuestro de carbono a corto plazo con base en imágenes de satélite. Los resultados obtenidos para Landsat podrán ser de aplicación para estudios retrospectivos de secuestro de carbono mientras que los resultados de Sentinel serán de utilidad para estudios del pasado cercano y para trabajos de seguimiento en el futuro.

2.2.1. Adquisición de imágenes

Se descargaron imágenes de reflectancia superficial de Landsat-8 y Sentinel-2 correspondientes a las zonas donde se llevaron a cabo los muestreos en la Bahía de Santander y la Bahía de Cádiz y a las fechas en las que se realizaron los muestreos de campo anteriormente descritos (Tabla 2). Asimismo, se seleccionaron aquellas imágenes con ausencia de nubes y correspondientes a períodos de bajamar. Las imágenes de Landsat-7 se descartaron ya que ambas zonas de estudio se localizan en zonas defectuosas de las imágenes capturadas por el sensor de dicho satélite.

ESTUARIO	FECHA DATOS IN SITU	SATÉLITE	ORBITA	TILE	FECHA ADQUISICIÓN
Cádiz	25/09/2018	Sentinel-2B	137	29SQA	29/09/2018
Santander	2-3/07/2018	Sentinel-2B	137	30TVP	01/07/2018 *
		Landsat-8	202	30	29/06/2018
	14/08/2018	Sentinel-2A	137	30TVP	15/08/2018
	25/09/2018	Sentinel-2B	137	30TVP	29/09/2018

* Presencia de nubes

Tabla 2. Imágenes de Sentinel-2 y Landsat-8 seleccionadas para cada fecha y zona de muestreo.

2.2.2. Índices espectrales de vegetación

Se seleccionaron un total de 28 índices espectrales de vegetación para Sentinel-2 (28 índices) y Landsat (18 índices) relacionados con parámetros biofísicos asociados al almacenamiento biológico de carbono¹ (Tabla 3 y Tabla A.1). En el caso de Sentinel-2 dichos parámetros biofísicos fueron, a su vez, directamente estimados con la herramienta “L2B biophysical processor” implementada en SNAP (*Sentinel Application Platform*):

- el índice de superficie foliar (LAI: *Leaf Area Index*), que se utiliza para predecir la producción primaria fotosintética a través de la estructura y función de la cobertura vegetal.
- la fracción de cobertura vegetal (FVC: *Fraction of Vegetation Cover*) que permite estimar la cantidad de biomasa aérea y, por tanto, de carbono biológico almacenado a través de la estructura y función de la cobertura vegetal.
- el contenido de clorofila en las hojas (Cab o CCC: *Canopy Chlorophyll Content*), que es un indicador de la actividad fotosintética y, por tanto, de la productividad primaria de la vegetación. El contenido en clorofila de las hojas está directamente relacionado con la capacidad de las plantas para asimilar CO₂.
- la fracción absorbida de radiación fotosintéticamente activa (fPAR: *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) expresa la capacidad de absorción de energía de la vegetación para realizar la fotosíntesis y capturar CO₂, lo cual depende tanto de la estructura de la vegetación como de las condiciones de iluminación.

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	FACTORES
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	$(1 + L) * (\text{near_IR} - \text{red}) / (\text{near_IR} + \text{red} + L)$	L = 0.5
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index	$s * (\text{near_IR} - s * \text{red} - a) / (a * \text{near_IR} + \text{red} - a * s + X * (1 + s * s))$	s = 0.5 a = 0.5 X = 0.08
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$(1 + L) * (\text{near_IR} - \text{red}) / (\text{near_IR} + \text{red} + L)$	L = 0.5
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(\text{near_IR} - \text{red}) / (\text{near_IR} + \text{red})$	

¹ Índices seleccionados con base en los propuestos por SNAP (<http://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-2-toolbox/>), en https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts y en <https://www.indexdatabase.de/>.

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	FACTORES
MSAVI2	The second Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$(1/2) * (2 * (near_IR + 1) - \sqrt{(2 * near_IR + 1) * (2 * near_IR + 1) - 8 * (near_IR - * red) })$	
DVI	Difference Vegetation Index	$near_IR - red$	
RVI	Ratio Vegetation Index	$near_IR / red$	
PVI	Perpendicular Vegetation Index	$\sin(a) * near_IR - \cos(a) * red$	$a = 45$
IPVI	Infrared Percentage Vegetation Index	$near_IR / (near_IR + red)$	
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index	$near_IR - g * red$	$g = 0.5$
TNDVI	Transformed Normalized Difference Vegetation Index	$\sqrt{(near_IR - red) / (near_IR + red) + 0.5}$	
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$(near_IR - green) / (near_IR + green)$	
GEMI	Global Environmental Monitoring Index	$eta * (1 - 0.25 * eta) - (red - 0.125) / (1 - red)$ $eta = (2 * (near_IR * near_IR - red * red) + 1.5 * near_IR + 0.5 * red) / (near_IR + red + 0.5)$	
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(near_IR - rb) / (near_IR + rb)$ $rb = red - gamma * (blue - red)$	$blue: B2$ $gamma = 1$
NDI45	Normalized Difference Index	$(near_IR - red) / (near_IR + red)$	
MTCI	Meris Terrestrial Chlorophyll Index	$(near_IR - red2) / (red2 - red1)$	
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index	$((red2 - red1) - 0.2 * (red2 - green)) * (red2 / red1)$	
REIP	Red-Edge Inflection Point index	$700 + 40 * ((red1 + near_IR)/2 - red2) / (red3 - red2)$	
S2REP	The Sentinel-2 Red-Edge Position index	$705 + 35 * ((red1 + near_IR)/2 - red2) / (red3 - red2)$	
IRECI	Inverted Red-Edge Chlorophyll Index	$(near_IR - red1) / (red2 / red3)$	
PSSRA	Pigment Specific Simple Ratio (chlorophyll) index	$near_IR / red$	
SIPI	Structure Intensive Pigment Index	$(800nm - 445nm) / (800nm + 680nm)$	
EVI	Enhanced Vegetation Index	$2.5 * (near_IR - red) / ((near_IR + 6*red - 7.5*blue) + 1)$	
EVI2	Enhanced Vegetation Index 2	$2.4 * (near_IR - red) / (near_IR + red + 1)$	
CHL-RED-EDGE	Chlorophyll Red Edge	$([760:800] / [690:720]) ^ (-1)$	
ARI1	Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(1 / 550nm) - (1 / 700nm)$	

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	FÓRMULA	FACTORES
CI green	Chlorophyll Index Green	$(\text{near_IR} / \text{green}) - 1$	
CI red edge	Chlorophyll Index Red Edge	$(\text{near_IR} / \text{red}) - 1$	

Tabla 3. Selección de índices espectrales de vegetación para los satélites Sentinel-2 y Landsat. Las bandas correspondientes a cada satélite se muestran en el **iError! No se encuentra el origen de la referencia..**

Algunos de los índices (9 índices) fueron estimados no sólo como índices de banda ancha (*Broad-Band*) sino también como índices de banda estrecha (*Narrow-Band*) a partir de las imágenes de Sentinel-2, caracterizadas por una mayor resolución espectral que las imágenes de Landsat (ver Tabla A.1). Por ejemplo, la banda del infrarrojo cercano incluida en el índice NDVI se calculó a partir de la banda ancha 8 (767-908 nm) o de las bandas estrechas 8a (848-881 nm) y 7 (768-796 nm) de Sentinel-2.

Por otro lado, también se seleccionaron las bandas 2-8 y 8a del satélite Sentinel-2, las bandas 2-5 de Landsat-8 y las bandas 1-4 de Landsat-5 y Landsat-7 como potenciales variables predictoras del secuestro biológico de carbono.

El valor de las bandas, índices y parámetros biofísicos previamente seleccionados se obtuvo para cada punto y fecha de muestreo a través de las imágenes previamente descargadas. Concretamente, se estimaron dichos valores como:

- el valor exacto en el pixel correspondiente al punto de muestreo (superficie de 10x10 metros en Sentinel-2 y de 30x30 metros en Landsat).
- el valor promediado en una superficie de 3x3 pixeles en torno al punto exacto de muestreo (superficie de 30x30 m en Sentinel-2 y de 90x90 metros en Landsat).

2.2.3. Modelos predictivos del secuestro de carbono

Existen dos aproximaciones:

- Modelos univariantes en los que se considera una única variable predictora (p. ej. análisis de correlación y análisis de la regresión).
- Modelos multivariantes en los que se considera más de una variable predictora.

En este estudio, debido a la limitación de datos para la generación de los modelos, se optó por desarrollar modelos univariantes capaces de estimar la capacidad de secuestro de carbono a través de imágenes de satélite.

El primer paso para el desarrollo de los modelos predictivos de secuestro de carbono a corto plazo (biomasa foliar) fue identificar los índices de vegetación más adecuados para predecir el secuestro de C_{org} tanto a partir de imágenes espectrales obtenidas por los sensores remotos de Landsat (aplicable para el análisis retrospectivo) y Sentinel-2 (aplicable al estudio del pasado cercano, así como para estudios de seguimiento futuro). De todos los posibles índices de vegetación y parámetros calculados con Sentinel-2 (43) y Landsat (18) se escogieron dos por cada uno, de acuerdo con los siguientes criterios:

- El índice debía mostrar una correlación significativa alta con el contenido en C_{org} en biomasa foliar (tanto como peso seco como por unidad de superficie) para las praderas examinadas, pero no mostrar una correlación significativa con el contenido en C_{org} en algas verdes.

- La correlación entre el índice de vegetación y el contenido en C_{org} debía ser lineal.

Para ello, el primer paso fue evaluar la correlación entre todos los índices de vegetación calculados con cada uno de los satélites a su máxima resolución (10*10 m para Sentinel-2 y 30*30 m para Landsat) y el contenido en C_{org} , tanto como porcentaje de peso seco (%PS) como por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$), para la biomasa aérea de *Zostera spp.* y para las algas verdes de las praderas examinadas. Estas correlaciones (un total de 244) se evaluaron mediante un análisis de correlación de Pearson utilizando el paquete *Hmisc* del programa R Studio (Versión 1.1.463).

Una vez elegidos los índices, el modelo predictivo para cada uno de ellos se estableció ajustando la relación índice vs. variable de secuestro de carbono a una ecuación lineal por medio de un análisis de regresión lineal utilizando el programa JMP 10.0.0.

2.3. Análisis de patrones espacio-temporales

Los modelos predictivos desarrollados con los 2 índices espectrales elegidos para Landsat se aplicaron a la evaluación del cambio en el secuestro de C_{org} en biomasa foliar por unidad de superficie entre los años 1985 y 2015 (análisis retrospectivo), para las praderas marinas de *Zostera noltei* de tres estuarios de la región biogeográfica Atlántica: Camariñas, en Asturias y Tina Menor y Bahía de Santander, en Cantabria. Para ello se utilizaron imágenes de satélite obtenidas con Landsat (Tabla 4) para los meses de verano (Junio-Septiembre) y la cartografía de *Zostera noltei* para estos estuarios generada en el proyecto NANO.

ESTUARIO	FECHA	SATÉLITE	SENSOR	PASE
Bahía de Santander	26/09/1984	Landsat 5	L5 TM	202/30
Bahía de Santander	15/08/1989	Landsat 4	L4 TM	202/30
Bahía de Santander	10/08/1990	Landsat 5	L5 TM	202/30
Bahía de Santander	28/09/1999	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Bahía de Santander	14/09/2000	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Bahía de Santander	15/09/2003	Landsat 5	L5 TM	202/30
Bahía de Santander	10/09/2007	Landsat 5	L5 TM	202/30
Bahía de Santander	23/09/2009	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Bahía de Santander	04/08/2011	Landsat 5	L5 TM	202/30
Bahía de Santander	15/09/2012	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Bahía de Santander	08/07/2013	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Bahía de Santander	27/07/2014	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Bahía de Santander	14/07/2015	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Tina Menor	26/09/1984	Landsat 5	L5 TM	202/30
Tina Menor	15/08/1989	Landsat 4	L4 TM	202/30
Tina Menor	10/08/1990	Landsat 5	L5 TM	202/30
Tina Menor	28/09/1999	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Tina Menor	14/09/2000	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Tina Menor	15/09/2003	Landsat 5	L5 TM	202/30
Tina Menor	10/09/2007	Landsat 5	L5 TM	202/30
Tina Menor	23/09/2009	Landsat 7	L7 ETM+	202/30

ESTUARIO	FECHA	SATÉLITE	SENSOR	PASE
Tina Menor	04/08/2011	Landsat 5	L5 TM	202/30
Tina Menor	15/09/2012	Landsat 7	L7 ETM+	202/30
Tina Menor	08/07/2013	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Tina Menor	27/07/2014	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Tina Menor	14/07/2015	Landsat 8	L8 OLI	202/30
Camariñas	15/09/1984	Landsat 5	L5 TM	205/30
Camariñas	15/06/2000	Landsat 7	L7 ETM+	205/30
Camariñas	18/06/2001	Landsat 7	L7 ETM+	205/30
Camariñas	25/07/2002	Landsat 7	L7 ETM+	205/30
Camariñas	16/06/2009	Landsat 5	L5 TM	205/30
Camariñas	03/06/2010	Landsat 5	L5 TM	205/30
Camariñas	14/08/2013	Landsat 8	L8 OLI	205/30
Camariñas	14/06/2014	Landsat 8	L8 OLI	205/30
Camariñas	20/08/2015	Landsat 8	L8 OLI	205/30

Tabla 4. Imágenes de Landsat utilizadas para el análisis retrospectivo de C_{org} secuestrado en biomasa foliar de *Zostera noltei* para los estuarios de estudio seleccionados para el análisis retrospectivo.

Para cada una de estas imágenes se calcularon los dos índices espectrales elegidos para Landsat para píxeles de 30 * 30 m de resolución. El contenido en C_{org} de las praderas por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$) se estimó para cada uno de esos píxeles aplicando los dos modelos predictivos desarrollados.

Los modelos predictivos con los 2 índices espectrales elegidos para Sentinel-2 se aplicaron a la evaluación relativa del C_{org} secuestrado en biomasa foliar (año 2018) para las praderas de 4 estuarios de la región biogeográfica Atlántica: Camariñas (Galicia), Tina Menor y Bahía de Santander (Cantabria) y Bahía de Cádiz (Cádiz). Para ello, se utilizaron imágenes de satélite obtenidas con Sentinel-2 en Julio de 2018 (Tabla 5) y la cartografía de *Zostera noltei* para este mismo año. Para la imagen satélite de cada estuario se calcularon los dos índices espectrales elegidos para Sentinel-2 para píxeles de 10 * 10 m de resolución. El contenido en C_{org} de las praderas por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$) se estimó para cada píxel aplicando los dos modelos predictivos desarrollados.

ESTUARIO	FECHA	SATÉLITE	ORBITA	TILE
Bahía de Cádiz	15/08/2018	2A	137	29SQA
Tina Menor	15/08/2018	2A	137	30TUP
Bahía de Santander	20/08/2018	2B	137	30TVP
Camariñas	11/08/2018	2A	80	29TMH

Tabla 5. Imágenes de Sentinel-2 utilizadas para el análisis relativo de C_{org} secuestrado en biomasa foliar de *Zostera noltei* en la actualidad para los estuarios de estudio seleccionados.

3. RESULTADOS

Los resultados presentan la capacidad de secuestro de carbono de las praderas de la Bahía de Santander, el cálculo de los índices de vegetación con Landsat y Sentinel en la Bahía de Santander y la Bahía de Cádiz y la aplicación del modelo a 4 estuarios de la región biogeográfica atlántica.

3.1. Capacidad de secuestro de carbono de *Zostera noltei*

3.1.1. Diferencias entre componentes analizados

Considerando las muestras de todas las praderas, la mayor biomasa por unidad de superficie medida corresponde a los detritos (85.64 ± 20.27 mg PS cm^{-2}), lo cual se explica por el elevado contenido en conchas y otros restos inorgánicos del sedimento difíciles de separar durante el procesamiento de muestras. El resto de componentes no mostraron diferencias significativas en cuanto a la biomasa (Figura 5, Tabla A.2). La concentración media de materia orgánica fue significativamente mayor en la biomasa aérea (74.2 ± 3.18 %PS) y en la biomasa subterránea muerta (70.66 ± 2.22 %PS), seguida de las algas verdes (60.38 ± 3.35 %PS) y de la biomasa subterránea viva (49.71 ± 4.33 %PS), mientras que el contenido en materia orgánica fue significativamente menor en detritos (5.67 ± 0.9 %PS). Sin embargo, el contenido en materia orgánica por unidad de superficie fue significativamente mayor en la biomasa subterránea viva (6.21 ± 0.88 mg MO cm^{-2}) seguido de la bioma aérea (4.2 ± 0.36 mg MO cm^{-2}) y de los detritos (4.16 ± 0.81 mg MO cm^{-2}), mientras que el menor contenido se encontró para el componente de algas verdes de las muestras (1.25 ± 0.27 mg MO cm^{-2}) (Figura 5, Tabla A.2).

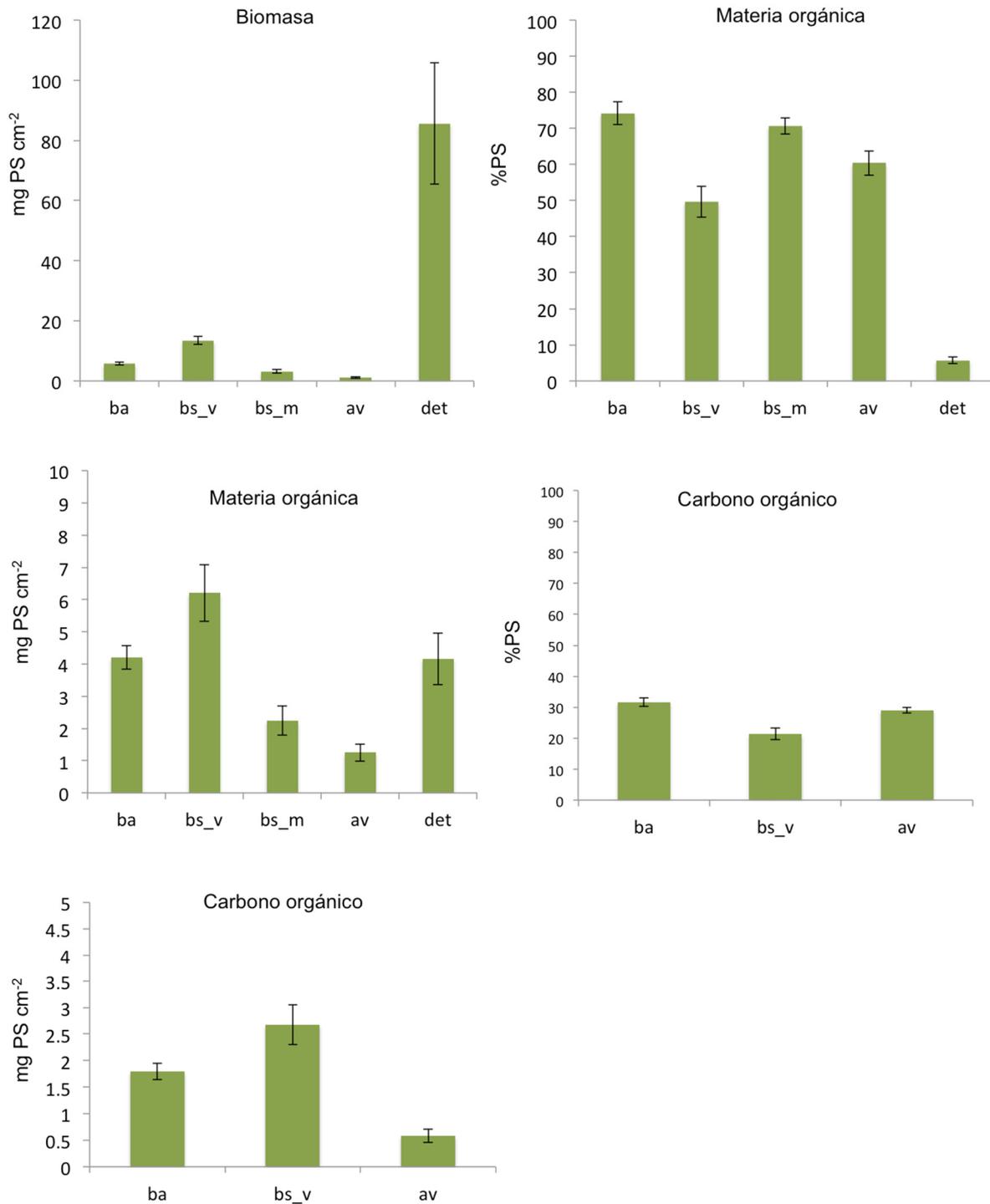


Figura 5. Biomasa (mg PS cm⁻²), contenido en materia orgánica (MO) y en carbono orgánico (C_{org}) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg PS cm⁻²) para cada uno de los componentes de las muestras considerados para el conjunto de las praderas (ba=biomasa aérea, bs_v= biomasa subterránea viva; bs_m=biomasa subterránea muerta; av=algas verdes; det= detritos).

En cuanto al contenido en carbono orgánico para los componentes en los que se midió, la mayor concentración se encontró en la biomasa aérea (31.61 ± 1.33 %PS) y en las algas verdes (29.02 ± 0.89 %PS). Sin embargo, el mayor contenido en carbono orgánico por unidad de superficie se encontró para la biomasa subterránea viva (2.67 ± 0.37 mg C_{org} cm⁻²) seguida de la biomasa aérea (1.8 ± 0.15 mg C_{org} cm⁻²) y de las algas verdes (0.58 ± 0.12 mg C_{org} cm⁻²) (Figura 5, Tabla A.2).

3.1.2. Diferencias entre praderas

Las praderas muestreadas mostraron diferencias significativas tanto en biomasa de *Zostera noltei* como de algas verdes, así como en el contenido en materia orgánica y carbono orgánico para los diferentes componentes analizados. A continuación, se describen los resultados encontrados para la biomasa aérea o foliar, biomasa subterránea viva y muerta de *Zostera spp.* y para algas verdes.

3.1.2.1. Biomasa aérea o foliar

Las praderas con mayor biomasa foliar fueron dos de las praderas muestreadas en Cádiz, Cádiz_1 (9.18 ± 0.66 mg PS cm⁻²) y Santibañez_1 (8.65 ± 1.11 mg PS cm⁻²). Las praderas con menor biomasa foliar fueron las praderas de Somo, San Bartolomé_2 y las otras dos praderas de Cádiz con valores entre 2.25 ± 0.1 y 3.43 ± 0.51 mg PS cm⁻² (Figura 6, Tabla A.3).

El contenido foliar de materia orgánica (MO) tanto en porcentaje de peso seco (%PS) como por superficie (mg cm⁻²) también mostró diferencias significativas entre praderas. La concentración de MO en las hojas fue significativamente mayor en las praderas muestreadas en Santander (87-95 %PS) comparado con las praderas muestreadas en Cádiz (43-56 %PS), siendo las praderas de Somo y el Puntal las que mostraron una mayor concentración de MO en las hojas (94.71 ± 0.46 y 94.03 ± 0.68 %PS respectivamente) (Figura 6, Tabla A.3).

La pradera del Puntal también mostró un mayor contenido foliar de MO por unidad de superficie (7.47 ± 0.68 mg C_{org} cm⁻²), mientras que el menor contenido fue encontrado para las praderas de Somo, Cádiz_2 y Santibañez_2 ($3-1$ mg C_{org} cm⁻²). En el caso del contenido de MO por unidad de superficie, no se observa una diferencia significativa entre las praderas de Santander y las de Cádiz, ya que las praderas de Cádiz_1 y Santibañez_1 mostraron un contenido en MO (4.05 ± 0.43 y 3.67 ± 0.68 mg MO cm⁻², respectivamente) similar al de otras praderas de Santander ($6.9 - 3.2$ mg MO cm⁻²) (Figura 6, Tabla A.3).

La concentración de C_{org} en las hojas de las praderas analizadas varió entre 40 ± 0.28 y 37.07 ± 0.47 %PS en las praderas de Santander y un 24.62 ± 0.84 y 18.43 ± 2.12 %PS en las praderas de Cádiz. El contenido por unidad de superficie osciló entre un máximo de entre 3.17 ± 0.29 y 2.85 ± 0.58 mg C_{org} cm⁻² en las praderas del Puntal, Pedreña y Pontejos y un mínimo de 0.55 ± 0.03 y 0.58 ± 0.02 mg C_{org} cm⁻² en las praderas Santibañez 2 y Cádiz 2, respectivamente (Figura 6, Tabla A.3).

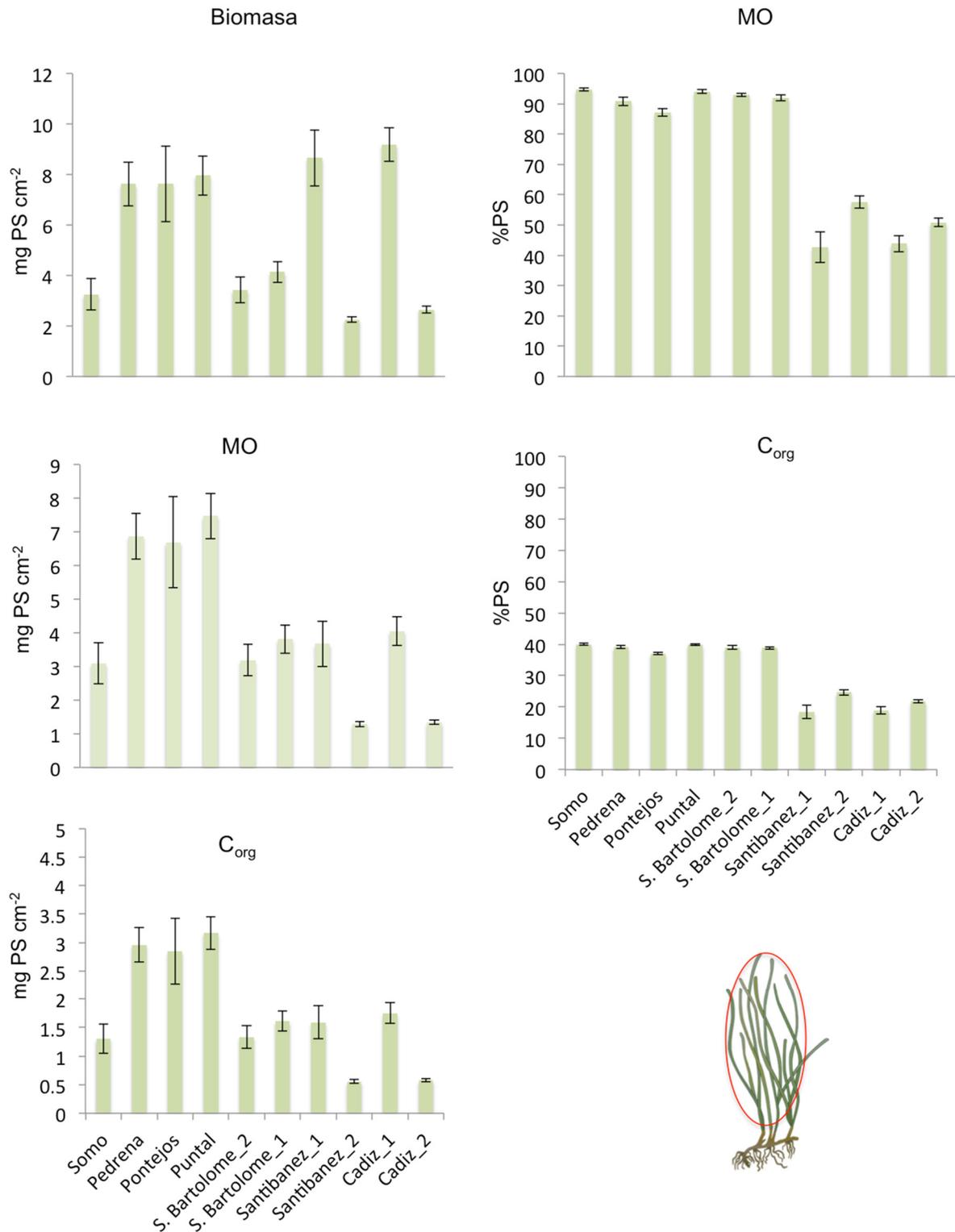


Figura 6. Biomasa (mg PS cm⁻²) y contenido en materia orgánica (MO) y en carbono orgánico (C_{org}) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg cm⁻²) para el componente foliar de las praderas examinadas.

3.1.2.2. Biomasa subterránea viva

Las praderas con mayor biomasa subterránea viva fueron el Puntal (27.65 ± 7.16 mg PS cm^{-2}) y Santibañez_1 (26.21 ± 4.41 mg PS cm^{-2}) seguidas de Pedreña (17.92 ± 1.87 mg PS cm^{-2}). El resto de praderas mostraron una biomasa subterránea viva significativamente menor ($11.5 - 6.4$ mg PS cm^{-2}) (Figura 7, Tabla A.4)

La concentración de materia orgánica en biomasa subterránea viva fue significativamente mayor en las praderas de la bahía de Santander (81– 62 %PS) que en las de Cádiz (21%PS y 7%PS), de forma similar a la que se observó para la biomasa foliar viva. Sin embargo, el contenido en materia orgánica en raíces y rizomas vivos por unidad de superficie fue significativamente mayor para las praderas del Puntal y Pedreña (17.59 ± 4.89 y 13.99 ± 1.66 mg MO cm^{-2} respectivamente), ambas dentro de la bahía de Santander comparado al resto de praderas ($7.1-1.4$ mg MO cm^{-2}) (Figura 7, Tabla A.4).

De forma similar a lo observado para la materia orgánica, la concentración de carbono orgánico en biomasa subterránea viva fue significativamente mayor para las praderas de Santander (34.4-28.6 %) que para las praderas de Cádiz (9.32-3.6 %PS). El contenido de carbono orgánico por unidad de superficie fue significativamente mayor en las praderas del Puntal (7.51 ± 2.09 mg C_{org} cm^{-2}), seguida de Pedreña (5.95 ± 0.7 mg C_{org} cm^{-2}) comparado con el resto de praderas tanto de la Bahía de Santander como de Cádiz ($3.0-0.7$ mg C_{org} cm^{-2}) (Figura 7, Tabla A.4).

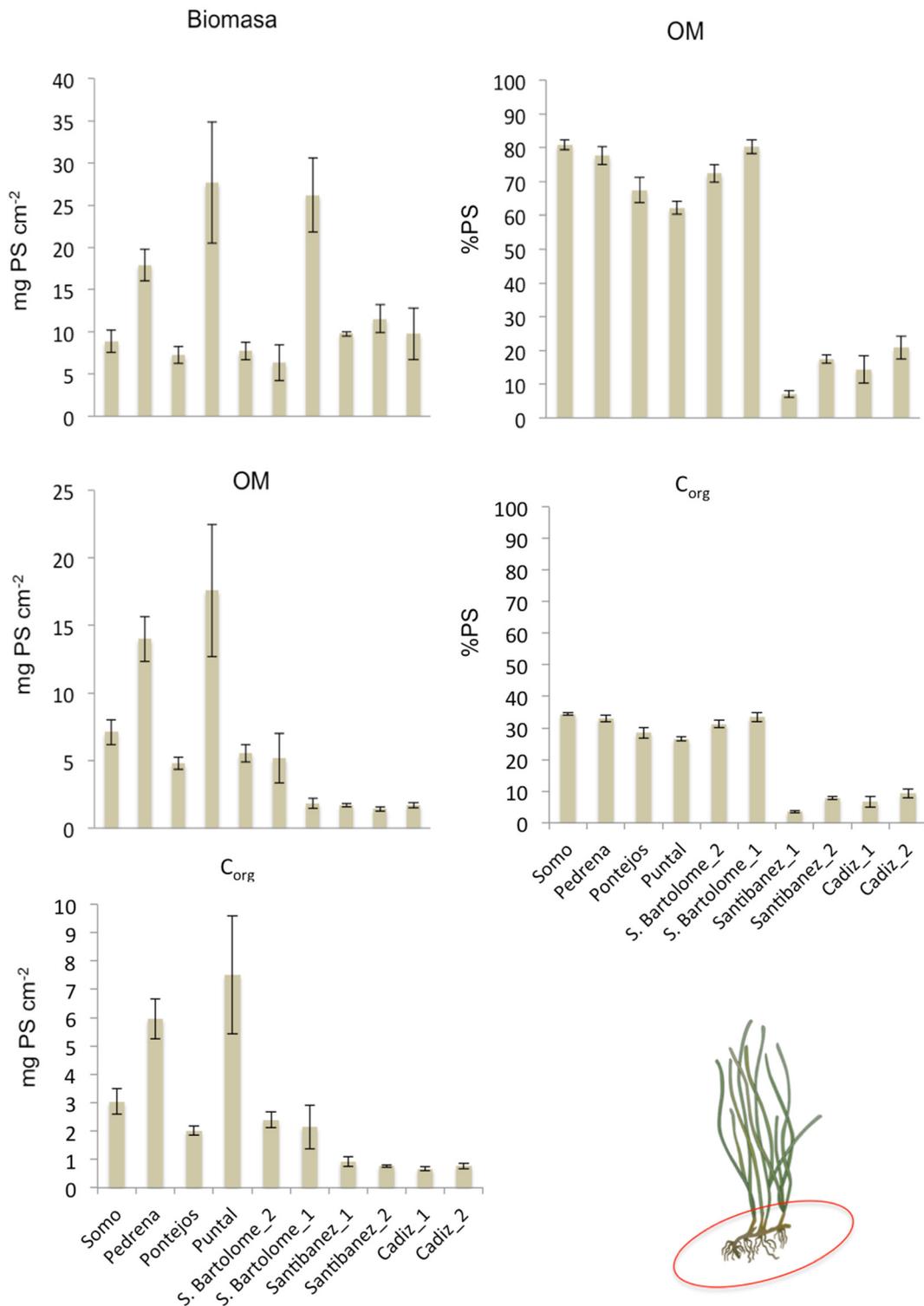


Figura 7. Biomasa (mg PS cm⁻²) y contenido en materia orgánica (MO) y en carbono orgánico (C_{org}) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg cm⁻²) de la biomasa subterránea viva de las praderas examinadas.

3.1.2.3. Biomasa subterránea muerta

La pradera con una mayor biomasa subterránea muerta fue Pedreña (12.28 ± 1.01 mg PS cm^{-2}), mientras que la menor biomasa subterránea muerta se encontró en las praderas de Cádiz ($0.32 - 0.66$) (Figura 8, Tabla A.5).

La concentración de materia orgánica (%PS) en raíces y rizomas muertos no fue significativamente diferente entre praderas (Figura 8, Tabla A.5) variando entre 59.84 ± 9.95 y 78.9 ± 1.78 %PS. El mayor contenido en materia orgánica por unidad de superficie en biomasa subterránea muerta se encontró en la pradera de Pedreña (9.16 ± 0.77 mg MO cm^{-2}) y el menor en dos de las praderas de Cádiz, Santibanez_2 (0.43 ± 0.13 mg MO cm^{-2}) y Cadiz_2 (0.23 ± 0.13) (Figura 8, Tabla A.5).

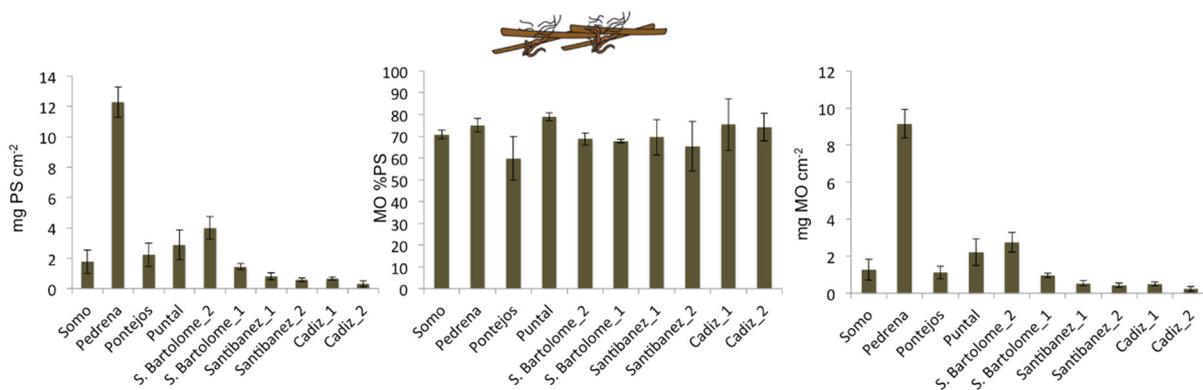


Figura 8. Biomasa (mg PS cm^{-2}) y contenido en materia orgánica (MO) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg cm^{-2}) de la biomasa subterránea muerta de las praderas examinadas.

3.1.2.4. Algas verdes

Las únicas praderas donde se encontró presencia de algas verdes fueron las praderas de Santander. Entre estas, la mayor biomasa de algas verdes se encontró en San Bartolomé_2 (44.74 ± 0.51 mg PS cm^{-2}) mientras que la pradera con menor biomasa de algas verdes fue Pedreña (0.27 ± 0.08 mg PS cm^{-2}) (Figura 9, Tabla A.6).

La concentración de materia orgánica en algas verdes en las praderas de Santander varió desde un 74.37 ± 1.05 %PS en Pontejos a un 50.33 ± 4.09 %PS en Pedreña, pero estas diferencias no fueron significativas. El contenido en materia orgánica en algas verdes por unidad de superficie fue significativamente mayor en la pradera de San Bartolomé_2 (2.92 ± 0.3 mg MO cm^{-2}) seguida de Somo (2.13 ± 0.8 mg MO cm^{-2}), mientras que el menor contenido se encontró en las praderas de Pedreña (0.12 ± 0.02 mg MO cm^{-2}) (Figura 9, Tabla A.6).

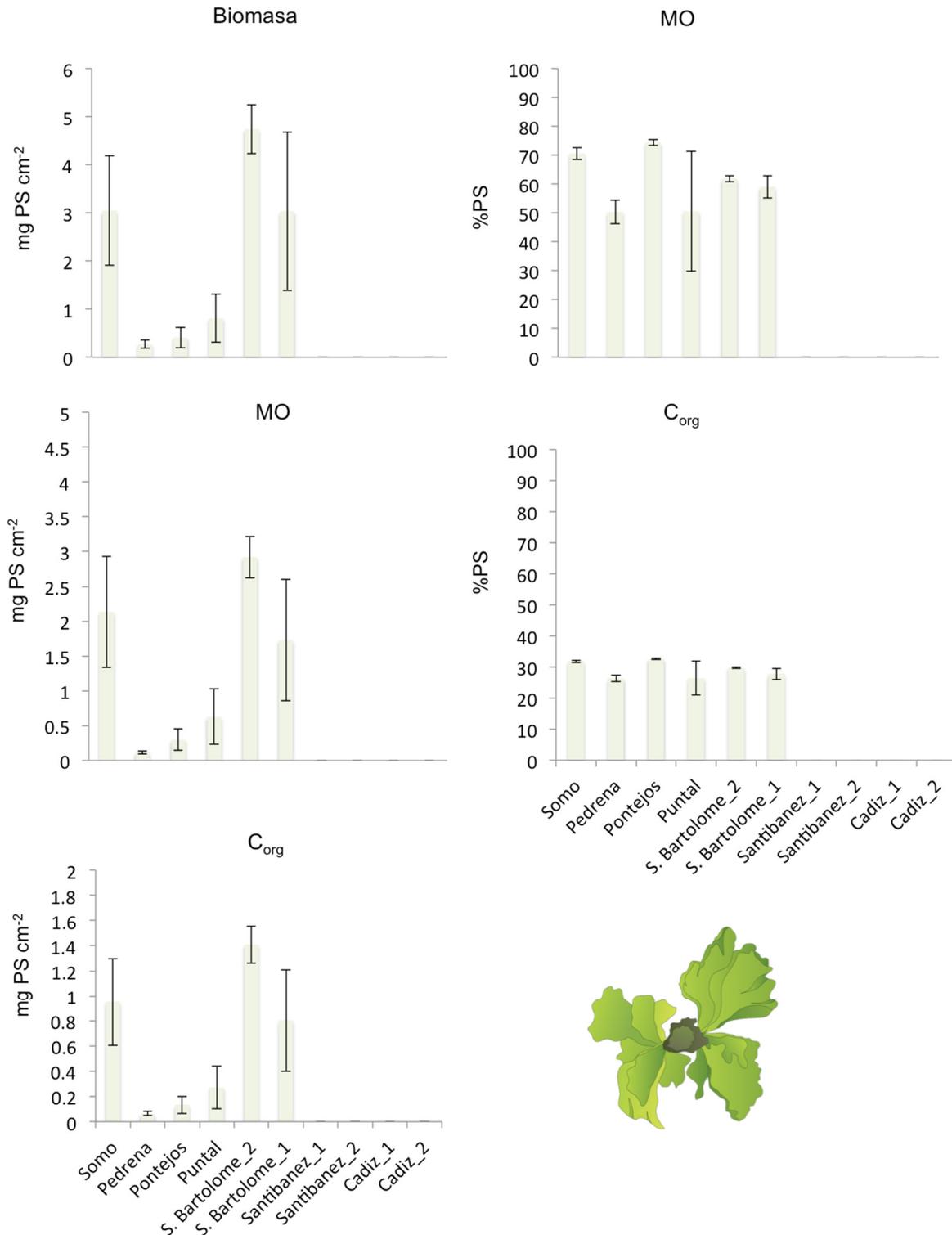


Figura 9. Biomasa (mg PS cm⁻²) y contenido en materia orgánica (MO) y en carbono orgánico (C_{org}) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg cm⁻²) en algas verdes presentes en las praderas muestreadas.

Tampoco se encontraron diferencias significativas en la concentración de carbono orgánico en algas verdes de las praderas muestreadas (32.7-24.4 %PS). Sin embargo, el contenido en C_{org} en algas verdes por unidad de superficie sí que resultó significativamente distinto entre praderas, siendo mayor en San Bartolomé_2 ($1.41 \pm 0.15 \text{ mg } C_{org} \text{ cm}^{-2}$) y menor en Pedreña ($0.07 \pm 0.02 \text{ mg } C_{org} \text{ cm}^{-2}$) (Figura 8, Tabla A.5) (Figura 9, Tabla A.6).

3.2. Modelo predictivo del secuestro biológico de carbono

El valor de los índices y parámetros biofísicos para cada punto y fecha de muestreo estimados a partir de imágenes obtenidas con Landsat y Sentinel-2 se presentan en la Tabla A.7 y Tabla A.8, respectivamente.

El resultado de los análisis de correlación entre los índices de vegetación y parámetros biofísicos y el contenido en C_{org} para biomasa aérea y algas verdes se presentan en la Tabla A.9, Tabla A.10, Tabla A.11, Tabla A.12, Tabla A.13, Tabla A.14, Tabla A.15 y Tabla A.16.

Siguiendo los criterios de selección descritos en el apartado de metodología, los índices seleccionados para establecer los modelos predictivos fueron GNDVI y ARVI para imágenes obtenidas con Landsat y RVI y ARVI para imágenes obtenidas con Sentinel-2 (Tabla 6).

Satélite	Índice
Landsat	GNDVI
	ARVI
Sentinel-2	RVI
	ARVI

Tabla 6. Índices de vegetación elegidos para establecer los modelos predictivos de secuestro de C_{org} en biomasa aérea de *Zostera spp.* para imágenes espectrales obtenidas por los sensores remotos de Landsat y Sentinel-2.

La relación significativa entre estos índices y las variables de secuestro de C_{org} en biomasa aérea de praderas marinas (Figura 10 y Figura 11) se analizó mediante un análisis de regresión lineal cuyos resultados se muestran en la Tabla 7. Según este análisis, los índices de vegetación obtenidos por ambos satélites explican mejor la varianza entre praderas en términos de contenido en carbono por peso seco (C_{org} %PS) ($R^2= 0.35 -0.85$) que por unidad de superficie ($\text{mg } C_{org} \text{ cm}^{-2}$; $R^2= 0.21-0.31$). Sin embargo, el contenido en C_{org} por unidad de superficie refleja mejor el C_{org} secuestrado en la pradera, ya que no sólo considera la concentración de C_{org} en las hojas si no también la biomasa foliar de la pradera. Por ello, los modelos predictivos elegidos para llevar a cabo el análisis retrospectivo y espacial de secuestro de C_{org} (apartado siguiente) corresponden a las ecuaciones lineales obtenidas con el análisis de regresión lineal entre los índices de vegetación y el contenido en C_{org} por unidad de superficie ($\text{mg } C_{org} \text{ cm}^{-2}$).

Satélite	Análisis de regresión	Modelo	R ²	p
Landsat	GNDVI vs. C _{org} %PS	C _{org} %PS = 32.41 + 15.51*GNDVI	0.68	<0.0001
	GNDVI vs. mg C _{org} cm ⁻²	mg C _{org} cm ⁻² = 1.85 + 1.011*GNDVI	0.21	<0.001
	ARVI vs. C _{org} %PS	C _{org} %PS = 32.46 + 21.14*ARVI	0.85	<0.0001
	ARVI vs. mg C _{org} cm ⁻²	mg C _{org} cm ⁻² = 1.84 + 1.20*ARVI	0.2	0.001
Sentinel-2	RVI vs. C _{org} %PS	C _{org} %PS = 9.90+ 11.09*RVI	0.5	<0.0001
	RVI vs. mg C _{org} cm ⁻²	mg C _{org} cm ⁻² = -0.19 + 1.01*RVI	0.31	<0.0001
	ARVI vs. C _{org} %PS	C _{org} %PS = 25.56+ 27.56*ARVI	0.35	<0.0001
	ARVI vs. mg C _{org} cm ⁻²	mg C _{org} cm ⁻² = 1.23 + 2.59*ARVI	0.23	0.0005

Tabla 7. Resultados de los análisis de regresión lineal entre los índices espectrales elegidos para cada satélite y las variables de secuestro de carbono (C_{org} %PS, mg C_{org} cm⁻²). Las ecuaciones resultantes del ajuste lineal constituyen los modelos predictivos de secuestro de C_{org}.

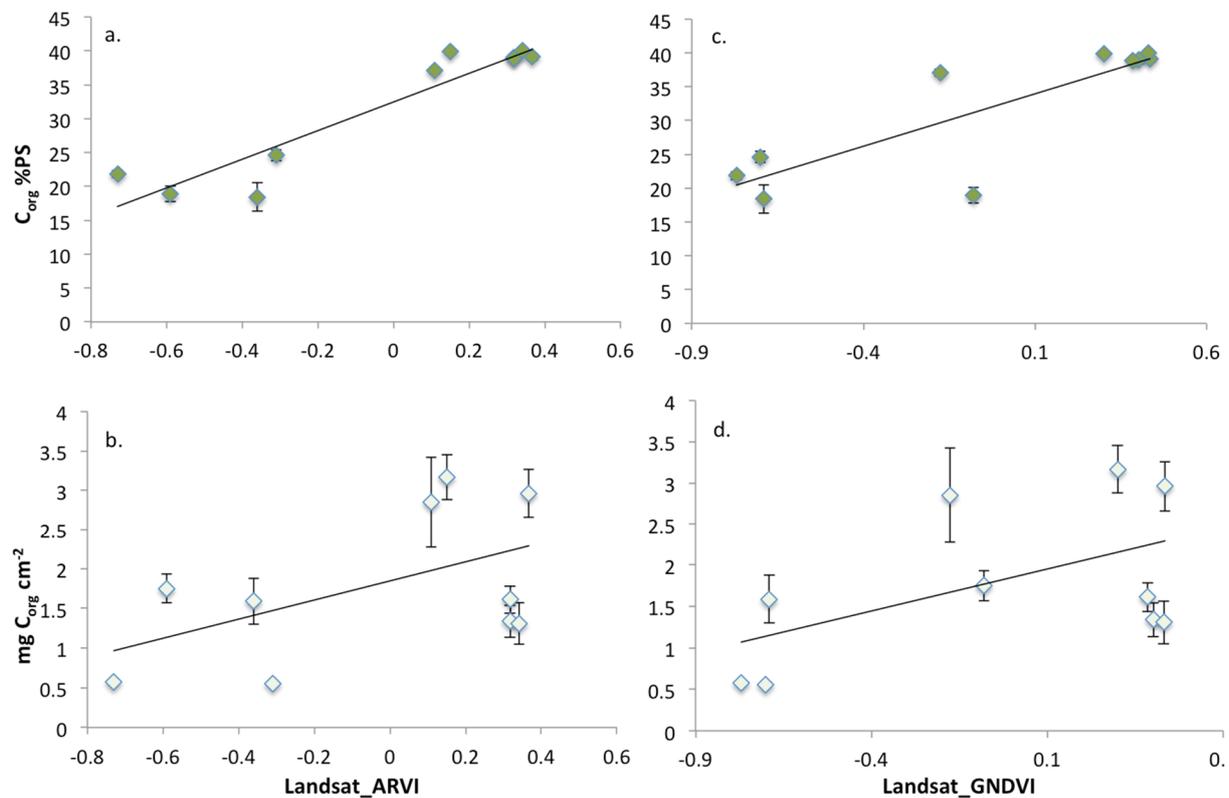


Figura 10. Relación entre los índices de vegetación elegidos para Landsat y el contenido de C_{org} en porcentaje de peso seco (a, c) y por unidad de superficie (b, d) (media ± error estándar). Las líneas representan el ajuste a las ecuaciones lineales obtenidas por medio de los análisis de regresión (Tabla 7).

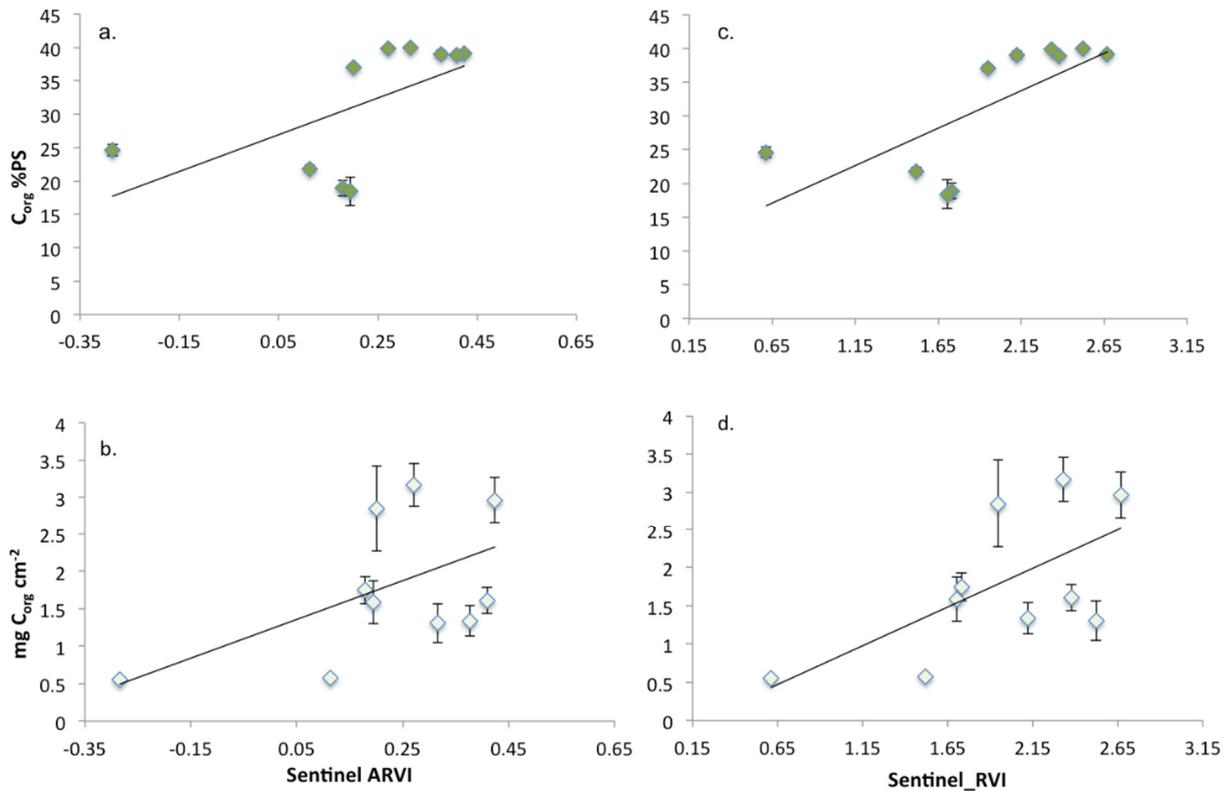


Figura 11. Relación entre los índices de vegetación elegidos para Sentinel-2 y el contenido de C_{org} en porcentaje de peso seco (a, c) y por unidad de superficie (b, d) (media \pm error estándar). Las líneas representan el ajuste a las ecuaciones lineales obtenidas por medio de los análisis de regresión (Tabla 7).

En concreto, los modelos predictivos desarrollados a partir de los índices obtenidos con Landsat (GNDVI y ARVI) serán aplicados para la estima del C_{org} secuestrado en praderas de *Zostera noltei* a partir de imágenes de satélite pasadas (análisis retrospectivo), mientras que los modelos predictivos desarrollados a partir de los índices obtenidos con Sentinel-2 (RVI y ARVI) se aplicarán al análisis relativo del C_{org} secuestrado en praderas en el presente (análisis espacial). Sin embargo, los resultados de la aplicación de estos modelos hay que considerarlos con cautela (o como una primera aproximación), debido al bajo poder predictor de los modelos ($R^2=0.21-0.31$).

3.2.1. Análisis retrospectivo de secuestro de C_{org}

A continuación se muestra el cambio estimado en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie en praderas de *Zostera noltei* para los años 1984-2015, aplicando los modelos predictivos desarrollados para los índices espectrales GNDVI y ARVI calculados con Landsat a una resolución de 30*30 m, para los tres estuarios de la región Atlántica seleccionados: Camariñas (Figura 12, Figura 13), Tina Menor (Figura 14, Figura 15), Bahía de Santander (Figura 16, Figura 17) y Bahía de Cádiz (Figuras 6.18 y 6.19). Estos resultados hay que considerarlos como una primera aproximación, debido al bajo poder predictor de los modelos (Tabla 7; $R^2=0.21$).

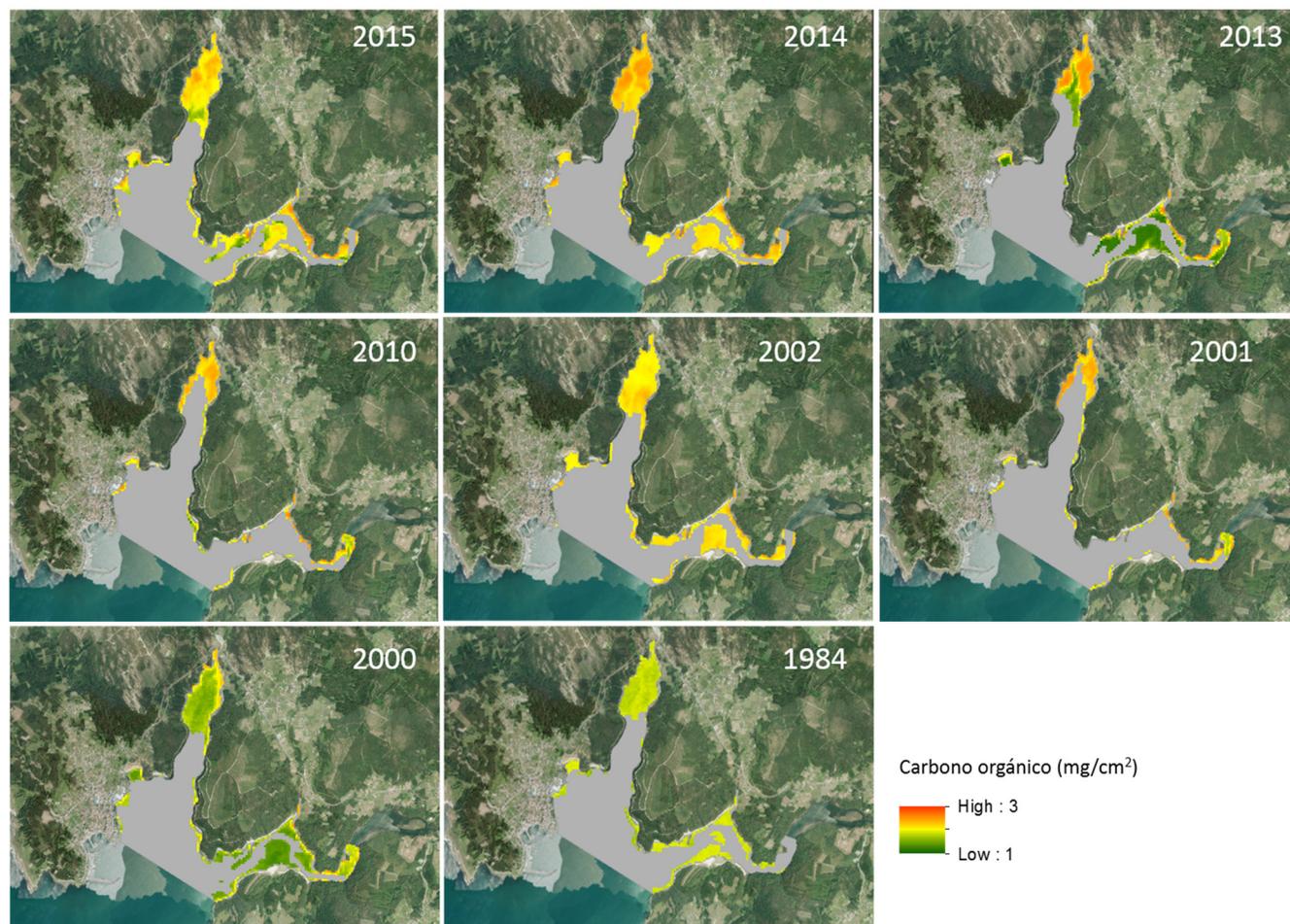


Figura 12. Evolución en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en el estuario de Camariñas estimado en base al índice GNDVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.85 + 1.011 * GNDVI$.

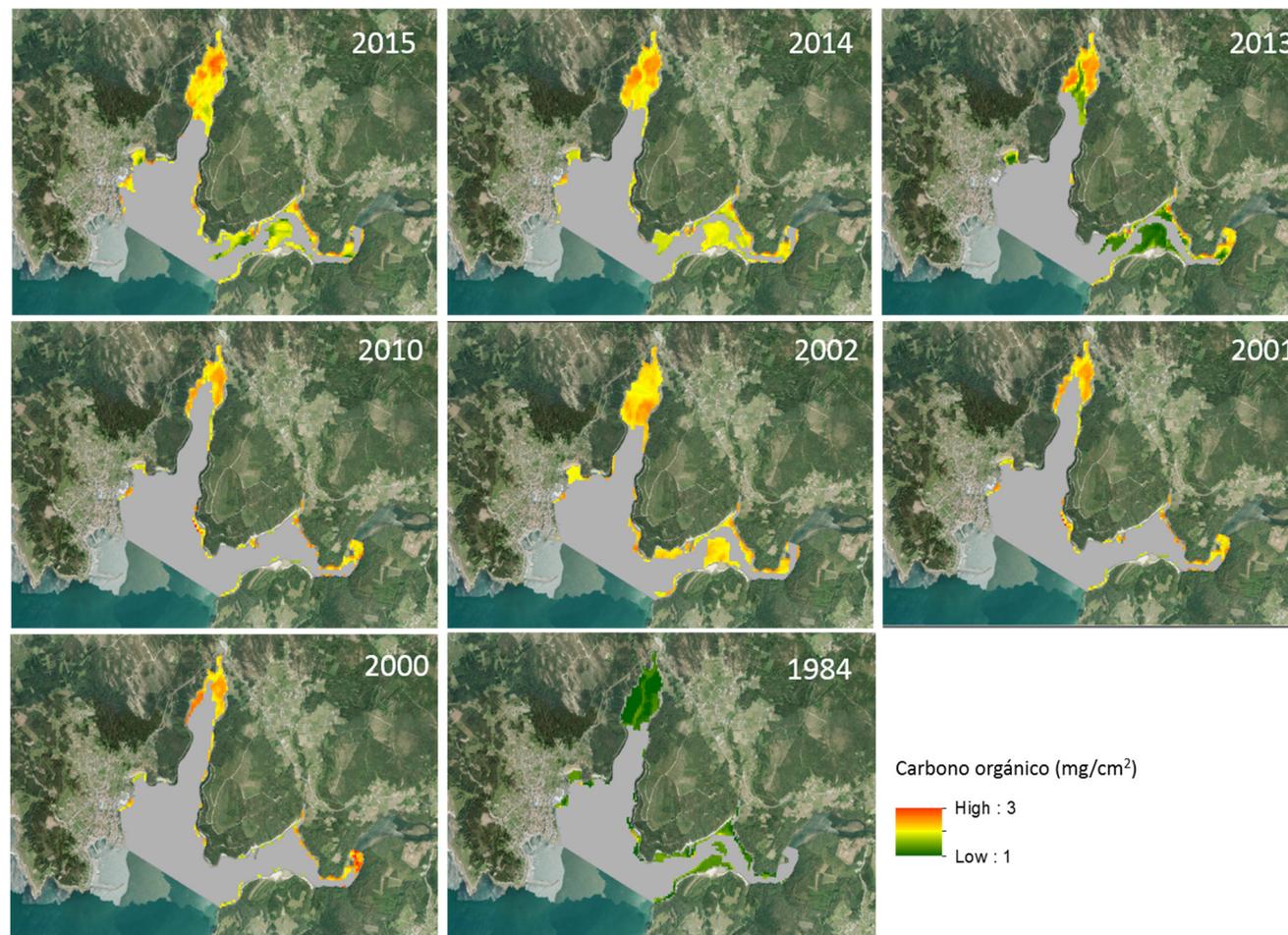


Figura 13. Evolución en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en el estuario de Camariñas estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $mg C_{org} cm^{-2} = 1.84 + 1.20 \cdot ARVI$.

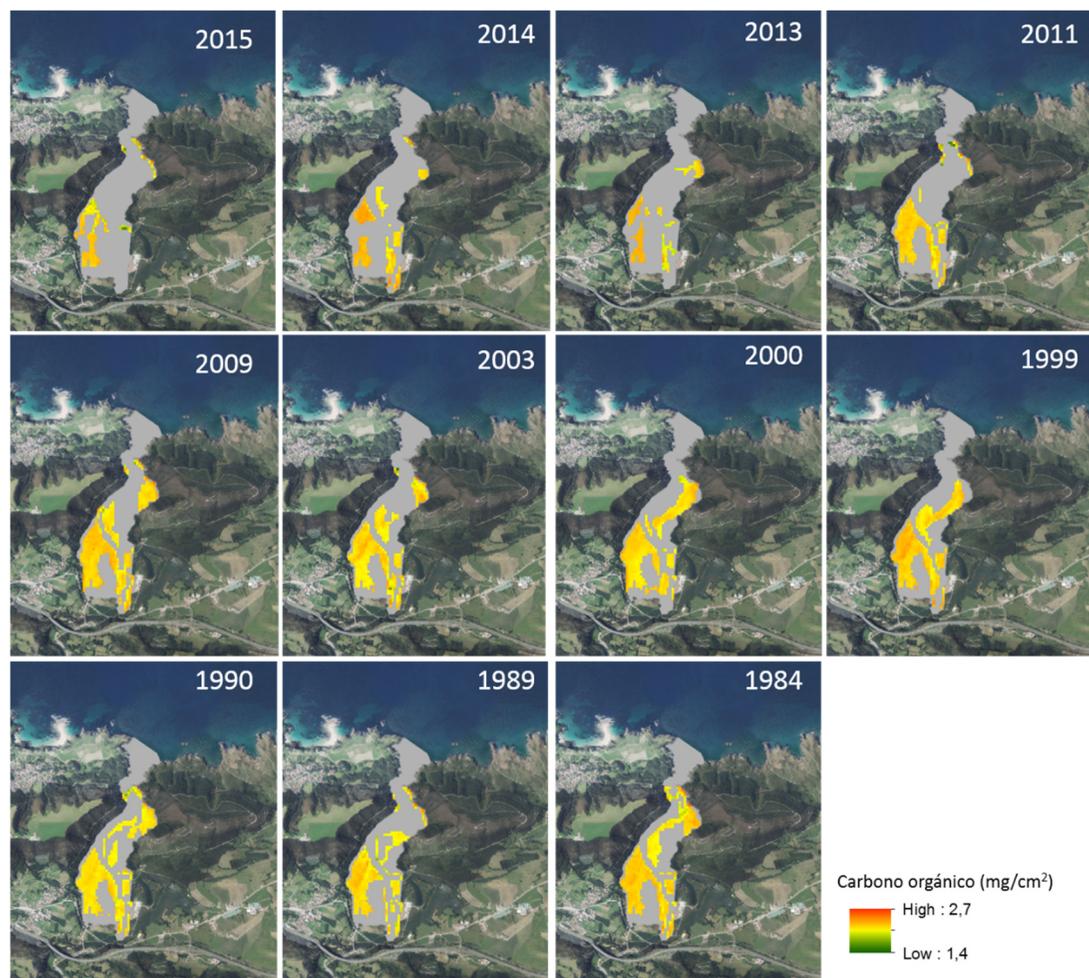


Figura 14. Evolución en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en el estuario de Tina Menor estimado en base al índice GNDVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.85 + 1.011 * GNDVI$.

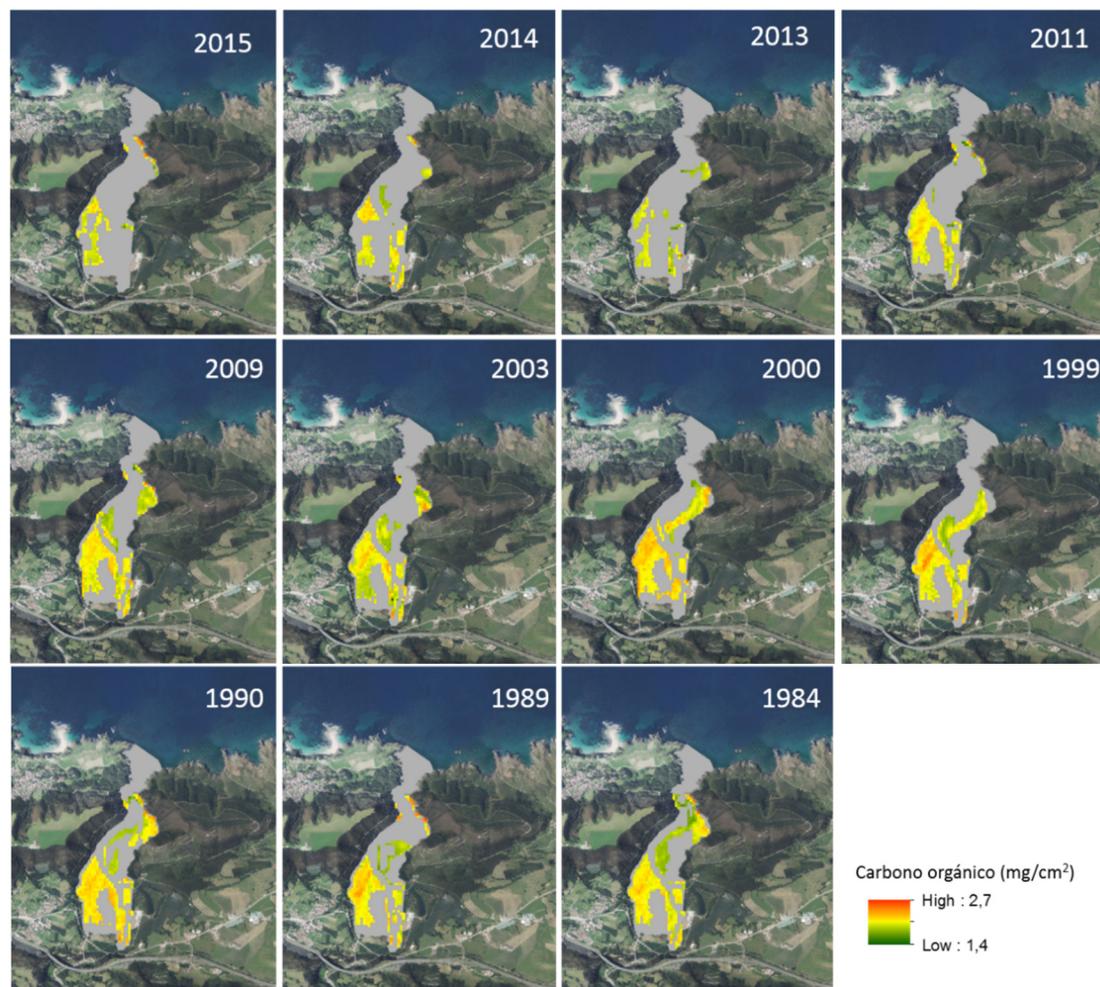


Figura 15. Evolución en el contenido en Corg en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en el estuario de Tina Menor estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $\text{mg C}_{\text{org}} \text{cm}^{-2} = 1.84 + 1.20 \cdot \text{ARVI}$.

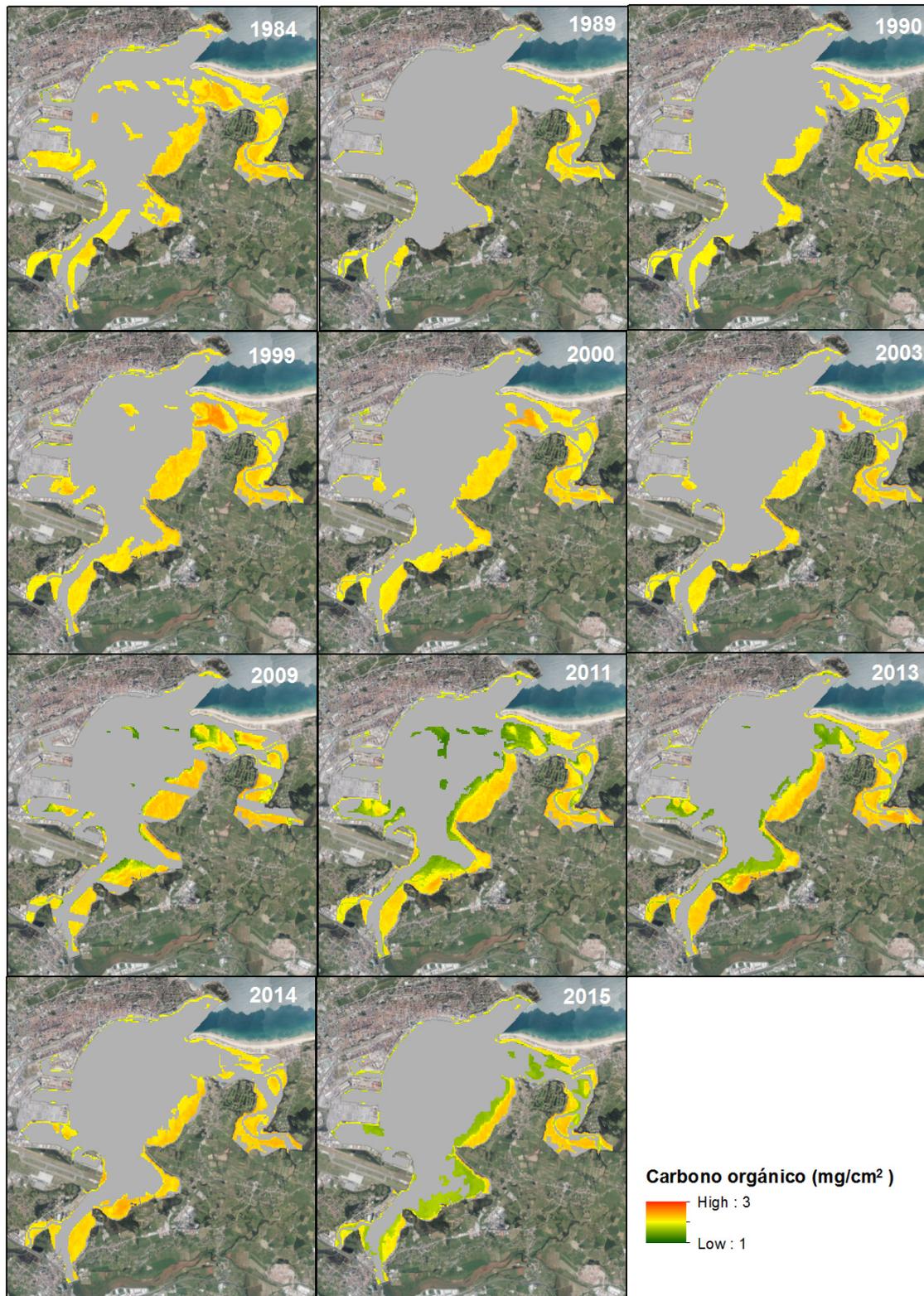


Figura 16. Evolución en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Santander estimado en base al índice GNDVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.85 + 1.011 * GNDVI$.

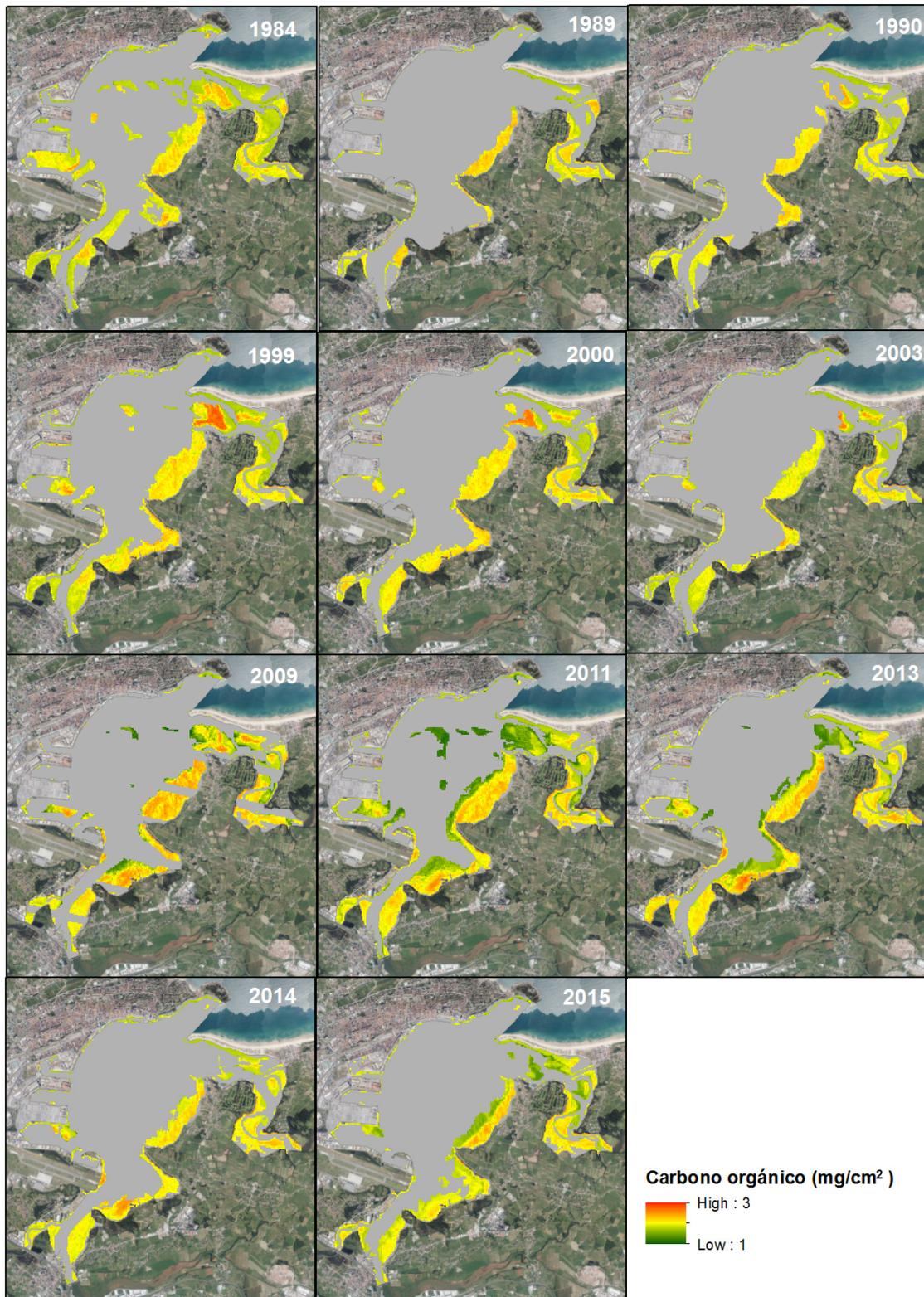


Figura 17. Evolución en el contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Santander estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Landsat y aplicando el modelo predictivo $\text{mg C}_{\text{org}} \text{cm}^{-2} = 1.84 + 1.20 \cdot \text{ARVI}$

3.2.2. Análisis espacial de secuestro de C_{org}

A continuación se muestra la cartografía actual (año 2018) de la distribución espacial del contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie en praderas de *Zostera noltei* estimado con los modelos predictivos desarrollados para los índices espectrales RVI y ARVI calculados con Sentinel-2 a una resolución de 10*10 m, para los cuatro estuarios de la región Atlántica seleccionados: Camariñas (Figura 18, Figura 19), Tina Menor (Figura 20, Figura 21), Bahía de Santander (Figura 22, Figura 23) y Bahía de Cádiz (Figura 24, Figura 25).

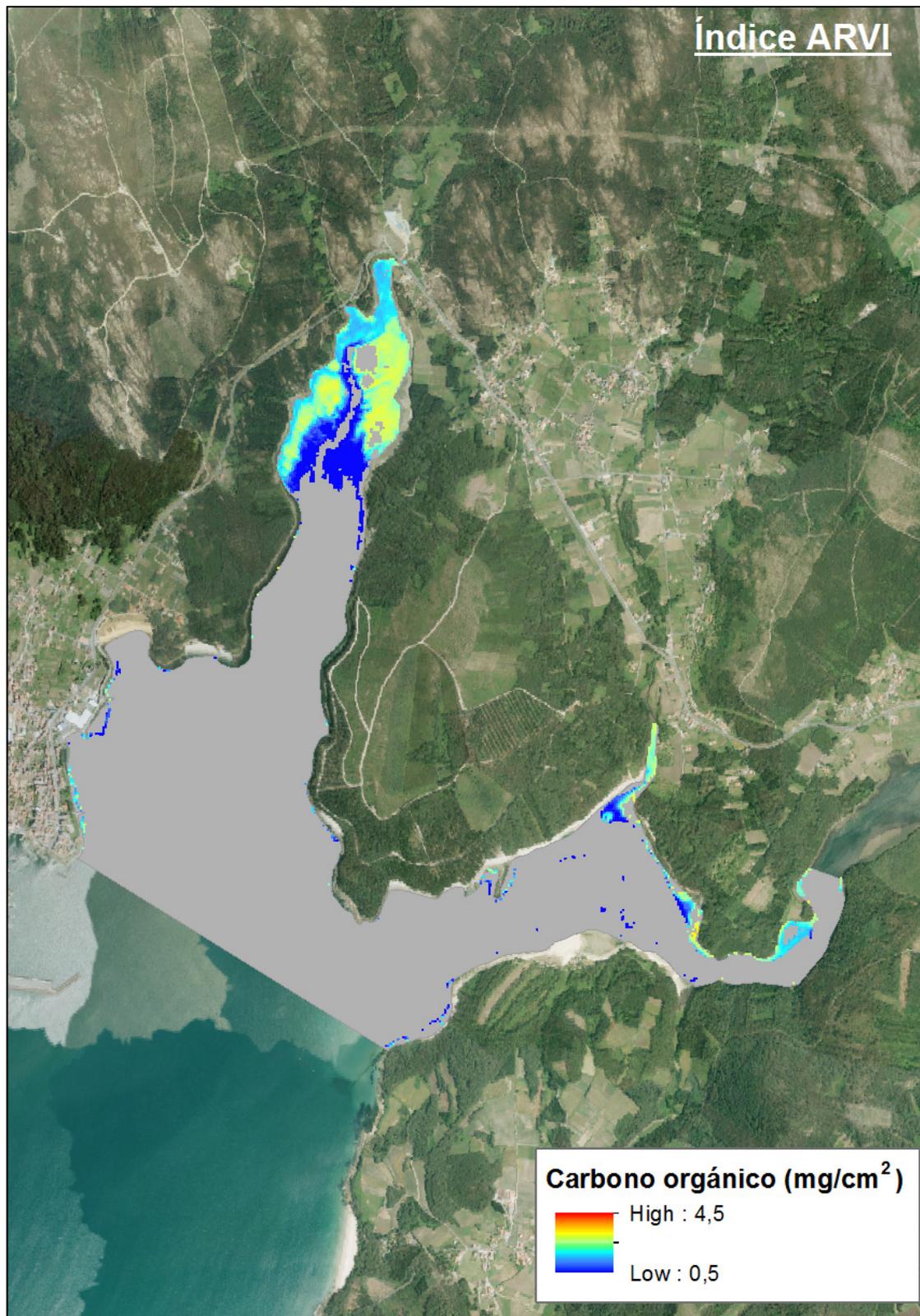


Figura 18. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en Camariñas estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.23 + 2.59 \cdot ARVI$.

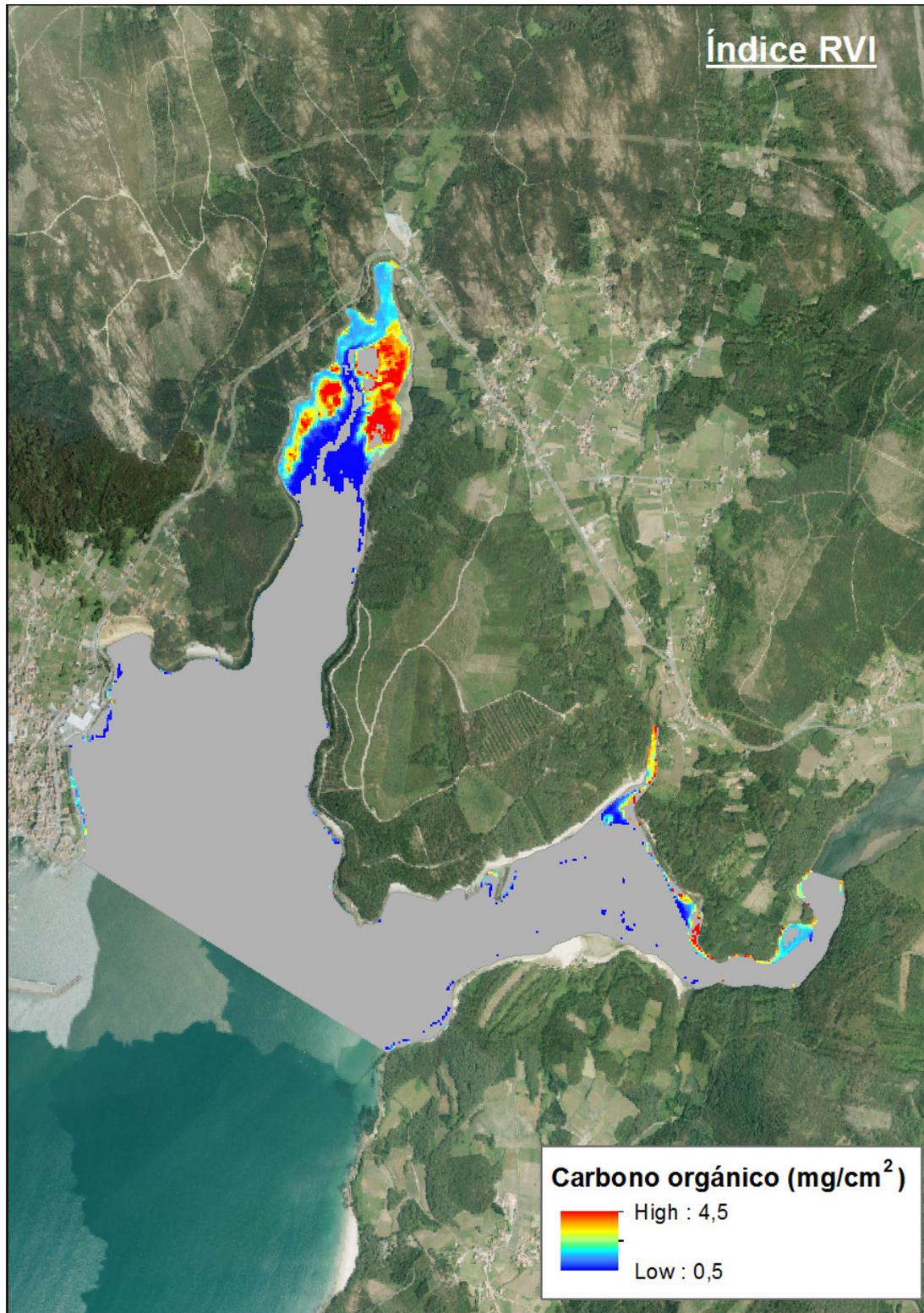


Figura 19. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en Camariñas estimado en base al índice RVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = -0.19 + 1.01 \cdot RVI$.

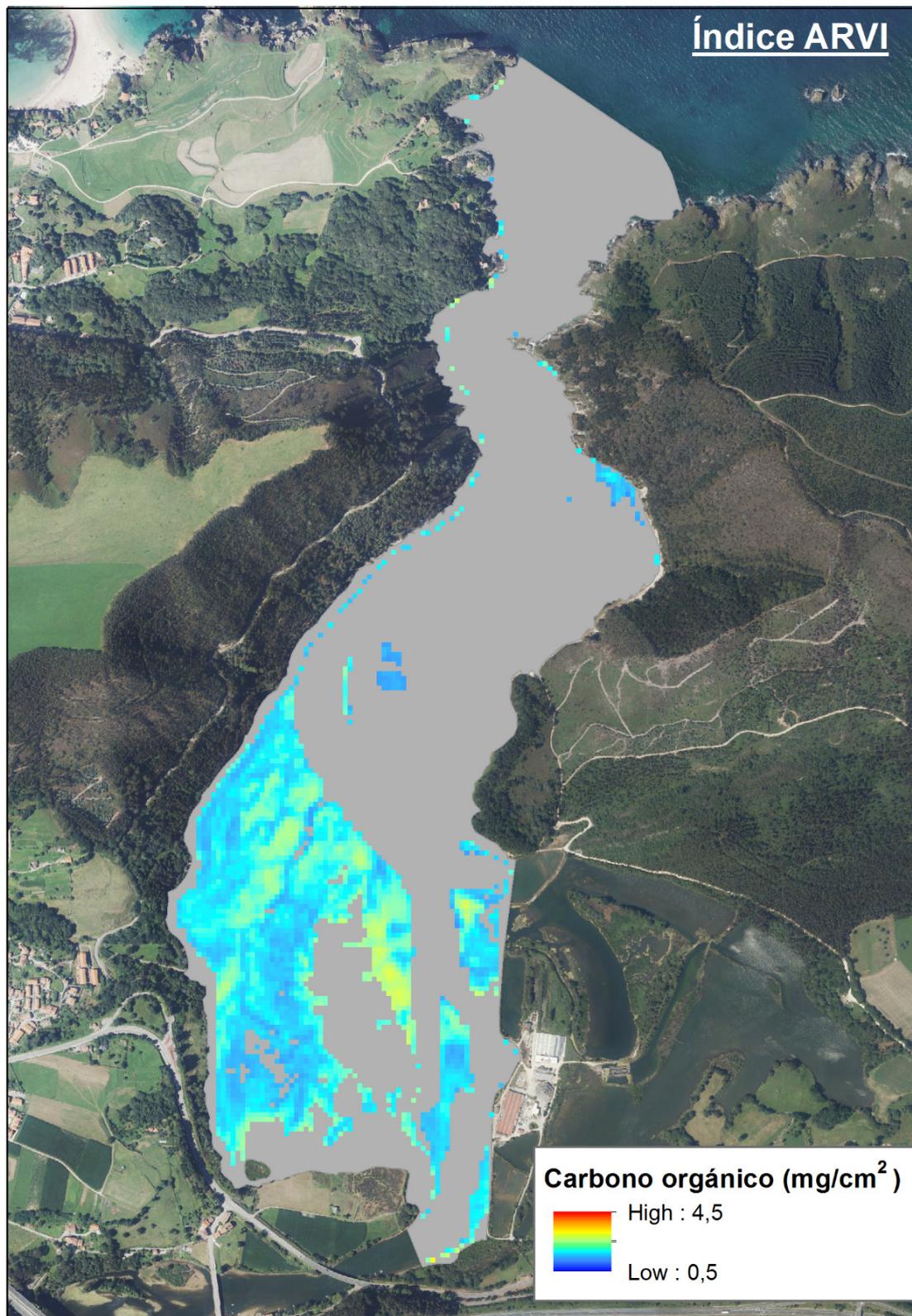


Figura 20. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en Tina Menor estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg C_{org} cm^{-2} = 1.23 + 2.59 \cdot ARVI$.

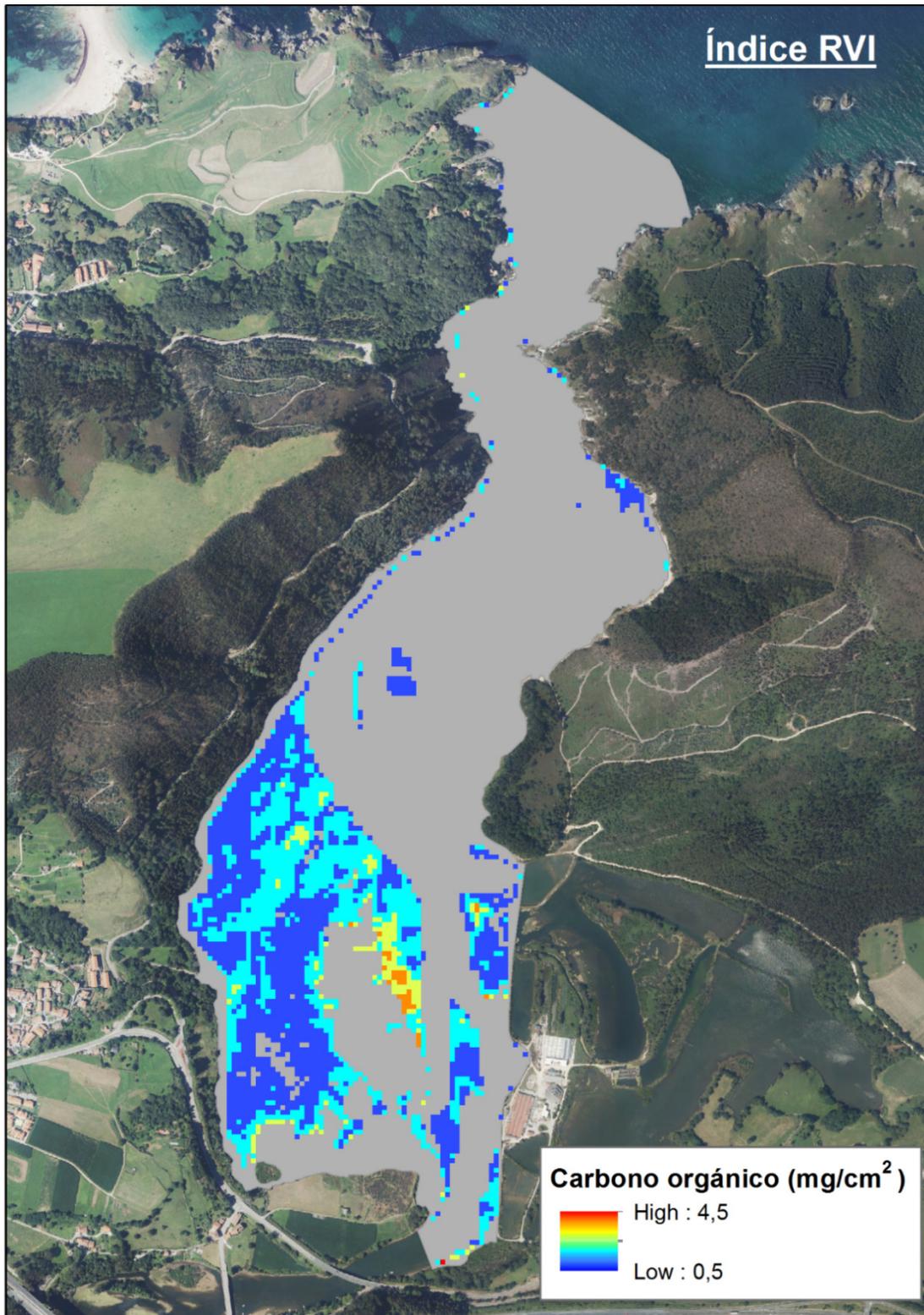


Figura 21. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en Tina Menor estimado en base al índice RVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = -0.19 + 1.01 \cdot RVI$.

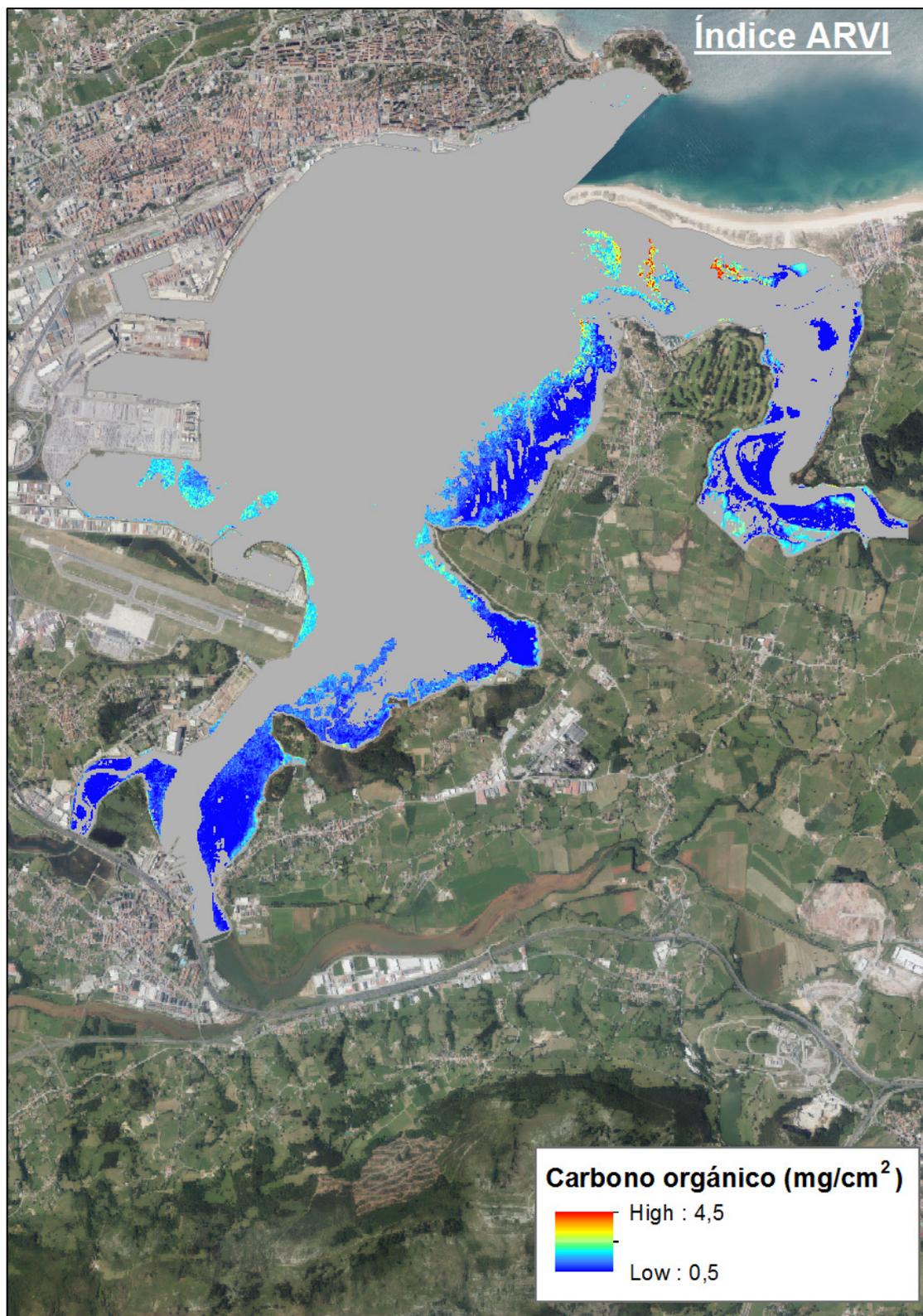


Figura 22. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Santander estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.23 + 2.59 \cdot ARVI$.

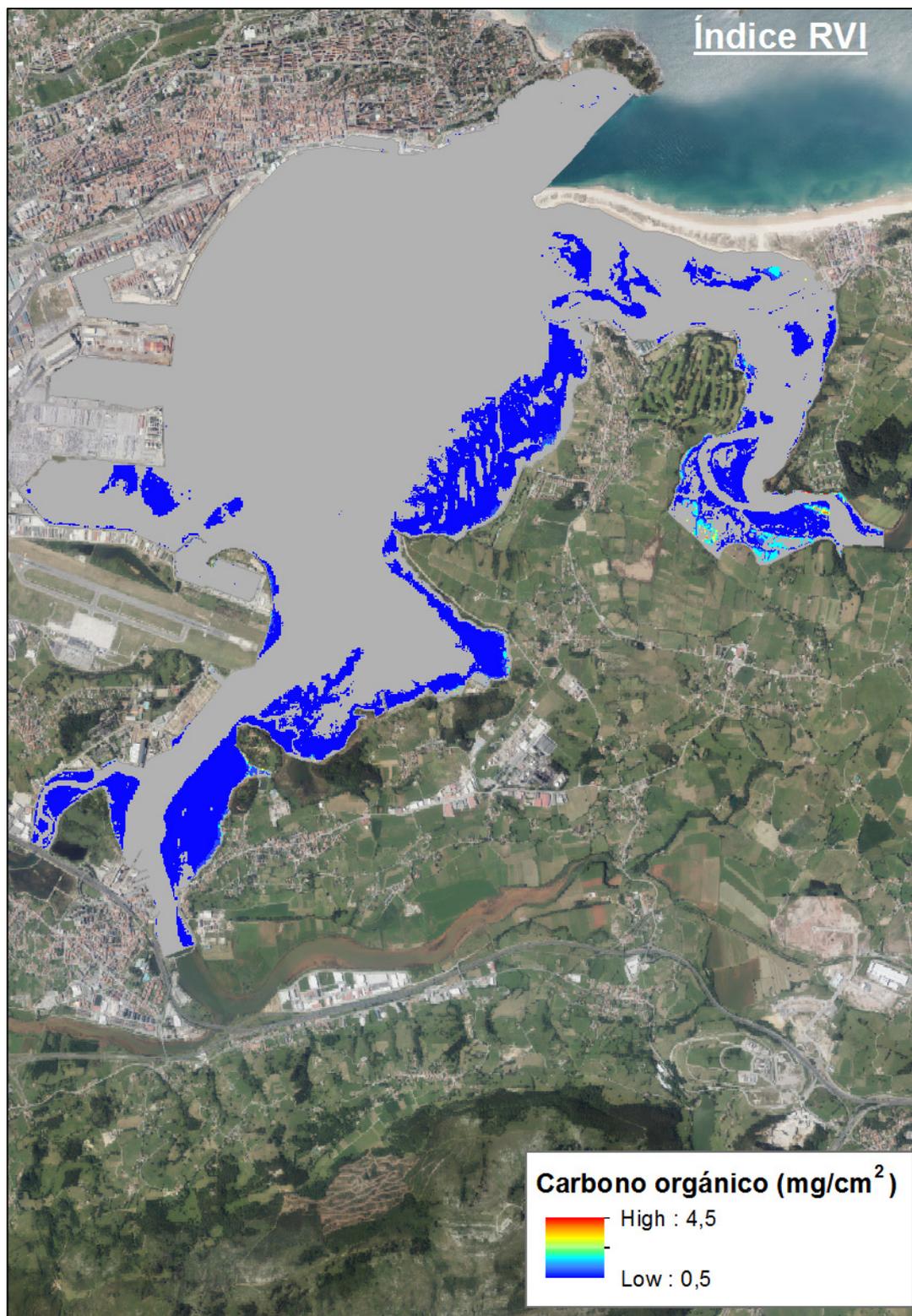


Figura 23. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Santander estimado en base al índice RVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = -0.19 + 1.01 \cdot RVI$.



Figura 24. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Cádiz estimado en base al índice ARVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = 1.23 + 2.59 \cdot ARVI$.



Figura 25. Contenido en C_{org} en biomasa aérea por unidad de superficie de praderas de *Zostera noltei* en la Bahía de Cádiz estimado en base al índice RVI obtenido a partir de imágenes de satélite capturadas con Sentinel-2 aplicando el modelo $mg\ C_{org}\ cm^{-2} = -0.19 + 1.01 \cdot RVI$.

El estuario que muestra una mayor extensión con valores de contenido de C_{org} por unidad de superficie superiores es Camariñas, mientras que la Bahía de Santander es el estuario donde el contenido en C_{org} por unidad de superficie es menor para una mayor extensión. Entre los índices utilizados, los valores de C_{org} estimados con RVI muestran un rango mayor que los valores de C_{org} estimados con el índice ARVI, excepto para la Bahía de Santander. Estos resultados hay que considerarlos como una primera aproximación, debido al bajo poder predictor de los modelos (Tabla 7; $R^2=0.2-0.3$).

REFERENCIAS

- Calleja, F., Galván, C., Silió-Calzada, A., Juanes, J.A., & Ondiviela, B. (2017). Long-term analysis of *Zostera noltei*: A retrospective approach for understanding seagrasses' dynamics. *Marine Environmental Research*, 130, 93–95.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (2014). Coastal Blue Carbon. *Conservation International* (Vol. 36).
- Klemas, V. (2013). Remote Sensing of Coastal Wetland Biomass: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 290, 1016–1028. Retrieved from <http://www.bioone.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-12-00237.1>
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T.V., & Dech, S. (2011). Remote Sensing of Mangrove Ecosystems : A Review.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., & Silliman, B.R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552–560.
- Zhang, M., Ustin, S.L., Rejmankova, E., & Sanderson, E.W. (2019). Monitoring Pacific Coast Salt Marshes Using Remote Sensing. *Ecological Applications*, 7(3), 1039–1053.
- Zomer, R.J., Trabucco, A., & Ustin, S.L. (2009). Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2170–2177. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.06.028>.



APÉNDICE A



APÉNDICE A

ÍNDICE	CLAVE	BANDAS		
		SENTINEL-2	LANDSAT-8	LANDSAT-5, 7
SAVI	near_IR	B8	B5	B4
	red	B4	B4	B3
TSAVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
MSAVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
NDVI	near_IR	B8, B8a, B7	B5	B4
	red	B4	B4	B3
MSAVI2	near_IR	B8	B5	B4
	red	B4	B4	B3
DVI	near_IR	B8M B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
RVI	near_IR	B8	B5	B4
	red	B4	B4	B3
PVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
IPVI	near_IR	B8	B5	B4
	red	B4	B4	B3
WDVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
TNDVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
GNDVI	near_IR	B7	B5	B4
	green	B3	B3	B2
GEMI	near_IR	B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
ARVI	near_IR	B8, B8a	B5	B4
	red	B4	B4	B3
	blue	B2	B2	B1
NDI45	near_IR	B5		
	red	B4		
MTCI	near_IR	B6		
	red1	B4		
	red2	B5		
MCARI	green	B3		
	red1	B4		
	red2	B5		
REIP	near_IR	B7		
	red1	B4		
	red2	B5		
	red3	B6		
S2REP	near_IR	B7		
	red1	B4		
	red2	B5		
	red3	B6		
IRECI	near_IR	B7		

ÍNDICE	CLAVE	BANDAS		
		SENTINEL-2	LANDSAT-8	LANDSAT-5, 7
PSSRA	red1	B4		
	red2	B5		
	red3	B6		
	near_IR	B7		
SIPI	red	B4		
	800nm	B8	B5	B4
	680nm	B4	B4	B3
EVI	445nm	B1	B1	B1
	near_IR	B8	B5	B4
	red	B4	B4	B3
EVI2	blue	B2	B2	B1
	near_IR	B8	B5	B4
CHL-RED-EDGE	red	B4	B4	B3
	[760:800]	B7		
ARI1	[690:720]	B5		
	550nm	B3		
CI green	700nm	B5		
	near_IR	B8, B8a, B7	B5	B4
CI red edge	green	B3	B3	B2
	near_IR	B7		
	red	B5		

Tabla A.1. Bandas espectrales correspondientes a los satélites Sentinel-2 y Landsat-5, 7 y 8 para calcular los índices espectrales

Componente	Biomasa (mg PS cm ⁻²)	MO (%PS)	MO (mg MO cm ⁻²)	C _{org} (%PS)	C _{org} (mg PS cm ⁻²)
Biomasa aérea	5.77±0.45 B	74.2±3.18 A	4.2±0.36 AB	31.61±1.33 A	1.8±0.15 B
Biomasa subterránea viva	13.49±1.31 B	49.71±4.33 C	6.21±0.88 A	21.35±1.81 C	2.67±0.37 A
Biomasa subterránea muerta	3.14±0.61 B	70.66±2.22 AB	2.25±0.45 BC		
Algas verdes	1.14±0.28 B	60.38±3.35 BC	1.25±0.27 C	29.02±0.89 B	0.58±0.12 C
Detritos	85.64±20.27 A	5.67±0.9 D	4.16±0.81 AB		

Tabla A.2. Resultados relativos (media ± error estándar) a biomasa (mg PS cm⁻²), contenido en materia orgánica (MO) y en carbono orgánico (C_{org}) en porcentaje de peso seco (%PS) y por unidad de superficie (mg cm⁻²) para cada uno de los componentes de las muestras para todas las praderas muestreadas. Las letras indican diferencias significativas entre praderas (*Tukey-Kramer test*).

Pradera	Nº muestras	Biomasa (mg PS cm ⁻²)	OM (%DW)	OM (mg cm ⁻²)	Corg (%DW)	Corg (mg cm ⁻²)
Somo	5	3.25 ± 0.63 C	94.71 ± 0.46 A	3.09 ± 0.6 D	40 ± 0.28 A	1.31 ± 0.26 C
Pedreña	7	7.62 ± 0.87 AB	90.81 ± 1.38 A	6.87 ± 0.68 AB	39.09 ± 0.47 A	2.96 ± 0.3 A
Pontejos	5	7.63 ± 1.5 AB	87.15 ± 1.23 A	6.69 ± 1.35 ABC	37.07 ± 0.47 A	2.85 ± 0.58 AB
Puntal	5	7.96 ± 0.78 AB	94.03 ± 0.68 A	7.47 ± 0.68 A	39.86 ± 0.28 A	3.17 ± 0.29 A
S. Bartolomé 2	5	3.43 ± 0.51 C	92.99 ± 0.56 A	3.18 ± 0.47 D	38.98 ± 0.58 A	1.34 ± 0.2 C
S. Bartolomé 1	3	4.14 ± 0.42 BC	91.95 ± 0.95 A	3.81 ± 0.42 ABCD	38.85 ± 0.4 A	1.61 ± 0.17 ABC
Santibañez 1	5	8.65 ± 1.11 A	42.66 ± 5.07 C	3.67 ± 0.68 CD	18.43 ± 2.12 C	1.59 ± 0.29 BC
Santibañez 2	5	2.25 ± 0.1 C	57.51 ± 2 B	1.29 ± 0.08 D	24.62 ± 0.84 B	0.55 ± 0.03 C
Cádiz 1	5	9.18 ± 0.66 A	43.28 ± 2.76 C	4.05 ± 0.43 BCD	18.91 ± 1.15 C	1.75 ± 0.18 ABC
Cádiz 2	5	2.64 ± 0.13 C	50.83 ± 1.35 BC	1.34 ± 0.06 D	21.84 ± 0.56 BC	0.58 ± 0.02 C

Tabla A.3. Resultados relativos (media ± error estándar) a la biomasa foliar de *Zostera noltei* por pradera. Las letras indican diferencias significativas entre praderas (*Tukey Kramer test*).

Site	Nº muestras	Biomass (mg PS cm ⁻²)	MO %PS	MO (mg PS cm ⁻²)	C _{org} (%PS)	C _{org} (mg PS cm ⁻²)
Somo	5	8.87 ± 1.34 B	80.9 ± 1.49 A	7.1 ± 0.93 B	34.39 ± 0.37 A	3.04 ± 0.45 B
Pedreña	7	17.92 ± 1.87 AB	77.73 ± 2.68 AB	13.99 ± 1.66 A	33.06 ± 1.12 AB	5.95 ± 0.7 A
Pontejos	5	7.28 ± 1.03 B	67.45 ± 3.68 BC	4.78 ± 0.43 B	28.52 ± 1.72 BC	2.01 ± 0.17 B
Puntal	5	27.65 ± 7.16 A	62.19 ± 1.85 C	17.59 ± 4.89 A	26.58 ± 0.77 C	7.51 ± 2.09 A
S. Bartolomé 2	5	7.74 ± 1.05 B	72.37 ± 2.54 ABC	5.54 ± 0.65 B	31.3 ± 1.27 ABC	2.39 ± 0.27 B
S. Bartolomé 1	3	6.37 ± 2.15 B	80.27 ± 2.1 AB	5.17 ± 1.83 B	33.43 ± 1.41 AB	2.15 ± 0.78 B
Santibañez_1	5	26.21 ± 4.41 A	7.04 ± 0.93 E	1.82 ± 0.35 B	3.56 ± 0.39 E	0.92 ± 0.17 B
Santibañez_2	5	9.75 ± 0.25 B	17.45 ± 1.25 DE	1.7 ± 0.11 B	7.9 ± 0.52 DE	0.77 ± 0.05 B
Cádiz_1	5	11.54 ± 1.64 B	14.43 ± 4.08 DE	1.43 ± 0.17 B	6.64 ± 1.7 DE	0.67 ± 0.06 B
Cádiz_2	5	9.77 ± 3.07 B	20.83 ± 3.39 D	1.7 ± 0.2 B	9.32 ± 1.41 D	0.77 ± 0.1 B

Tabla A.4. Resultados relativos (media ± error estándar) a la biomasa subterránea viva de *Zostera noltei* por pradera. Las letras indican diferencias significativas entre praderas (Tukey Kramer test).

Site	Nº muestras	Biomasa (mg PS cm ⁻²)	MO (%PS)	MO (mg cm ⁻²)
Somo	5	1.78 ± 0.77 BC	70.77 ± 1.93 A	1.27 ± 0.57 BC
Pedreña	7	12.28 ± 1.01 A	74.99 ± 3.09 A	9.16 ± 0.77 A
Pontejos	5	2.22 ± 0.75 BC	59.84 ± 9.95 A	1.12 ± 0.34 BC
Puntal	5	2.88 ± 0.99 BC	78.9 ± 1.78 A	2.23 ± 0.72 BC
S. Bartolomé_2	5	4 ± 0.76 B	68.78 ± 2.83 A	2.75 ± 0.53 B
S. Bartolomé_1	3	1.44 ± 0.19 BC	67.67 ± 0.74 A	0.97 ± 0.12 BC
Santibañez_1	5	0.8 ± 0.22 C	69.48 ± 8.08 A	0.53 ± 0.14 BC
Santibañez_2	5	0.58 ± 0.13 C	65.38 ± 11.38 A	0.43 ± 0.13 C
Cádiz_1	5	0.66 ± 0.1 C	75.35 ± 11.93 A	0.5 ± 0.1 BC
Cádiz_2	5	0.32 ± 0.19 C	74.13 ± 6.31 A	0.23 ± 0.13 C

Tabla A.5. Resultados relativos (media ± error estándar) a la biomasa subterránea muerta de las praderas de *Zostera noltei* por zona de muestreo. Las letras indican diferencias significativas entre praderas (*Tukey Kramer test*).

Site	Nº muestras	Biomasa (mg cm ⁻²)	MO (%PS)	MO (mg PS cm ⁻²)	C _{org} (%PS)	C _{org} (mg PS cm ⁻²)
Somo	5	3.05 ± 1.14 AB	70.54 ± 2.13 A	2.13 ± 0.8 AB	31.83 ± 0.43 A	0.95 ± 0.35 AB
Pedrena	7	0.27 ± 0.08 D	50.33 ± 4.09 A	0.12 ± 0.02 C	26.39 ± 1.07 A	0.07 ± 0.02 C
Pontejos	4	0.41 ± 0.22 CD	74.37 ± 1.05 A	0.3 ± 0.15 BC	32.69 ± 0.27 A	0.13 ± 0.07 BC
Puntal	5	0.81 ± 0.5 BCD	50.54 ± 20.72 A	0.63 ± 0.4 BC	26.44 ± 5.43 A	0.27 ± 0.17 BC
San Bartolomé_2	5	4.74 ± 0.51 A	61.81 ± 1.1 A	2.92 ± 0.3 A	29.77 ± 0.2 A	1.41 ± 0.15 A
San Bartolomé_1	3	3.03 ± 1.65 ABC	58.97 ± 3.88 A	1.73 ± 0.87 ABC	27.8 ± 1.81 A	0.8 ± 0.41 ABC
Santibañez_1	5	0 ± 0 D				
Santibañez_2	5	0 ± 0 D				
Cádiz_1	5	0 ± 0 D				
Cádiz_2	5	0 ± 0 D				

Tabla A.6. Resultados relativos (media ± error estándar), a la biomasa de algas verdes encontradas en las praderas muestreadas. Las letras indican diferencias significativas entre praderas (*Tukey-Kramer test*).

CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO DE LAS FANERÓGAMAS MARINAS

APÉNDICE A

PRADERA	Pedreña		S.Bartolomé 1		S.Bartolomé 2		Pontejos	Somo	Puntal	Cádiz 1	Cádiz 2	Santibañez 1	Santibañez 2
LAT/LONG 30N UTM	4810737 / 437455		4808122 / 436902		4808107 / 436819		4806982 / 434191	4811258 / 439031	4811266 / 438833	4043080 / 207631	4043162 / 207524	4040935 / 208550	4040940 / 208601
FECHA MUESTREO	2/07/18		3/07/18		3/07/18		14/08/18	25/9/18	25/9/18	25/9/18	25/9/18	25/9/18	25/9/18
FECHA IMAGEN	1/07/18		1/07/18		1/07/18		15/08/18	29/9/18	29/9/18	29/9/18	29/9/18	29/9/18	29/9/18
RESOLUCIÓN (m)	30x30	90x90	30x30	90x90	30x30	90x90	30x30						
ARVI	0.37	0.37	0.32	0.37	0.32	0.32	0.11	0.34	-0.73	-0.59	-0.73	-0.36	-0.31
DVI	0.13	0.13	0.08	0.12	0.08	0.08	0.00	0.14	-0.05	-0.03	-0.05	-0.02	-0.02
GEMI	0.52	0.52	0.42	0.48	0.41	0.41	0.23	0.53	0.13	0.14	0.13	0.15	0.15
GNDVI	0.43	0.43	0.39	0.44	0.40	0.40	-0.18	0.43	-0.77	-0.08	-0.77	-0.69	-0.70
IPVI	0.74	0.74	0.73	0.75	0.74	0.74							
MSAVI	0.21	0.21	0.14	0.19	0.14	0.14	0.00	0.26	-0.13	-0.08	-0.13	-0.06	-0.06
MSAVI2	0.72	0.72	0.65	0.70	0.65	0.65							
NDVI	0.48	0.48	0.45	0.50	0.49	0.49							
PVI	0.09	0.09	0.06	0.08	0.06	0.06	0.01	0.14	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.01
REIP	2.86	2.86	2.65	3.01	2.89	2.92							
SAVI	0.25	0.25	0.18	0.23	0.18	0.18	0.00	0.26	-0.13	-0.08	-0.13	-0.06	-0.06
TNDVI	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	0.99							
TSAVI	-7.87	-7.87	6.25	6.41	4.38	4.37	2.94	-5.45	3.07	2.37	3.07	2.28	2.23
WDVI	0.17	0.17	0.11	0.14	0.10	0.10							
EVI	0.26	0.26	0.18	0.23	0.17	0.17	0.00	0.25	-0.13	-0.09	-0.13	-0.06	-0.06
EVI2	0.25	0.25	0.17	0.22	0.17	0.17	0.00	0.25	-0.11	-0.07	-0.11	-0.05	-0.05
GIG1	1.54	1.54	1.26	1.66	1.34	1.35							
SIPI	1.22	1.22	1.30	1.24	1.38	1.37	-0.12	0.61	-0.52	-0.76	-0.52	-0.59	-0.63

Tabla A.7. Valor de los índices espectrales calculados a partir de imágenes obtenidas con Landsat (Tabla 2) para las zonas donde se tomaron muestras de biomasa.

CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO DE LAS FANERÓGAMAS MARINAS

APÉNDICE A

PRADERA	Pedreña		S.Bartolomé 1		S.Bartolomé 2		Pontejos		Somo		Puntal		Cádiz 1		Cádiz 2		Santibañez 1		Santibanez 2	
LAT/LON 30N UTM	4810737 / 437455		4808122 / 436902		4808107 / 436819		4806982 / 434191		4811258 / 439031		4811266 / 438833		4043080 / 207631		4043162 / 207524		4040935 / 208550		4040940 / 208601	
FECHA MUESTREO	2-Jul-18		3-Jul-18		3-Jul-18		14-Aug-18		25-Sep-18											
FECHA IMAGEN	1-Jul-18		1-Jul-18		1-Jul-18		15-Aug-18		29-Sep-18											
RESOLUCIÓN (m)	10x10	30x30																		
ARVI	0.42	0.43	0.41	0.39	0.38	0.37	0.2	0.16	0.32	0.32	0.27	0.26	0.18	0.16	0.11	0.15	0.19	0.17	-0.28	-0.21
ARVI_8a	0.45	0.46	0.47	0.4	0.4	0.39	0.03	0.26	0.33	0.33	0.24	0.27	0.2	0.17	0.13	0.16	0.02	0.19	-0.17	-0.33
DVI	0.11	0.12	0.08	0.08	0.06	0.06	0.04	0.04	0.1	0.1	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	-0.02	-0.02
DVI_8a	0.12	0.13	0.11	0.09	0.07	0.07	0.02	0.06	0.1	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.01	0.05	-0.01	-0.02
GEMI	0.5	0.51	0.47	0.44	0.4	0.4	0.27	0.35	0.46	0.46	0.42	0.43	0.44	0.43	0.41	0.42	0.3	0.37	0.23	0.19
GNDVI	0.36	0.37	0.35	0.32	0.28	0.27	0.08	0.26	0.38	0.37	0.35	0.37	0.24	0.24	0.18	0.2	0.07	0.2	-0.13	-0.23
IPVI	0.73	0.73	0.7	0.7	0.68	0.68	0.66	0.63	0.72	0.72	0.7	0.69	0.63	0.63	0.6	0.61	0.63	0.61	0.38	0.4
IRECI	0.14	0.16	0.13	0.11	0.08	0.08	0.01	0.08	0.13	0.13	0.09	0.11	0.09	0.08	0.07	0.08	0.02	0.06	0	-0.01
MCARI	0.09	0.09	0.06	0.05	0.06	0.06	0.02	0.04	0.08	0.08	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.03	0.05	0.03	0.02
MSAVI	0.18	0.19	0.14	0.14	0.11	0.11	0.07	0.08	0.16	0.16	0.15	0.14	0.12	0.11	0.09	0.1	0.08	0.08	-0.04	-0.03
MSAVI_8a	0.2	0.21	0.18	0.15	0.12	0.12	0.03	0.1	0.17	0.17	0.13	0.14	0.13	0.12	0.1	0.11	0.03	0.09	-0.03	-0.05
MSAVI2	0.69	0.7	0.65	0.65	0.61	0.61	0.58	0.58	0.67	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.59	0.6	0.59	0.58	0.46	0.47
MTCI	0.76	0.76	0.93	0.94	0.49	0.5	-0.4	-0.36	0.67	0.67	0.56	0.78	0.57	0.39	0.36	0.39	-0.34	0.08	-1.03	-3.15
NDI45	0.29	0.3	0.25	0.22	0.27	0.26	0.13	0.22	0.29	0.28	0.23	0.25	0.18	0.18	0.16	0.17	0.15	0.21	0.17	0.12
NDVI	0.45	0.46	0.41	0.4	0.36	0.35	0.32	0.25	0.43	0.43	0.4	0.39	0.27	0.26	0.21	0.23	0.26	0.23	-0.24	-0.2
NDVI_7	0.44	0.46	0.43	0.4	0.38	0.37	0.14	0.33	0.44	0.43	0.35	0.39	0.28	0.26	0.23	0.25	0.15	0.27	-0.03	-0.13
NDVI_8a	0.48	0.49	0.47	0.41	0.39	0.37	0.16	0.35	0.44	0.44	0.37	0.4	0.29	0.27	0.22	0.24	0.09	0.25	-0.13	-0.31

CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO DE LAS FANERÓGAMAS MARINAS

APÉNDICE A

PRADERA	Pedreña		S.Bartolomé 1		S.Bartolomé 2		Pontejos		Somo		Puntal		Cádiz 1		Cádiz 2		Santibañez 1		Santibanez 2	
LAT/LON 30N UTM	4810737 / 437455		4808122 / 436902		4808107 / 436819		4806982 / 434191		4811258 / 439031		4811266 / 438833		4043080 / 207631		4043162 / 207524		4040935 / 208550		4040940 / 208601	
FECHA MUESTREO	2-Jul-18		3-Jul-18		3-Jul-18		14-Aug-18		25-Sep-18		25-Sep-18		25-Sep-18		25-Sep-18		25-Sep-18		25-Sep-18	
FECHA IMAGEN	1-Jul-18		1-Jul-18		1-Jul-18		15-Aug-18		29-Sep-18		29-Sep-18		29-Sep-18		29-Sep-18		29-Sep-18		29-Sep-18	
RESOLUCIÓN (m)	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30	10x10	30x30
PSSRA	2.59	2.73	2.53	2.32	2.22	2.16	1.33	2.49	2.56	2.52	2.07	2.37	1.78	1.72	1.59	1.66	1.35	1.79	0.94	0.78
PVI	0.08	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	-0.02	-0.01
PVI_8a	0.09	0.09	0.08	0.06	0.05	0.05	0.01	0.04	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.01	0.04	-0.01	-0.02
REIP	698.5	699.2	706.06	705.42	687	687.26	746.6	713.4	696.6	696.6	692.2	698.5	691.2	672.7	675.4	679.6	758.3	717.4	741.9	730.8
RVI	2.67	2.7	2.38	2.34	2.12	2.1	1.95	2.34	2.52	2.55	2.33	2.4	1.73	1.69	1.52	1.59	1.7	1.68	0.61	0.68
S2REP	703.7	704.3	710.3	709.7	693.6	693.9	745.7	716.7	702.1	702	698.2	703.7	697.3	681.1	683.4	687.1	756.0	720.2	741.6	732.0
SAVI	0.23	0.23	0.18	0.18	0.14	0.14	0.1	0.1	0.2	0.2	0.18	0.17	0.14	0.14	0.11	0.12	0.11	0.1	-0.06	-0.04
TNDVI	0.98	0.98	0.95	0.95	0.93	0.92	0.91	0.84	0.97	0.96	0.95	0.94	0.88	0.87	0.84	0.85	0.87	0.85	0.51	0.54
TNDVI_8a	0.99	0.99	0.98	0.95	0.94	0.93	0.81	0.91	0.97	0.97	0.93	0.95	0.89	0.88	0.85	0.86	0.77	0.86	0.61	0.37
TSAVI	-24.24	-25.53	11.68	10.85	6.2	6.6	3.44	3.41	23.31	-12.86	24.65	-2.55	-5.41	-5.29	-4.79	-5.05	10.39	-8.98	3.65	3.76
TSAVI_8a	-14.1	-11.21	34.25	-28.67	6.88	7.12	3.04	3.75	33.75	-19.32	15.17	0.95	-4.74	-4.65	-4.37	-4.67	6.01	12.23	3.86	3.49
WDVI	0.15	0.15	0.11	0.12	0.09	0.09	0.06	0.06	0.13	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.08	0.08	0.01	0.01
WDVI_8a	0.16	0.16	0.14	0.12	0.1	0.1	0.04	0.08	0.13	0.13	0.11	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.05	0.09	0.02	0
ARI1	4.06	4	3.75	3.41	3.8	3.65	2.95	4.73	5.16	4.92	5.69	5.62	2.36	2.52	1.74	1.84	1.71	3.11	1.92	-0.05
CIG2	1.14	1.2	1.09	0.97	0.76	0.74	0.19	0.95	1.23	1.19	1.07	1.2	0.65	0.62	0.45	0.5	0.16	0.55	-0.22	-0.37
CIG3	1.32	1.35	1.27	1.03	0.8	0.76	0.23	1.07	1.27	1.26	1.17	1.26	0.68	0.65	0.44	0.48	0.04	0.51	-0.36	-0.55
CIRE	0.43	0.46	0.52	0.47	0.29	0.28	0.01	0.38	0.4	0.4	0.29	0.39	0.23	0.18	0.15	0.18	0	0.14	-0.34	-0.39

CAPACIDAD DE SECUESTRO DE CARBONO DE LAS FANERÓGAMAS MARINAS

APÉNDICE A

PRADERA	Pedreña		S.Bartolomé 1		S.Bartolomé 2		Pontejos		Somo		Puntal		Cádiz 1		Cádiz 2		Santibañez 1		Santibanez 2	
LAT/LON 30N UTM	4810737 / 437455		4808122 / 436902		4808107 / 436819		4806982 / 434191		4811258 / 439031		4811266 / 438833		4043080 / 207631		4043162 / 207524		4040935 / 208550		4040940 / 208601	
FECHA MUESTREO	2-Jul-18		3-Jul-18		3-Jul-18		14-Aug-18		25-Sep-18											
FECHA IMAGEN	1-Jul-18		1-Jul-18		1-Jul-18		15-Aug-18		29-Sep-18											
RESOLUCIÓN (m)	10x10	30x30																		
CHL_RED_ED	0.7	0.69	0.66	0.68	0.78	0.78	0.99	0.77	0.71	0.72	0.77	0.73	0.81	0.85	0.87	0.85	1	0.89	1.51	1.65
EVI	0.25	0.26	0.2	0.2	0.16	0.16	0.09	0.09	0.2	0.2	0.18	0.17	0.15	0.15	0.12	0.13	0.11	0.11	-0.06	-0.04
EVI2	0.22	0.22	0.17	0.17	0.13	0.13	0.09	0.09	0.19	0.19	0.17	0.16	0.14	0.13	0.11	0.12	0.1	0.09	-0.05	-0.04
GIG1	1.2	1.18	0.96	0.99	0.69	0.69	0.74	0.81	1.2	1.21	1.33	1.21	0.6	0.6	0.39	0.44	0.47	0.46	-0.49	-0.45
SIPI	1.13	1.11	1.07	1.1	1.03	1.05	1.38	0.51	1.25	1.27	1.48	1.58	1.47	1.54	1.64	1.55	1.48	1.54	0.32	-0.21
fPAR	0.38	0.39	0.33	0.3	0.27	0.27	0.1	0.23	0.37	0.37	0.31	0.34	0.24	0.22	0.22	0.23	0.1	0.2	0	0
FVC	0.35	0.36	0.3	0.28	0.26	0.26	0.12	0.21	0.26	0.26	0.2	0.23	0.2	0.18	0.19	0.19	0.12	0.18	0.07	0.04
LAI	1.13	1.13	1	0.95	0.92	0.9	0.53	0.82	0.8	0.8	0.66	0.74	0.55	0.51	0.52	0.54	0.27	0.48	0.1	0.13
CAB	23.92	24.92	25.25	22.33	17.27	16.84	17.92	26.65	15.58	15.43	11.68	14.41	12.18	10.87	8.02	8.79	0.54	7.73	0	0.35

Tabla A.8. Valor de los índices espectrales (azul) y parámetros biofísicos (verde) calculados a partir de imágenes obtenidas con Sentinel-2 (Tabla 2) para las zonas donde se tomaron muestras de biomasa.

Índices de vegetación	R	p	Parámetros biofísicos	R	p
ARI1	0.85	<0.0001	PB_CAB	0.75	<0.0001
RVI	0.71	<0.0001	PB_LAI	0.72	<0.0001
NDI45	0.71	<0.0001	PB_fPAR	0.59	<0.0001
PSSRA	0.68	<0.0001	PB_FVC	0.59	<0.0001
CIG3	0.67	<0.0001			
GIG1	0.66	<0.0001			
CIG2	0.64	<0.0001			
NDVI_8a	0.64	<0.0001			
ARVI_8a	0.62	<0.0001			
NDVI_7	0.62	<0.0001			
TNDVI_8a	0.61	<0.0001			
ARVI	0.59	<0.0001			
GNDVI	0.59	<0.0001			
IPVI	0.57	<0.0001			
NDVI	0.57	<0.0001			
CIRE	0.57	<0.0001			
MSAVI_8a	0.54	<0.0001			
SAVI	0.53	<0.0001			
MSAVI2	0.53	<0.0001			
MSAVI	0.52	<0.001			
EVI2	0.52	<0.001			
TNDVI	0.52	<0.001			
DVI_8a	0.51	<0.001			
PVI_8a	0.51	<0.001			
IRECI	0.51	<0.001			
EVI	0.51	<0.001			
PVI	0.50	<0.001			
DVI	0.50	<0.001			
CHL_RED_ED	-0.47	<0.001			
MCARI	0.47	<0.001			
MTCI	0.44	<0.01			
GEMI	0.39	<0.01			
WDVI_8a	0.35	<0.05			
TSAVI_8a	0.34	<0.05			
WDVI	0.32	<0.05			
S2REP	-0.25	ns			
REIP	-0.25	ns			
SIPI	-0.14	ns			
TSAVI	0.13	ns			

Tabla A.9. Resultados de las correlaciones entre índices de vegetación y parámetros biofísicos calculados con Sentinel (resolución 10*10 m) y contenido en C_{org} en porcentaje de peso seco (%PS) en biomasa aérea de *Zostera spp.*

Índices de vegetación	R	p	Parámetros biofísicos	R	p
GIG1	0.60	<0.0001	PB_CAB	0.49	<0.001
RVI	0.55	<0.0001	PB_fPAR	0.33	<0.05
NDVI	0.53	<0.001	PB_FVC	0.32	<0.05
IPVI	0.53	<0.001	PB_LAI	0.41	<0.01
TNDVI	0.51	<0.001			
SAVI	0.49	<0.001			
MSAVI2	0.49	<0.001			
MSAVI	0.49	<0.001			
EVI2	0.48	<0.001			
ARVI	0.48	<0.001			
PVI	0.47	<0.001			
DVI	0.47	<0.001			
EVI	0.47	<0.001			
ARI1	0.45	<0.01			
CIG3	0.41	<0.01			
TNDVI_8a	0.39	<0.01			
NDVI_8a	0.39	<0.01			
CHL_RED_ED	-0.38	<0.01			
WDVI	0.37	<0.01			
GNDVI	0.37	<0.01			
CIG2	0.36	<0.05			
CIRE	0.35	<0.05			
NDVI_7	0.33	<0.05			
MSAVI_8a	0.32	<0.05			
ARVI_8a	0.32	<0.05			
PSSRA	0.31	<0.05			
PVI_8a	0.31	<0.05			
DVI_8a	0.31	<0.05			
MTCI	0.26	ns			
IRECI	0.26	ns			
SIPI	0.25	ns			
GEMI	0.24	ns			
WDVI_8a	0.23	ns			
NDI45	0.20	ns			
TSAVI_8a	-0.18	ns			
TSAVI	-0.16	ns			
MCARI	0.12	ns			
REIP	0.04	ns			
S2REP	0.04	ns			

Tabla A.10. Resultados de las correlaciones entre índices de vegetación y parámetros biofísicos calculados con Sentinel (resolución 10*10 m) y contenido en C_{org} por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$) en biomasa aérea de *Zostera spp.*

Índices de vegetación	R	p	Parámetros biofísicos	R	p
EVI	-0.38	<0.05	PB_FVC	-0.34	ns
WDVI	-0.37	ns	PB_LAI	-0.34	ns
PVI	-0.36	ns	PB_fPAR	-0.33	ns
DVI	-0.36	ns	PB_CAB	-0.18	ns
EVI2	-0.35	ns			
WDVI_8a	-0.35	ns			
MSAVI	-0.35	ns			
MSAVI2	-0.35	ns			
SAVI	-0.35	ns			
GEMI	-0.35	ns			
CIG3	-0.35	ns			
MTCI	-0.35	ns			
DVI_8a	-0.34	ns			
PVI_8a	-0.34	ns			
MSAVI_8a	-0.34	ns			
ARVI	-0.33	ns			
TNDVI_8a	-0.32	ns			
NDVI_8a	-0.32	ns			
TNDVI	-0.32	ns			
CHL_RED_ED	0.32	ns			
NDVI	-0.32	ns			
IPVI	-0.32	ns			
ARVI_8a	-0.31	ns			
GNDVI	-0.31	ns			
RVI	-0.31	ns			
CIRE	-0.31	ns			
IRECI	-0.30	ns			
CIG2	-0.30	ns			
GIG1	-0.29	ns			
NDVI_7	-0.29	ns			
S2REP	0.28	ns			
REIP	0.28	ns			
PSSRA	-0.27	ns			
MCARI	-0.25	ns			
NDI45	-0.23	ns			
TSAVI	0.23	ns			
TSAVI_8a	0.22	ns			
ARI1	-0.16	ns			
SIPI	0.08	ns			

Tabla A.11. Resultados de las correlaciones entre Índices de vegetación y parámetros biofísicos calculados con Sentinel (resolución 10*10 m) y contenido en C_{org} en porcentaje de peso seco (%PS) en algas verdes.

Índices de vegetación	R	p	Parámetros biofísicos	R	p
TSAVI_8a	0.43	<0.05	PB_CAB	-0.20	ns
SIPI	-0.40	<0.05	PB_fPAR	0.04	ns
TSAVI	0.39	<0.05	PB_LAI	0.02	ns
REIP	-0.37	ns	PB_FVC	0.02	ns
S2REP	-0.37	ns			
GIG1	-0.37	ns			
ARVI_8a	0.24	ns			
NDI45	0.24	ns			
RVI	-0.22	ns			
PVI	-0.22	ns			
DVI	-0.22	ns			
MSAVI2	-0.21	ns			
MSAVI	-0.21	ns			
NDVI_7	0.21	ns			
EVI2	-0.21	ns			
WDVI	-0.20	ns			
SAVI	-0.20	ns			
NDVI	-0.19	ns			
IPVI	-0.19	ns			
TNDVI	-0.19	ns			
EVI	-0.17	ns			
PSSRA	0.16	ns			
CHL_RED_ED	-0.16	ns			
MTCI	0.16	ns			
TNDVI_8a	0.15	ns			
NDVI_8a	0.14	ns			
ARVI	0.13	ns			
CIRE	0.13	ns			
GNDVI	0.11	ns			
MCARI	0.10	ns			
CIG2	0.07	ns			
ARI1	0.05	ns			
WDVI_8a	-0.03	ns			
PVI_8a	-0.02	ns			
DVI_8a	-0.02	ns			
CIG3	-0.02	ns			
IRECI	0.02	ns			
GEMI	0.01	ns			
MSAVI_8a	0.00	ns			

Tabla A.12. Resultados de las correlaciones entre Índices de vegetación y parámetros biofísicos calculados con Sentinel (resolución 10*10 m) y contenido en C_{org} por unidad de superficie (mg C_{org} cm⁻²) en algas verdes.

Índices de vegetación	R	p
ARVI	0.92	<0.0001
GEMI	0.88	<0.0001
EVI	0.87	<0.0001
MSAVI	0.87	<0.0001
SAVI	0.87	<0.0001
DVI	0.85	<0.0001
SIPI	0.84	<0.0001
PVI	0.83	<0.0001
GNDVI	0.82	<0.0001
EVI2	0.75	<0.0001
TSAVI	-0.44	<0.01
GIG1	0.08	ns
MSAVI2	0.07	ns
WDVI	0.07	ns
TNDVI	0.06	ns
IPVI	0.06	ns
NDVI	0.06	ns
REIP	0.06	ns

Tabla A.13. Resultados de las correlaciones entre índices de vegetación calculados con Landsat (resolución 30*30 m) y contenido en C_{org} en porcentaje de peso seco (%PS) en biomasa aérea de *Zostera spp.*

Índices de vegetación	R	p
WDVI	0.80	<0.001
MSAVI2	0.80	<0.001
GNDVI	0.46	<0.001
ARVI	0.45	<0.01
GIG1	0.75	<0.01
TSAVI	-0.43	<0.01
EVI	0.41	<0.01
GEMI	0.41	<0.01
MSAVI	0.39	<0.01
DVI	0.39	<0.01
SAVI	0.39	<0.01
PVI	0.38	<0.01
SIPI	0.33	<0.05
EVI2	0.20	ns
TNDVI	0.17	ns
IPVI	0.17	ns
NDVI	0.17	ns
REIP	0.16	ns

Tabla A.14. Resultados de las correlaciones entre índices de vegetación calculados con Landsat (resolución 30*30 m) y contenido en C_{org} por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$) en biomasa aérea de *Zostera spp.*

Índices de vegetación	R	p
WDVI	-0.53	<0.05
MSAVI2	-0.51	ns
GIG1	-0.42	ns
SIPI	-0.29	ns
GNDVI	-0.28	ns
EVI	-0.28	ns
GEMI	-0.28	ns
SAVI	-0.25	ns
EVI2	-0.25	ns
DVI	-0.25	ns
TSAVI	0.20	ns
MSAVI	-0.19	ns
ARVI	-0.15	ns
PVI	-0.13	ns
REIP	0.09	ns
IPVI	0.08	ns
NDVI	0.08	ns
TNDVI	0.08	ns

Tabla A.15. Resultados de las correlaciones entre Índices de vegetación calculados con Landsat (resolución 30*30 m) y contenido en C_{org} en porcentaje de peso seco (%PS) en algas verdes.

Índices de vegetación	R	p
WDVI	-0.85	<0.0001
MSAVI2	-0.84	<0.0001
GIG1	-0.72	<0.01
TSAVI	0.41	<0.05
SIPI	0.32	ns
GNDVI	0.29	ns
ARVI	0.25	ns
SAVI	0.16	ns
MSAVI	0.14	ns
EVI2	0.12	ns
EVI	0.08	ns
DVI	0.08	ns
PVI	0.06	ns
GEMI	0.05	ns
REIP	0.03	ns
IPVI	0.02	ns
NDVI	0.02	ns
TNDVI	0.02	ns

Tabla A.16. Resultados de las correlaciones entre Índices de vegetación calculados con Landsat (resolución 30*30 m) y contenido en C_{org} por unidad de superficie ($mg C_{org} cm^{-2}$) en algas verdes.



Un proyecto de:



Con el apoyo de:

