



Nuevos conceptos sostenibles de plantas fotovoltaicas flotantes para medio marino

KK-2023/00097

Caracterización del biofouling y sus mecanismos de degradación sobre elementos críticos del sistema flotante para el desarrollo de estrategias de mantenimiento

Versión 0.1

147de junio de 2025

Datos del entregable

Proyecto	EKIOCEAN
Nº Expediente	KK-2023/00097
Título	Nuevos conceptos sostenibles de plantas fotovoltaicas flotantes para medio marino
Programa	ELKARTEK 2023

Entregable	Caracterización del biofouling y sus mecanismos de degradación sobre elementos críticos del sistema flotante para el desarrollo de estrategias de mantenimiento
Versión	0.1
Fecha entrega	17/06/2025
Responsable	AZTI
Tarea	<i>T3.4 – Caracterización del biofouling y sus mecanismos de degradación sobre elementos críticos del sistema flotante para el desarrollo de estrategias de mantenimiento</i>
Paquete de Trabajo	<i>PT3 – Caracterización de los efectos perniciosos del mar sobre plantas FVF</i>
Equipo de trabajo	Ekaitz Erauskin, Goretti Garcia, Lander Larrañaga, Gaizka Bidegain, Rapha Yeregui

Historial de elaboración y revisión del documento

Versión	Fecha	Autor	Centro
0.1	2025	Iratxe Menchaca	AZTI
0.1	2025	María Jesús Belzunce	AZTI
0.1	2025	Iñigo Muxika	AZTI
0.1	2025	Joxe Mikel Garmendia	AZTI

Tabla de contenidos

RESUMEN EJECUTIVO	5
1. CONTEXTO	6
2. OBJETIVO	8
3. CUANTIFICACIÓN DEL <i>BIOFOULING</i>	9
4. RESULTADOS.....	11
5. CONCLUSIONES	18

RESUMEN EJECUTIVO

Las plantas fotovoltaicas flotantes representan una innovadora solución sostenible para la producción de energía renovable en entornos marinos. Este trabajo, se enmarca en el programa ELKARTEK 2023 y tiene como objetivo principal desarrollar herramientas eficientes para la identificación de emplazamientos óptimos para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes (FVF) en el medio marino.

El proyecto aborda la creciente demanda de soluciones energéticas sostenibles y la necesidad de diversificar las fuentes de energía renovable. Las plantas fotovoltaicas flotantes ofrecen varias ventajas sobre las instalaciones terrestres tradicionales, como el aprovechamiento de superficies acuáticas no utilizadas, la reducción de la competencia por el uso del suelo y la posibilidad de acceso a recursos solares en áreas con alta irradiación solar y baja densidad de población.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto se centra en desarrollar y validar nuevos conceptos de diseño para plantas fotovoltaicas flotantes que puedan resistir las condiciones adversas del medio marino, como las olas, el viento, la salinidad y la corrosión. Para ello, se han considerado diversas estrategias de ingeniería, incluyendo el uso de materiales avanzados y técnicas de anclaje innovadoras, así como el diseño de estructuras modulares y escalables que faciliten su transporte e instalación.

Concretamente en la subtarea ST3.4.1 relativa a la caracterización del *biofouling* en el entorno marino (ensayos en campo), se ha elaborado el presente documento, que incluye los principales resultados del monitoreo del *biofouling* para evaluar la efectividad de diferentes recubrimientos *antifouling* biobasados (látex) desarrollados en el PT2 (Investigación sobre materiales para sistemas de flotación), liderado por UPV/EHU (POLYMAT).

1. CONTEXTO

La caracterización del *biofouling* se ha realizado sobre un total de **45 probetas** de hormigón, proporcionadas por Tecnalía, y cubiertas con 4 recubrimientos o tratamientos *antifouling* biobasados (látex) desarrollados por UPV/EHU (POLYMAT). Cada probeta tiene forma de prisma, con un tamaño de base 4 cm x 4 cm y altura de 8 cm (Figura 1).



Figura 1. Probetas de hormigón proporcionadas por Tecnalía y cubiertas con 4 recubrimientos o tratamientos *antifouling* biobasados (látex) desarrollados por UPV/EHU (POLYMAT).

Para dicha tarea, en **junio de 2024**, las probetas se colocaron en dos zonas de ensayo en el Puerto de Pasaia (Figura 2).

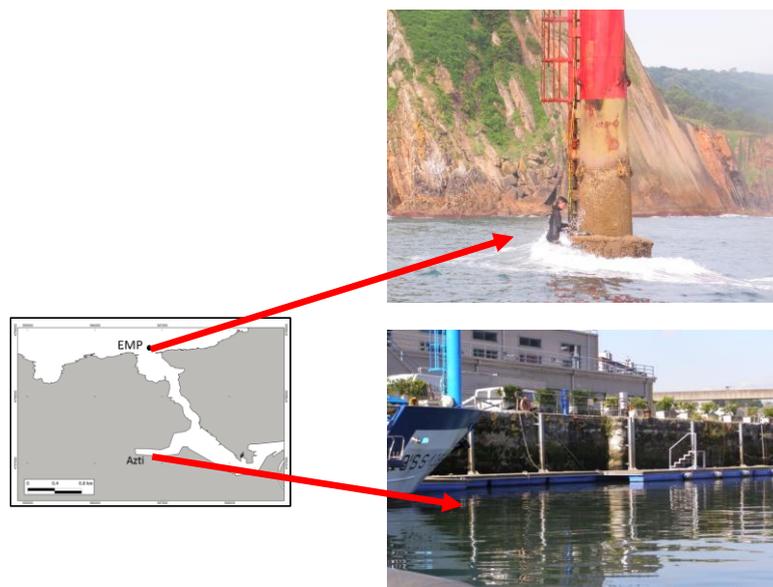


Figura 2. Localización de las dos zonas de ensayo en el Puerto de Pasaia (Gipuzkoa): zona exterior, en la estación océano-meteorológica (EMP) (foto de arriba) y zona interior, frente a AZTI, en el pantalán (foto de abajo).

Las probetas se colocaron a una profundidad de 1 m de la superficie, siempre sumergidas, en ambas zonas de ensayo, y en la zona de *splash* (o zona de salpicadura, franja más alta de la zona intermareal) sólo en la zona exterior (Figura 3):

- Zona interior: 3 réplicas x 4 tratamientos x 1 profundidad = 12 + 3 sin recubrir (control) = 15 probetas
- Zona exterior: 3 réplicas x 4 tratamientos x 2 profundidades = 24 + 6 sin recubrir (control) (3 en cada profundidad) = 30 probetas



Figura 3. Colocación de las probetas en junio de 2024 en la zona intermareal o zona de *splash* (izquierda) y en la zona submareal (derecha) de la estación océano-meteorológica de Pasaia (Gipuzkoa).

Una vez colocadas las probetas, se ha hecho un seguimiento cada tres meses (septiembre 2024, diciembre 2024 y marzo 2025). En cada visita se han tomado fotos y, en la última visita en **marzo 2025**, las probetas **han sido retiradas** para su posterior análisis en el laboratorio.

2. OBJETIVO

En este contexto, el **objetivo** del presente informe consiste en evaluar la posible efectividad de diferentes recubrimientos *antifouling* biobasados a partir de la caracterización del *biofouling* tras 10 meses de ensayo en un entorno marino.

3. CUANTIFICACIÓN DEL *BIOFOULING*

Por un lado, la cuantificación del *biofouling* se realizó mediante el **análisis de las fotografías** tomadas a cada probeta durante las diferentes visitas realizadas al área de ensayo, según la metodología descrita por Menchaca et al. (2014)¹. Cada fotografía fue procesada por medio del software *ImageJ*. Dicho software es un programa de análisis de imagen de dominio público Java inspirado por NIH Image para Macintosh. Sus versiones para Windows, Mac OS, Mac OS X y Linux están disponibles en la web: <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. Además, existe una Wiki de ayuda al usuario: <http://imagejdocu.tudor.lu/doku.php>. De esta manera, *ImageJ* genera una nube de puntos por cada fotografía (entre 100-150 puntos por imagen) y a cada punto se le asigna un valor en base a la presencia del *biofouling* (Figura 4). En cada una de las visitas realizadas se calculó la **cobertura relativa** (en tanto por 1) y la **riqueza** o el número de especies totales en cada probeta.

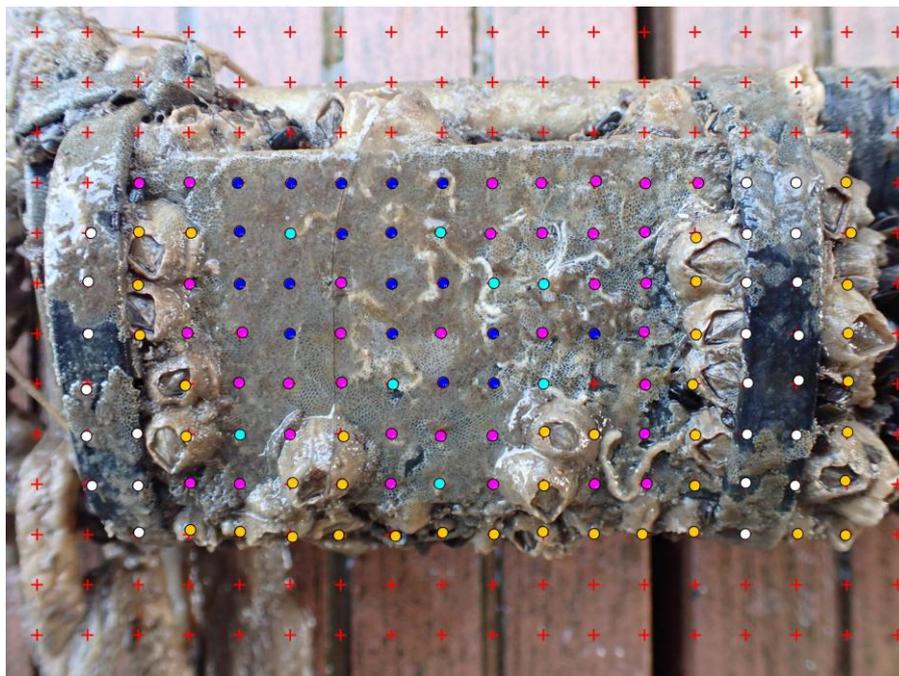


Figura 4. Cuantificación del *biofouling* mediante el software *ImageJ* sobre la fotografía tomada a la probeta.

¹ Menchaca, I., Zorita, I., Rodríguez-Ezpeleta, N., Erauskin, C., Erauskin, E., Liria, P., Mendibil, I., Santesteban, M., Urtizberea, I., 2014. Guide for the evaluation of biofouling formation in the marine environment. *Revista de Investigación Marina, AZTI-Tecnalia*, 21(4): 89-99

El análisis del *biofouling* se realizó a ciegas, es decir, las fotografías que se recibieron posterior a cada visita estaban identificadas con un código, el cual no permitía identificar el tipo de material o el recubrimiento de cada probeta.

Por otro lado, en marzo 2025, una vez en el laboratorio, el *biofouling* de cada probeta fue **identificado** y posteriormente raspado para el cálculo de la **biomasa** (Figura 5).



Figura 5. Identificación del *biofouling*, raspado de las probetas y cálculo de la biomasa del *biofouling*.

4. RESULTADOS

Respecto al **análisis de imagen**, en la Figura 6 se muestran los resultados de la **cobertura relativa** promedio del conjunto de especies del *biofouling* sobre las probetas de hormigón, colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de septiembre, noviembre del 2024 y marzo del 2025.

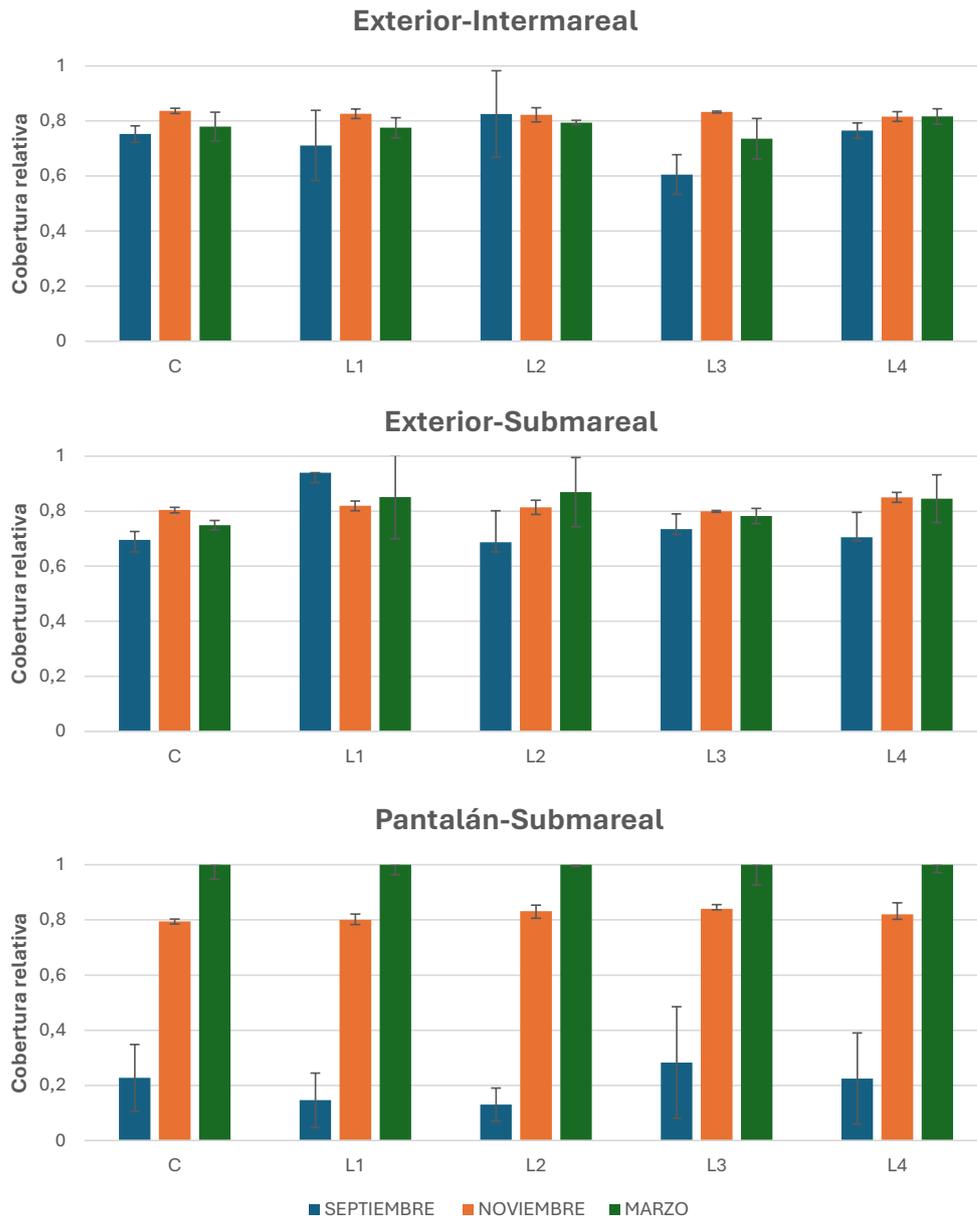


Figura 6. Cobertura relativa promedio (tanto por 1) del *biofouling* sobre las probetas de hormigón colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de septiembre, noviembre del 2024 y marzo del 2025. Control (C) y tratamientos-látex L1, L2, L3 y L4.

De forma general, en casi todas las probetas en las tres localizaciones, tanto en las control - sin tratamiento (C) como en aquellas con un recubrimiento de látex (L) (a excepción de L1 y de L3) se aprecia un aumento de la cobertura entre el primer (septiembre), el segundo (noviembre) y el tercer muestreo (marzo), de forma más acusada en las probetas situadas en la zona submareal del interior del puerto, en el pantalán. **El único tratamiento que mostró una cobertura relativa significativamente menor respecto a las probetas control fue el tratamiento de látex L3 en la zona exterior en el intermareal ($p < 0,05$).** En este sentido, en la Figura 7 se aprecia una menor cobertura de *biofouling* en una de las réplicas del tratamiento de látex L3 en la zona exterior en el intermareal respecto al resto de probetas, donde también se puede observar que tras 10 meses de exposición en la zona de *splash*, el recubrimiento de dicho tratamiento aún permanece en la superficie de la probeta y ha evitado el crecimiento de organismos incrustantes, como sí ocurre en superficies contiguas.



Figura 7. Imagen de las probetas colocadas en la zona exterior intermareal (zona *splash*) tomadas en el último muestreo de marzo del 2025. Ampliación de la imagen de una probeta del tratamiento de látex L3, donde se observa parte del recubrimiento de dicho tratamiento y ausencia de organismos incrustantes.

Por otro lado, en la Figura 8 se muestran los resultados de la **riqueza** promedio o promedio del total de especies identificadas sobre las probetas, colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de septiembre, noviembre del 2024 y marzo del 2025.

De forma general, en ambas localizaciones y en todas las probetas, tanto en las control - sin tratamiento (C) como en aquellas con un recubrimiento de látex (L) (a excepción de L1 y de L3) se aprecia un aumento de la riqueza entre el primer (septiembre) y el segundo muestreo (noviembre), de forma más acusada en las probetas situadas en la

zona submareal tanto del exterior como del interior del puerto. Por otro lado, con la excepción del L1 y L4 en el intermareal, en el resto de los casos se observa una ligera disminución en el número de especies en el tercer muestreo (marzo). De todos modos, **ningún tratamiento mostró una riqueza significativamente menor respecto a las probetas control en ninguna de las zonas de estudio durante los distintos periodos de monitoreo.**

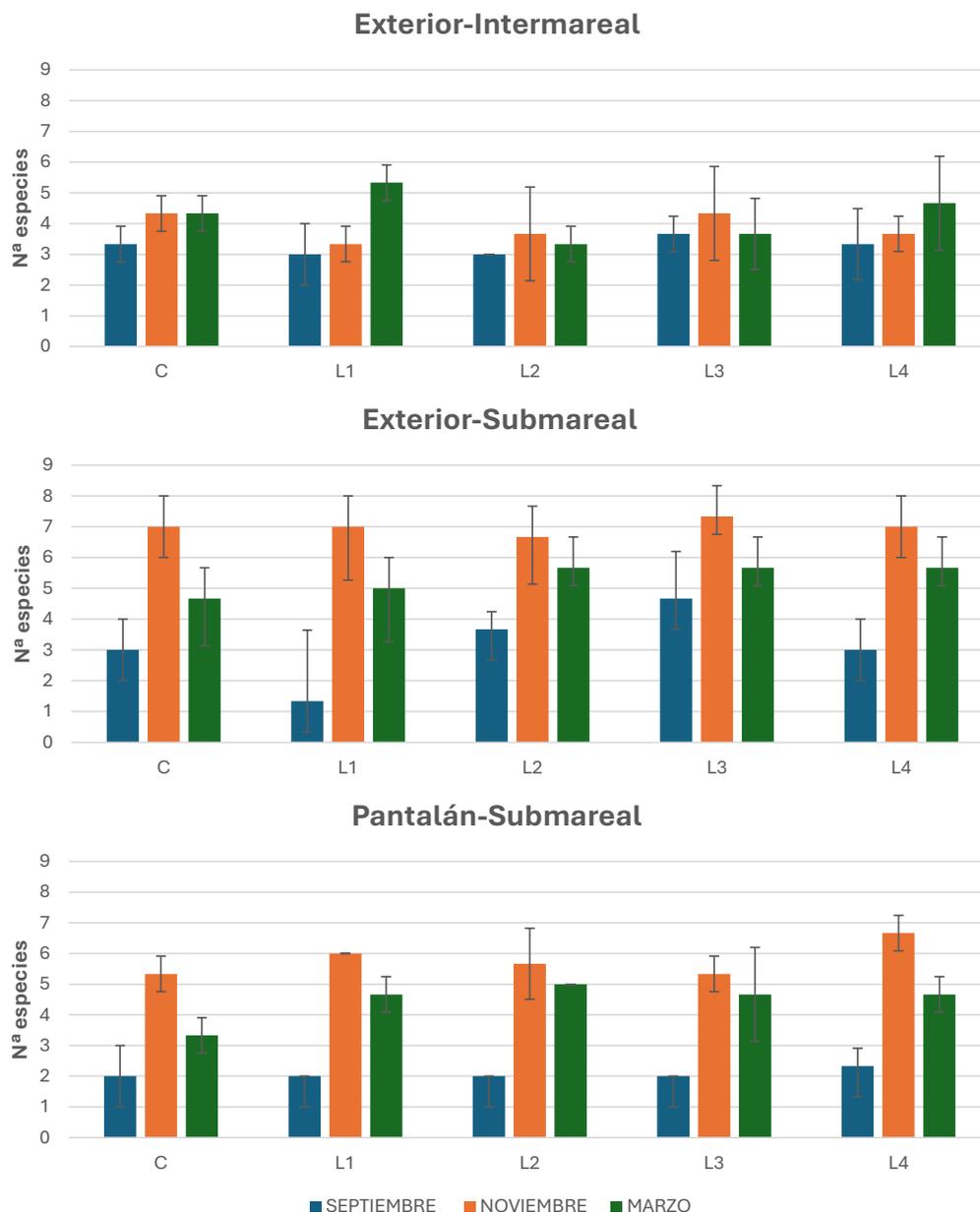


Figura 8. Riqueza promedio o promedio del total de especies del *biofouling* identificadas sobre las probetas de hormigón colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de septiembre, noviembre del 2024 y marzo del 2025. Control (C) y tratamientos-látex L1, L2, L3 y L4.

En la Figura 9 se muestran los resultados de la **biomasa** promedio a partir del *biofouling* raspado de las probetas colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), en el monitoreo de marzo del 2025.

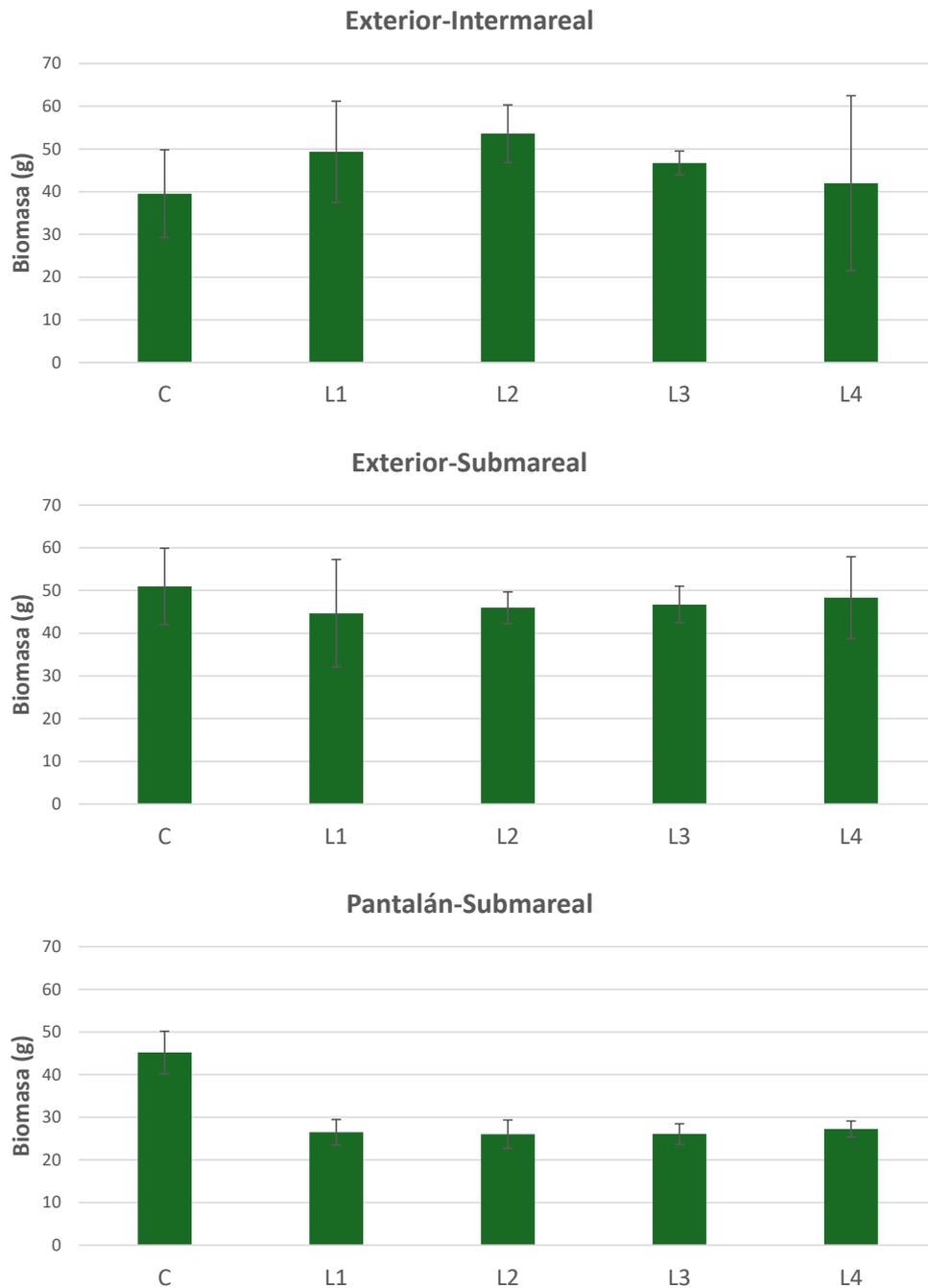


Figura 9. Biomasa promedio de *biofouling* sobre las probetas de hormigón colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de marzo del 2025. Control (C) y tratamientos-látex L1, L2, L3 y L4.

La biomasa promedio en las probetas cubiertas con los cuatro tratamientos fue significativamente menor respecto a las probetas control en el submareal de la zona interior del puerto (en el pantalán) ($p < 0,05$).

Por último, en la Tabla 1 se incluye la **identificación del *biofouling*** realizado en el laboratorio tras la retirada de las probetas en marzo de 2025, en las tres zonas de estudio durante los 10 meses que ha durado el ensayo.

Tabla 1. Identificación del *biofouling* realizado sobre las probetas de hormigón colocadas en la zona exterior intermareal, exterior submareal y en la zona interior submareal (pantalán), obtenidos durante el monitoreo de marzo del 2025. Control (C) y tratamientos-látex L1, L2, L3 y L4.

Zona Exterior	Intermareal	Probeta	Biofouling
		C-1	<i>Chthamalus</i> sp., <i>Anomia ephippium</i> , Chlorophyceae
		C-2	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae, <i>Mytilus galloprovincialis</i> , <i>Pollicipes pollicipes</i>
		C-3	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L1-1	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L1-2	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L1-3	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L2-1	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L2-2	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L2-3	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L3-1	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L3-2	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L3-3	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L4-1	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L4-2	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
		L4-3	<i>Chthamalus</i> sp., Chlorophyceae
Zona Exterior	Submareal	Probeta	Biofouling
		C-1	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa
		C-2	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera
		C-3	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera
		L1-1	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa
		L1-2	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Bryozoa, Porifera, <i>Mytilus</i> sp.
		L1-3	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera, <i>Anomia ephippium</i> ?
		L2-1	<i>Chthamalus</i> sp., Clorophyceae, Rhodophyceae, Anthozoa, <i>Anomia ephippium</i>
		L2-2	<i>Chthamalus</i> sp., Serpulidae, Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa
		L2-3	<i>Chthamalus</i> sp., Serpulidae, Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa
		L3-1	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera



Zona Exterior	Intermareal	Probeta	Biofouling
		L3-2	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, <i>Anomia ephippium</i>
		L3-3	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera
		L4-1	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Porifera
		L4-2	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, Bryozoa, Serpulidae
		L4-3	<i>Chthamalus</i> sp., Rhodophyceae, Anthozoa, <i>Anomia ephippium</i> , Porifera
Zona Interior	Submareal	Probeta	
		Probeta	
		C-1	Chloroficeae
		C-2	Chloroficeae, Cirripedia, Rhodoficeae
		C-3	Chloroficeae, Cirripedia
		L1-1	Chloroficeae, Briozoa?, Rhodoficeae?
		L1-2	Chloroficeae, Cirripedia, <i>Chthamalus</i> sp., Porifera?
		L1-3	Chloroficeae, Cirripedia
		L2-1	Chloroficeae
		L2-2	Chloroficeae, Rhodoficeae
		L2-3	Chloroficeae
		L3-1	
		L3-2	
		L3-3	Chloroficeae, Cirripedia
		L4-1	Chloroficeae, Cirripedia
		L4-2	Chloroficeae, Cirripedia
		L4-3	Chloroficeae, Cirripedia

5. CONCLUSIONES

Los resultados de biomasa significativamente menor observados en los cuatro tratamientos respecto a los resultados observados en las probetas control de la zona interior submareal podrían estar relacionados con un posible mayor lavado, y consecuente disminución del efecto de los tratamientos en el exterior como consecuencia de un mayor hidrodinamismo y zona de splash respecto a la zona interior. Esta mayor efectividad observada en los tratamientos testados en la zona interior submareal podría contribuir a mejorar futuros diseños orientados a incrementar la durabilidad de los tratamientos.
