





Material particulado en las marismas de la Bahía de Cádiz: Tasas de acumulación y composición orgánica

Particulated matter in the saltmarshes of Cádiz Bay: Accumulation rates and nature of the matter

Javier Benavente^{a,b}, María Galindo^c, Gloria Peralta^{a,c}, Juan José Vergara^{a,c}, Alba Yamuza^{a,c}

^aInstituto Universitario de Investigación Marina – Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz; ^bDpto. Ciencias de la Tierra, , javier.benavente@uca.es; ^cDpto. Biología, maria.galindo@alum.uca.es, , gloria.peralta@uca.es, , juanjo.vergara@uca.es, , alba.yamuza@uca.es.

How to cite: Benavente, J.; Galindo, M.; Peralta, G.; Vergara, J.J.; y Yamuza, A. 2024. Material particulado en las marismas de la Bahía de Cádiz: Tasas de acumulación y composición orgánica. En libro de actas: *XII Jornadas de Geomorfología Litoral*. Valencia, 25-27 de septiembre de 2024. <https://doi.org/10.4995/GEOLIT24.2024.18662>

Abstract

Saltmarshes provide important ecosystem services such as coastal flood protection and blue carbon burial. A key processes for the survival of these systems to sea level rise is the capture of allochthonous particulate matter (PM), few works quantify this process. This work quantifies and characterizes seasonality and nature of deposited PM in the saltmarshes of Cádiz Bay. The results suggest that PM deposition rate in Cadiz Bay marshes is highly related to elevation and season. The deposition rate decreases with increasing elevation and the values are higher in spring than in winter. The organic matter content (%OM) of the deposited PM shows the opposite pattern with an increase in %OM with elevation and higher values in winter than in spring. These results provide the first clues about the importance of allochthonous material for the burial of blue C in the saltmarshes of Cádiz Bay.

Keywords: POM, saltmarsh, Cadiz Bay, sedimentation, blue carbon

Resumen

Las marismas proporcionan importantes servicios ecosistémicos, como la protección contra inundaciones costeras y el entierro de carbono azul. Un proceso clave para la supervivencia de estos sistemas ante el aumento del nivel del mar es la captura de material particulado (MP), pero pocos trabajos han cuantificado previamente este proceso. Este trabajo cuantifica y caracteriza la estacionalidad y naturaleza del MP depositado en las marismas de la Bahía de Cádiz. Los resultados sugieren que la tasa de deposición de PM en las marismas de la Bahía de Cádiz está muy relacionada con la elevación y la estación del año. La tasa de deposición disminuye con el aumento de la elevación y los valores son más altos en primavera que en invierno. El contenido de materia orgánica (%MO) del MP depositado muestra el patrón opuesto, con un aumento del %MO con la elevación y valores más altos en invierno que en primavera. Estos resultados aportan las primeras pruebas sobre la posible importancia del material particulado alóctono en el entierro de C azul en las marismas de la Bahía de Cádiz

Palabras clave: MOP, marismas, Bahía de Cadiz, sedimentación, carbono azul

1. Introducción

Las marismas mareales proporcionan servicios ecosistémicos muy importantes, entre los que destacan los servicios de protección frente al riesgo de inundación costera y el enterramiento de carbono azul (Barbier et al. 2011). Lamentablemente, el futuro de estos importantes ecosistemas costeros vegetados está fuertemente amenazado por gran parte de los escenarios previstos de aumento de nivel del mar (Wu et al. 2017). Uno de los procesos clave para la supervivencia de estos sistemas a dichos escenarios, y para el mantenimiento de sus servicios ecosistémicos, es la captura de material particulado y la naturaleza del mismo (Temmerman et al. 2004, Kelleway

et al. 2016). La captura de material particulado permite la adaptación de la elevación del sistema al incremento del nivel medio del mar (Friess et al. 2012), y la naturaleza de dicho material (orgánica vs inorgánica) puede incrementar la capacidad del sistema para enterrar de carbono azul (Komada et al. 2022).

Lamentablemente, son pocos los trabajos que cuantifican las tasas de deposición de sedimentos en sistemas costeros vegetados y menos aún los que analizan la naturaleza de dicho material. Es por eso que el objetivo de este trabajo es cuantificar y caracterizar el material particulado que se deposita en los diferentes horizontes de la marisma mareal de la Bahía de Cádiz y evaluar si estos procesos muestran algún patrón estacional.

2. Área de estudio

El presente trabajo se desarrolla en la Bahía de Cádiz ubicada en la costa suroeste de la Península Ibérica, y abierta al Océano Atlántico en su margen noroccidental (Fig. 1.A). Esta zona está sometida a un clima mediterráneo, alcanzando temperaturas máximas en verano y una media anual de 17°C. La Bahía de Cádiz está sometida a vientos persistentes, principalmente de levante y de poniente. Las precipitaciones tienen un marcado régimen estacional (moderadas en invierno, muy escasas en verano) y una media anual de 700 mm/año (Junta de Andalucía, 2015).

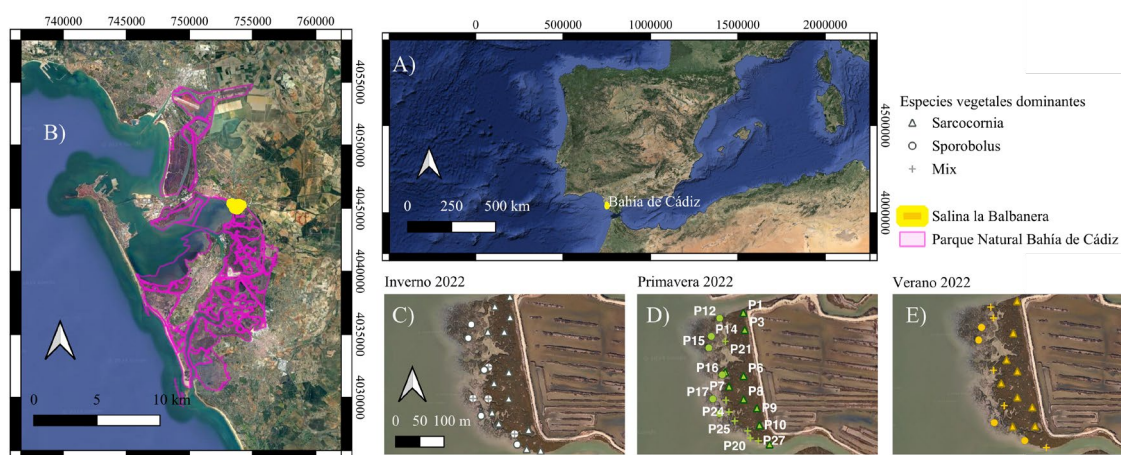


Fig. 1. Localización de la Bahía de Cádiz en la Península Ibérica (A) y de la zona de trabajo dentro de la bahía (Salina de la Balbanera, B). Localización de los puntos de muestreo en las estaciones de invierno, primavera y verano de 2022 (C, D y E respectivamente). En primavera se especifica el nombre de los puntos de muestreo. El camino de color albero en las figuras C-D corresponde a la vuelta de fuera de la Salina de Balbanera.

La Bahía de Cádiz está formada por dos cuerpos de agua (Fig. 1.B) comunicados entre sí por el estrecho de Puntales. El régimen mareal es mesomareal semidiurno con un rango máximo de 3.5 m (Álvarez et al., 1999). El cuerpo de agua externo (saco externo) presenta una profundidad media de 12 metros, mientras que el interno (saco interno) presenta una profundidad media de 2 metros respecto del cero hidrográfico (Jiménez-Arias et al., 2020). El saco interno tiene una extensión de 3399 ha, donde un 70% es zona intermareal con una presencia mayoritaria de arcillas y limos (Martín et al., 2003). La marea puede renovar hasta un 75 % de la columna de agua durante el ciclo mareal. Esta zona está protegida del oleaje oceánico por el tómbolo de la ciudad de Cádiz, aunque si esta afectada por el oleaje generado por fuertes vientos locales y por el intenso viento de levante (Álvarez et al., 1999).

La zona intermareal se caracteriza por la presencia de marismas y praderas de fanerógamas marinas (de los Santos et al., 2023) asentadas sobre sedimentos fangosos provenientes fundamentalmente del río Guadalete (Caporizzo et al., 2021). De mayor a menor elevación, la zonación vegetal incluye por encima del nivel medio del mar (NMM) una banda dominada por *Sarcocornia* spp. en la marisma media y otra banda dominada por *Sporobolus maritimus* en la marisma baja. Por debajo del nivel medio del mar (NMM) dominan las praderas de fanerógamas marinas incluyendo una franja de *Zostera noltei* en las elevaciones más cercanas al NMM y posteriormente de *Cymodocea nodosa* (puntualmente también se observan manchas de *Zostera marina*; Brun et al., 2015). Por último, en las elevaciones más bajas de la zona submareal es muy abundante la presencia de la macroalga enraizante *Caulerpa prolifera* (Peralta et al., 2021; de los Santos et al., 2023).

La Bahía de Cádiz está rodeada por 5 núcleos urbanos (Fig. 1.B), que juntos forman la cuarta aglomeración urbana más importante de Andalucía, (Junta de Andalucía, 2015). Este alto grado de antropización se considera responsable de numerosos impactos, entre los que destacan la desecación de marismas para usos industriales y agrícolas (López-Herrera et al., 2020). Entre estos impactos, destaca especialmente la modificación del ciclo de agua para usos salineros y acuícolas. Esta última práctica tiene raíces ancestrales, y a día de hoy más del 80% de la superficie de las marismas mareales ha sido transformada en salinas (Gracia et al., 2017). A pesar de estos impactos, la mayoría de las zonas intermareales de la Bahía de Cádiz se consideran en buen estado, estando protegidas como Parque Natural (Ley 2/1989/CA) (de los Santos et al., 2023), zona RAMSAR (1265, 24/10/02) y Lugar de Importancia Comunitaria (LIC ES0000140) dentro de la Red Natura 2000.

Para desarrollar este estudio, se seleccionó como zona de trabajo la marisma natural situada frente a la salina de la Balbanera (Fig. 1.C-D). Esta zona está ubicada en la región noroeste del saco interno y presenta un excelente desarrollo de la vegetación de marisma y un fácil acceso.

3. Material y métodos

Los datos meteorológicos diarios se han descargado de la plataforma de open data de la AEMET (Cádiz, estación 5973). Las tasas de deposición de material particulado y la naturaleza de dicho material se estimó con el uso de trampas de sedimentación. Las trampas están construidas por fragmentos de tubo de PVC (9 cm de diámetro y 12 cm de altura) que en su interior albergan 12 tubos más pequeños (1 cm diámetro x 10 cm de altura) que evitan la resuspensión del material depositado.

El diseño experimental incluyó 20 trampas repartidas homogéneamente por la superficie de la marisma vegetada asegurando una separación mínima de 20 m entre trampas (Fig. 1. C-E). La ubicación precisa se tomó mediante un GPS diferencial (RTK-DGPS Leica 900). Entre invierno y verano de 2022, cada trampa fue instalada al comienzo de la estación y recogida al final de la misma. El material particulado se extrae de las trampas mediante lavado con agua a presión. La solución de agua y material particulado resultante se deja sedimentar durante 4 días, tras lo cual, se elimina gran parte del agua sobrenadante y se seca el material depositado en la estufa a 60°C hasta alcanzar un peso estable. La tasa de deposición del material particulado se estima según la ecuación 1.

$$TD = \frac{PS}{\pi r^2 \Delta t} \quad (1)$$

Donde TD ($\text{gPS m}^{-2} \text{d}^{-1}$) es la tasa de deposición en; PS (g) el peso seco del material particulado recogido en la trampa, r (m): el radio de la trampa de sedimento y Δt (d): el tiempo transcurrido entre la ubicación y la recogida de las trampas.

Una vez seco, el contenido en materia orgánica (MO, %PS) del material particulado de las trampas se estimó mediante el método de *lost-on-ignition* (LOI) con muestras de aproximadamente 0.5 g de PS mediante una combustión a 450° durante 4h (Heiri et al. 2001).

Para extrapolar los resultados a las tasas anuales de deposición de c-orgánico alóctono, se consideraron la proporciones MO / c-orgánico publicadas para sedimentos de la Bahía de Cádiz. *Sporobolus*: $\text{CO} (\% \text{PS}) = 0.461 * \text{MO} - 0.266$ (de los Santos et al. 2023) y *Sarcocornia*: $\text{CO} = 0.553 * \text{MO} - 1.624$ (estación TOR.M, Díaz-Almela et al. 2019).

Los resultados se ajustaron a modelos lineales, utilizando como predictores elevación y estacionalidad. Las asunciones del modelo se comprobaron gráficamente sobre los residuos de los mismos.

4. Resultados

En el interior de la Bahía de Cádiz, el oleaje generado por el viento local es el principal agente en generar la resuspensión, por lo tanto, es esperable que los periodos de vientos intensos se correspondan con momentos de gran resuspensión del material particulado. Durante el año de este estudio (2022), el viento en condiciones de estabilidad atmosférica osciló entre 10 – 20 km h^{-1} , mientras que en momento de temporal soplaron vientos entre 25 – 50 km h^{-1} con una clara componente de levante (Fig. 2). La incidencia de temporales de levante fue mayor en invierno y primavera, si bien el evento más prolongado se produjo en verano.

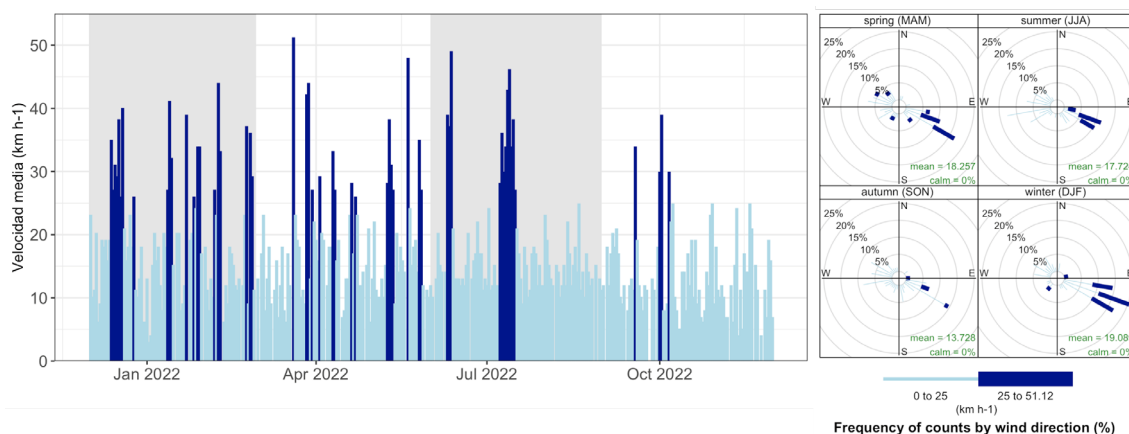


Fig. 2. Velocidad media del viento en la Bahía de Cádiz durante el periodo de estudio. Las barras oscuras corresponden a condiciones de velocidad media del viento superiores a 25 km h⁻¹. Las zonas sombreadas en gris representan las estaciones de invierno y verano de 2022. La figura de la derecha representa la dirección e intensidad del viento.

Los resultados de las trampas de sedimentación (Fig. 3) sugieren que la tasa de deposición está significativamente afectada por la elevación y la estación del año (Fig. 3), con un claro descenso de la deposición de material particulado con el aumento de elevación y unas tasas significativamente mayores en primavera que en invierno (Tabla 1).

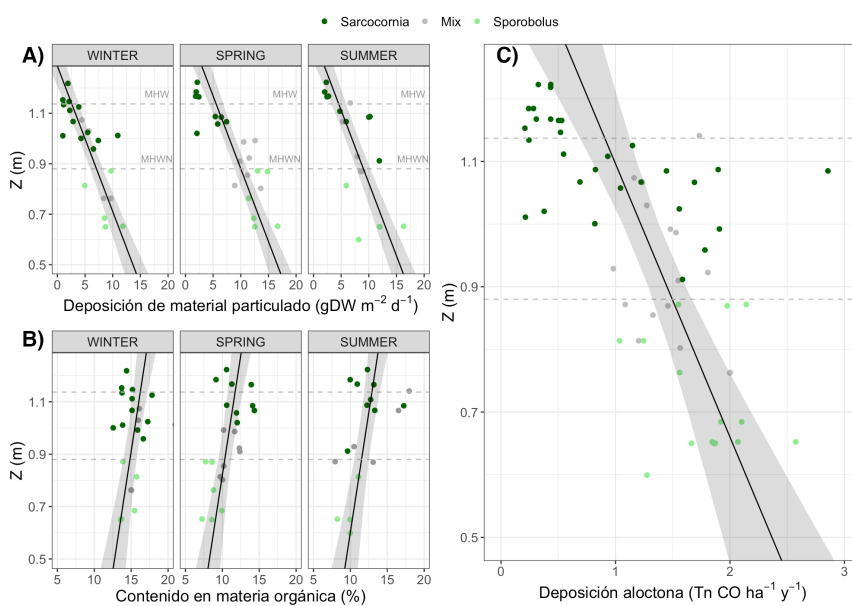


Fig. 3. Evolución temporal del material particulado depositado según la elevación en las marismas de la Balbanera (Bahía de Cádiz). A) Tasas de deposición de material particulado. B) Porcentaje de materia orgánica en el material particulado depositado. C) Estimaciones de deposición de carbono orgánico alóctono. Las elevaciones están referidas al nivel medio del mar local. Las líneas horizontales discontinuas representan la elevación del nivel medio de marea alta muerta (MHWN por sus siglas en inglés) y nivel medio de marea alta (MHW). Los datos corresponden al año 2022. La línea negra continua representa el modelo lineal con mejor ajuste (ver Tabla 1), las zonas sombreadas corresponden al 95% intervalo de confianza del correspondiente modelo.

Por el contrario, el contenido en materia orgánica (%MO) mostró un patrón opuesto. Con un aumento del %MO con la elevación y un mayor %MO en invierno que en primavera y verano (Fig. 3, Tabla 1). Extrapolando estos resultados a los valores de carbono orgánico encontrados en la materia orgánica de los sedimentos vegetados de la Bahía de Cádiz, se estima que la marisma de la Bahía de Cádiz podría estar atrapando alrededor de 1.3 Tn c-org ha⁻¹ a⁻¹ (Fig. 3). Este valor no parece estar afectado por la estacionalidad (Tabla 1), pero sí por la elevación, observándose un descenso del CO alóctono atrapado con la elevación. Este patrón está muy vinculado a la tasa de

deposición de material particulado y sugiere que, a escala anual, la marisma baja atrapa más c-orgánico que la marisma media.

Tabla 1. Análisis estadístico de los efectos de la elevación y la estacionalidad en la tasa de deposición de sedimento (TD, $\text{gPS m}^{-2} \text{d}^{-1}$), el porcentaje de materia orgánica del material depositado (MO, %PS) y la estimación de carbono orgánico alóctono depositado (OC, $\text{Tn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$). Z: Elevación con respecto al NMML, INV, PRI y VER las correspondientes estaciones del año. F: estadístico F, ADJ. R²: r² ajustado al número de predictores, GL: grados de libertad para el numerador (n) y el denominador (d). El código alfabético junto a los coeficientes estacionales indica diferencias significativas en caso de no coincidencia.

modelo	Z	INV	PRI	VER	ADJ. R ²	F	GLn / GLd
TD ~ Z + ESTACIÓN	-17.35***	22.33 ^a	25.27 ^b	24.28 ^{ab}	0.64	36.49***	3 / 58
MO ~ Z + ESTACIÓN	5.46***	10.03 ^b	5.52 ^a	6.71 ^a	0.54	24.81***	3 / 58
OC ~ Z	-2.29***	n.s.			0.31	27.99***	1 / 60

p-valor: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 'n.s.' no significativo

5. Discusión

La deposición de material particulado es un proceso fundamental en dinámica de las marismas mareales, afectando por tanto a sus servicios de protección frente al riesgo costero y de enterramiento de C-azul (Amann et al. 2023). El presente trabajo muestra la variabilidad de las tasas de deposición de material particulado, y la naturaleza de mismo, en una de las marismas más meridionales de Europa como es la Bahía de Cádiz. La elevación se presenta como una variable clave para entender los patrones espaciales de deposición, mientras que la estación del año explica los patrones temporales. En sistemas como la Bahía de Cádiz, protegidos frente al oleaje oceánico, el oleaje generado localmente representa una variable clave en la resuspensión de sedimento (Achab y Manning, 2013). El viento resuspende el material depositado en las primeras capas del sedimento, más rico en materia orgánica que capas más profundas (de los Santos et al. 2023). Esto explica el patrón temporal observado tanto para la deposición de sedimento como para el contenido en MO, ambos claramente con valores mayores en invierno cuando se registra el mayor número de temporales de viento.

Sin duda alguna una variable determinante en los patrones espaciales de deposición de sedimento es la elevación que ocupa la zona en el recorrido de la marea (REF). Las marismas mareales ocupan la franja intermareal por encima del nivel medio del mar (MSL por sus siglas en inglés). En el caso de la Bahía de Cádiz, estas marismas están pobladas principalmente por *Sporobolus maritimus*, que domina las elevaciones más bajas (MSL-MHWN, marisma baja), y *Sarcocornia* spp que domina las elevaciones intermareales por encima del nivel medio de marea alta muerta (MHWN – MHW, marisma media) (García de Lomas et al., 2008). Con esta zonación, los predictores elevación y especie dominante son claramente colineales (no independientes) y por lo tanto, con datos campo no se puede discriminar la contribución de la vegetación dominante dentro del efecto descrito para la elevación, pero tampoco se puede descartar. En cualquier caso, el poco material particulado que alcanza las zonas más elevadas, claramente es un material más enriquecido en MO, aumentando la contribución relativa de la producción alóctona al servicio de enterramiento de C-azul de las franjas de *Sarcocornia*.

Utilizando los valores de materia orgánica y carbono orgánico publicados para los sedimentos de las marismas de la Bahía de Cádiz (de los Santos et al. 2023, Díaz-Almela et al. 2019) se puede estimar una primera aproximación de cual sería la contribución alóctona a los stocks de carbono azul del sistema, asumiendo que todo el material capturado en las trampas sea alóctono y permaneciera en el sistema. Los resultados muestran que los patrones de MP depositado y %MO se compensan lo suficiente como para amortiguar las diferencias estacionales, pero no para compensar las diferencias espaciales (i.e. elevación). El resultado es que se estima una contribución promedio de c-orgánico alóctono de $1.3 \text{ Tn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Fig. 3), aunque los valores pueden oscilar entre 0.7 y $1.8 \text{ Tn ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ según la elevación. Estos valores son del mismo orden de magnitud que los publicados previamente como tasas de enterramiento de c-orgánico en las marismas de la Bahía de Cádiz ($0.91 \text{ Tn c-org ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, de los Santos 2023; $0.5 - 2 \text{ Tn c-org ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, Díaz-Almela et al., 2019).

Nuestros resultados sugieren que gran parte del sedimento que se deposita en las zonas e marismas es sedimento removilizado durante los temporales de viento y no asociado a los aportes de los ríos tras los episódicos de precipitación, que en el año de seguimiento no fueron de importancia. Sin embargo, aún queda trabajo por hacer para entender cual es la contribución final del material alóctono a los stocks de c-orgánico en sistemas costeros

vegetados. El presente trabajo pone de manifiesto la necesidad de entender los procesos implicados en la fijación orgánica del carbono (producción autóctona), los procesos implicados en la desposición/erosión del material particulado y los procesos implicados en la degradación de la materia orgánica en los primeros centímetros del sedimento para entender correctamente los procesos de captación y retención del carbono orgánico (carbono azul) en los sistemas costeros vegetados.

6. Agradecimientos

Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2021-123597OB-I00 (iBESBLUE), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "FEDER Una Manera de hacer Europa", así como del proyecto MODUL, financiado por la Junta de Andalucía, PAIDI2021 PROYEXCEL_00995. 2022-2025

7. Referencias

- Achab, M. & Manning, A.J. (2013) Composition and Transport Dynamics of Suspended Particulate Matter in the Bay of Cadiz and the Adjacent Continental Shelf (SW - Spain). En: Sediment Transport Processes and Their Modelling Applications. InTechOpen. DOI:<https://doi.org/10.5772/51104>
- Amann B., Chaumillon E., Schmidt S., Olivier L., Jupin J., Perello M.C. & Walsh J.P. (2023) Multi-annual and multi-decadal evolution of sediment accretion in a saltmarsh of the French Atlantic coast: Implications for carbon sequestration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293, art. no. 108467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108467>
- Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R. (2011) The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81 (2), pp. 169 – 193. DOI: <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- Caporizzo, C., Gracia, F.J., Aucelli, P.P.C., Barbero, L., Martín-Puertas, C., Lagóstena, L., Ruiz, J.A., Alonso, C., Mattei, G., Galán-Ruffoni, I., López-Ramírez, J.A. & Higuera-Milena, A. (2021). Late-Holocene evolution of the Northern Bay of Cádiz from geomorphological, stratigraphic and archaeological data. *Quaternary International*, Volume 602, Pages 92-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.028>
- de los Santos, C.B., Egea, L.G., Martins, M. et al. (2023) Sedimentary organic carbon and nitrogen sequestration across a vertical gradient on a temperate wetland seascape including salt marshes, seagrass meadows and rhizophytic macroalgae beds. *Ecosystems*, 26, 826–842. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-022-00801-5>
- Díaz-Almela, E., Piñeiro-Juncal, N., Marco-Méndez, C., Giralt, S., Leiva-Dueñas, C., & Mateo-Minguez, M. Á. (2019). *Carbon Stocks and Fluxes Associated To Andalusian Saltmarshes and estimates of impact in stocks and fluxes by diverse land-use changes*, DELIVERABLE C2. LIFE14CCM/ES/000957. Blanes.
- Friess D.A., Krauss K.W., Horstman E.M., Balke T., Bouma T.J., Galli D. & Webb E.L. (2012) Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and saltmarsh ecosystems. *Biological Reviews*, 87 (2), pp. 346 – 366. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2011.00198.x>
- García de Lomas, J., García, C.M. & Alvarez, O. (2008) Identificación de Hábitat de interés comunitario y estimaciones preliminares de posibles efectos de su inundación. *Revista de la Sociedad Gaditana de Historia Natural* 5, 9-37. ISSN-e 2340-5759. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7335336>
- Heiri, O., Lotter, A.F. & Lemcke, G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25, 101–110. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Kelleway, J.J., Saintilan, N., Macreadie, P.I. & Ralph, P.J. (2016) Sedimentary Factors are Key Predictors of Carbon Storage in SE Australian Saltmarshes. *Ecosystems*, 19 (5), pp. 865 – 880. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9972-3>

- Komada, T., Bravo, A., Brinkmann, M.T., Lu, K., Wong L. & Shields, G. (2022). “Slow” and “fast” in blue carbon: Differential turnover of allochthonous and autochthonous organic matter in minerogenic salt marsh sediments. *Limnology and Oceanography*, 67 (S2), pp. S133 - S147.
DOI: <https://doi.org/10.1002/lno.12090>
- Temmerman, S., Govers, G., Wartel, S. & Meire, P. (2004) Modelling estuarine variations in tidal marsh sedimentation: Response to changing sea level and suspended sediment concentrations. *Marine Geology*, 212 (1-4), pp. 1 – 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.10.021>
- Wu ,W.-T., Zhou, Y.-X. & Tian, B. (2017) Coastal wetlands facing climate change and anthropogenic activities: A remote sensing analysis and modelling application. *Ocean and Coastal Management*, 138, pp. 1 – 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.005>