



Nuevos conceptos sostenibles de plantas fotovoltaicas flotantes para medio marino

KK-2023/00097

Entregable E3.2

Recomendaciones para la evaluación y el mantenimiento de instalaciones de fotovoltaica flotante frente al desarrollo de incrustaciones biológicas

Versión 0.1

8 de mayo 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	E3.2 – Recomendaciones para la evaluación y el mantenimiento de instalaciones de fotovoltaica flotante frente al desarrollo de incrustaciones biológicas
Versión	0.1
Fecha entrega	08/05/2025
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>

Historial de elaboración y revisión del documento

Versión	Fecha	Autor	Centro
0.1	2025	Natalia Montero	AZTI
0.1	2025	Iratxe Menchaca	AZTI
0.1	2025	Javier Franco	AZTI
0.1	2025	Juan Bald	AZTI

Tabla de contenidos

RESUMEN EJECUTIVO	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVO	10
3. ORGANISMOS CAUSANTES DE LA DEGRADACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SUMERGIDAS.....	11
4. CUANTIFICACIÓN DEL <i>BIOFOULING</i>	19
5. MODOS DE FALLO CAUSADOS POR EL DESARROLLO DE LAS INCRUSTACIONES BIOLÓGICAS.....	25
6. ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LAS INCRUSTACIONES BIOLÓGICAS	35
6.1 Medidas preventivas.....	36
6.2 Medidas reactivas.....	42
7. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO PARA INSTALACIONES FV FLOTANTES	48
7.1 Factores condicionantes del desarrollo del biofouling en las estructuras FSPV	49
7.2 Opciones de mantenimiento para las estructuras FSPV	53
8. CONCLUSIONES	62
9. BIBLIOGRAFIA	64
10. ANEXO	80

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Proyecto EKIOCEAN, concretamente en la subtarea ST3.4.1 relativa a la caracterización del biofouling en el entorno marino (estado del arte y ensayos en campo), en la subtarea ST3.4.2 relativa a la caracterización de los modos de fallo causados por el biofouling en las instalaciones de energía solar fotovoltaica flotante (FSPV) y en la subtarea ST3.4.3 relativa a la identificación de estrategias para el mantenimiento de instalaciones FSPV frente al desarrollo del biofouling, se ha elaborado el presente documento, que incluye las recomendaciones para la evaluación y el mantenimiento de las estructuras FSPV frente al crecimiento de incrustaciones biológicas.

Dichas recomendaciones se basan fundamentalmente en:

- Identificar los factores que condicionan el desarrollo del biofouling, como son la zona biogeográfica, los factores bióticos y abióticos, las características y localización de las estructuras.
- Aplicar medidas preventivas y reactivas, combinando métodos físicos/químicos con revestimientos eficientes que sean ambientalmente seguros, efectivos contra el biofouling y la corrosión, y de bajo coste.
- Realizar el monitoreo del biofouling para evaluar/garantizar la efectividad de las medidas preventivas y reactivas, y programar adecuadamente el mantenimiento de las estructuras FSPV, prolongando su vida útil y maximizando su funcionamiento.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica desempeña actualmente un papel clave en la transición a las energías renovables, debido a su potencial para satisfacer la demanda mundial de energía y al descenso de los costes de esta tecnología, lo que ha permitido un uso más extensivo. En los últimos años, los proyectos de energía solar fotovoltaica flotante (FSPV) han experimentado un crecimiento exponencial, con aumentos anuales del 133% en la última década, debido a las diversas ventajas que ofrecen sobre otros tipos de instalaciones solares fotovoltaicas. Las instalaciones de FSPV están presentes en más de 60 países, y habiendo alcanzado la capacidad de 3 GW en 2021 (Figura 1), se espera un aumento hasta 10-30 GW en 2030 (Shi et al., 2023). Los sistemas FSPV muestran una productividad superior que los sistemas fotovoltaicos terrestres, con un 12-13% de mayor eficiencia de los módulos fotovoltaicos (Yadav et al., 2016). Estos sistemas se han colocado mayoritariamente en lagos, estanques, embalses de presas y centrales térmicas, cuencas hidrográficas, canteras mineras y plantas de tratamiento de agua, extendiéndose su uso en los últimos años a otros cuerpos de agua, como el medio marino (Sen et al., 2021; Claus y López, 2022; Amer et al., 2023; Djalab et al., 2024).

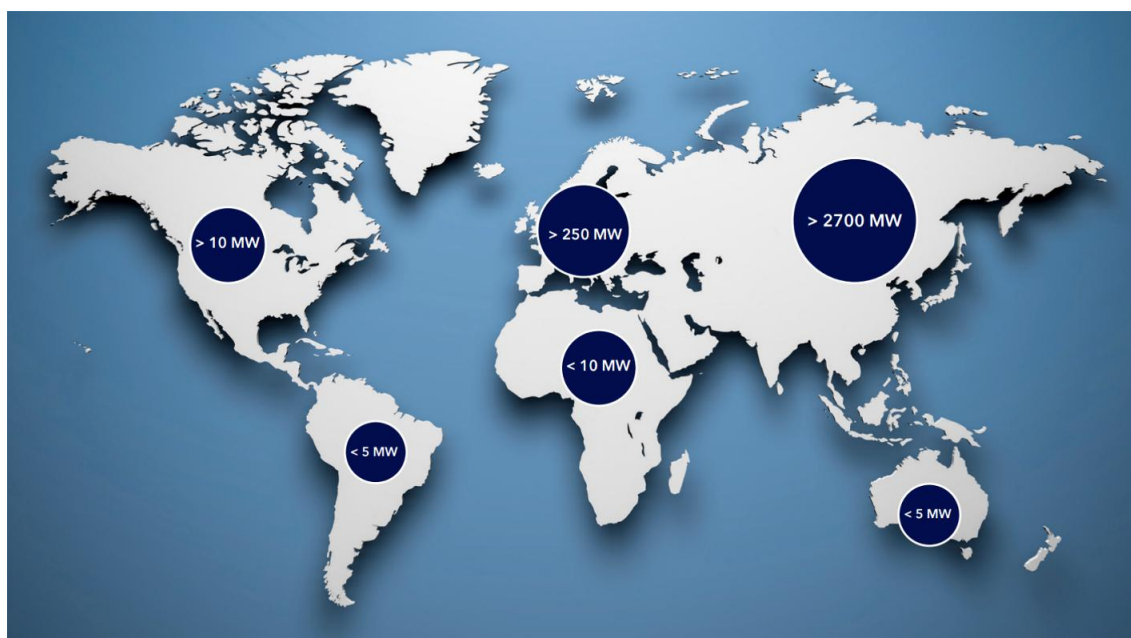


Figura 1. Instalación mundial de plantas FSPV en 2021, con una producción total de 3 GW (Djalab et al., 2024).

Según el último informe de Solar Power Europe (2023), los sistemas FSPV en el medio marino pueden clasificarse entre fotovoltaica flotante cerca de la costa y en alta mar, lo que viene definido por las condiciones específicas de olas y viento:

- FSPV cerca de la costa (*onshore*): cualquier ubicación en áreas protegidas con una altura significativa de ola de hasta 2-3 m.
- FSPV en alta mar (*offshore*): cualquier ubicación en aguas no protegidas con una altura significativa de ola superior a 2-3 m.

La mayoría de los proyectos de FSPV se están desarrollando en Asia, con China como el principal país promotor, pero consisten mayoritariamente en estructuras instaladas en masas de agua dulce. Actualmente, los proyectos piloto de FSPV *offshore* se encuentran predominantemente en Europa (Figura 2), gracias al creciente número de políticas de apoyo, aunque también se observa cierta actividad emergente en Asia-Pacífico.

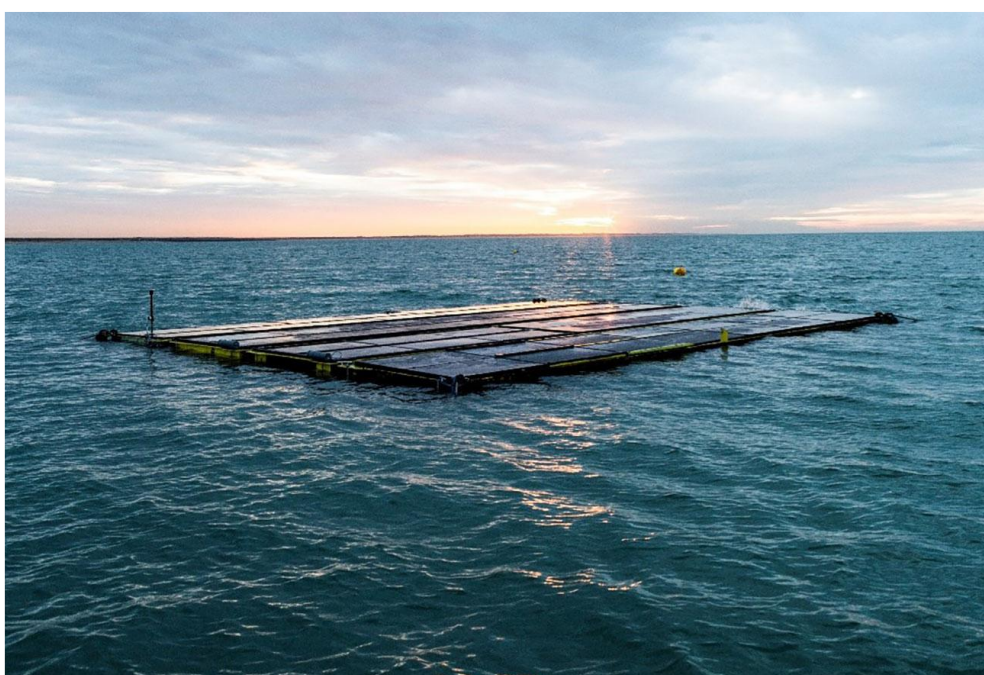


Figura 2. Imagen de dos flotadores colocados en la ubicación de Brouwersdam en la provincia de Zelanda, Países Bajos (Fuente: Oceans of Energy, Mavraki et al., 2023).

La instalación de estructuras fotovoltaicas flotantes en el medio marino presenta diferentes **ventajas**, como la mayor disponibilidad de superficie para la colocación de las estructuras, y la mayor eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos gracias al efecto refrigerante del agua y del viento y a la ausencia de sombras provenientes de otras infraestructuras (Ramanan et al., 2024). Además, en comparación con los aerogeneradores en el entorno marino, tiene un impacto visual muy bajo, lo que significa que se enfrenta a un menor desafío del denominado “NIMBY” (“Not In My Back Yard”- o posible rechazo o resistencia social a la instalación de esta tecnología en el medio marino) (Benjamins et al., 2024). Por el contrario, presenta ciertas **desventajas** inherentes al medio marino, como la exposición a condiciones ambientales extremas, como pueden ser grandes vientos y oleajes, la mayor degradación y fatiga de los materiales debido al salitre y problemas de funcionamiento debido al desarrollo de incrustaciones biológicas (Figura 3) (*biofouling*, de su nombre en inglés), siendo este último aspecto objeto de estudio en este informe.

El desarrollo del *biofouling* o de bioincrustaciones es un **proceso natural** que plantea grandes desafíos a los sectores marítimos (energía renovable marina, petróleo y gas, transporte marítimo o acuicultura) (Vinagre et al., 2024), debido a los daños estructurales que puede llegar a ocasionar sobre aquellas estructuras sumergidas en el agua durante largos periodos de tiempo. En este sentido, la gestión del *biofouling* es esencial para evitar o ralentizar el deterioro de las estructuras FSPV, y así garantizar su vida útil hasta su capacidad de diseño, reduciendo así el coste asociado a este tipo de energía renovable.

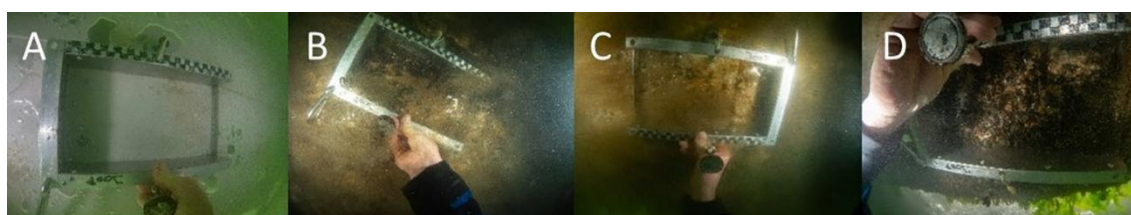


Figura 3. Evolución del crecimiento del *biofouling* durante 8 meses sobre una instalación piloto de energía solar flotante en el Mar del Norte, cerca de la costa holandesa (Mavraki et al., 2023).

Debido al gran impacto económico de las bioincrustaciones presentes en los barcos, la mayoría de los esfuerzos para el desarrollo y búsqueda de alternativas para su gestión se han concentrado en este sector. Por un lado, mediante el desarrollo de **directrices específicas** dirigidas al transporte marítimo (i.e., Organización Marítima Internacional; IMO de su nombre en inglés; *2023 Guidelines for the control and management of ships'*

biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species -Biofouling Guidelines. <https://www.imo.org/>). Por otro lado, impulsando el desarrollo de **herramientas para la gestión y la evaluación** de los efectos del *biofouling* sobre la velocidad del barco, el aumento de consumo de combustible y el aumento de las emisiones (<https://plus.balticcomplete.com/project>).

Estos documentos y herramientas pueden proporcionar información básica para los desarrolladores de estructuras de energías renovables marinas (ERM), pero al no estar destinadas a este sector (eólica marina, energía undimotriz y mareomotriz, fotovoltaica flotante), no tienen en consideración factores específicos que afectan al desarrollo de las incrustaciones biológicas en estas estructuras, como la distancia a costa, el nivel energético del entorno marino donde se localizan y las diferentes especificidades estructurales, que condicionarán la presencia, abundancia y adhesión de los organismos. Además, los desafíos operacionales asociados con el trabajo en alta mar y la baja efectividad de las tecnologías y métodos de control tradicionales en estas condiciones, podrían impedir su utilización a gran escala en los dispositivos de ERM.

En 2016 se celebró en Edimburgo un taller sobre las interacciones ambientales de las ERM, con la participación de representantes de la industria, el mundo académico y legislativo (véase Loxton et al., 2017). Se discutieron las implicaciones negativas de las bioincrustaciones, destacando la dificultad de eliminarlas fuera de los periodos de mantenimiento programados debido a problemas de acceso, salud y seguridad, y afecciones a la funcionalidad de los dispositivos. Se estimó que el mantenimiento podría representar hasta el 29% de los costes operativos totales. En ese sentido, otros estudios que se han llevado a cabo en parques eólicos marinos indican que cada turbina requiere unas cinco visitas anuales, lo que supondría un 25-30% del coste total de su vida útil en actividades de operación y mantenimiento (Röckmann et al., 2017).

En la literatura, algunos trabajos hacen referencia al desarrollo de las incrustaciones biológicas en boyas (p.ej. Langhamer et al., 2009; Macleod et al., 2016) y en convertidores de energía del viento, del oleaje y mareomotriz (p.ej. Kerckhof et al., 2010; Tiron et al., 2013, 2015; Mérigaud y Ringwood, 2016; Loxton et al., 2017; Nall et al., 2017; Titah-Benbouzid y Benbouzid, 2017; Want et al., 2017; Schoefs et al., 2022). Sin embargo, en la actualidad no existen guías o protocolos estandarizados y específicos para la gestión del *biofouling* en el sector de las ERM, incluida la fotovoltaica flotante en medio marino, de desarrollo más tardío que el resto de las energías renovables marinas.

2. OBJETIVO

En este contexto, el **objetivo** del presente informe consiste en la elaboración de las recomendaciones para la evaluación y el mantenimiento de estructuras de fotovoltaica flotante en medio marino frente al crecimiento de incrustaciones biológicas.

3. ORGANISMOS CAUSANTES DE LA DEGRADACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS SUMERGIDAS

El **desarrollo de las incrustaciones biológicas** en las superficies sumergidas es **progresivo**, atendiendo a una secuencia temporal, y sigue más o menos un **patrón general**, cuyas principales pautas son la predominancia de diferentes especies y su biomasa, dependiendo de ciertos factores específicos de las infraestructuras y de su localización.

En primer lugar, a los pocos minutos de sumergir una superficie limpia en el medio marino, se formará rápidamente una capa de materia orgánica, que en las 24 horas posteriores dará lugar a la adhesión de microorganismos como bacterias, alterando la estructura química de la superficie (López-Fuerte et al., 2017) (Figura 4). Estos microorganismos liberan polímeros extracelulares para fortalecer su adherencia, como proteínas, lípidos y polisacáridos, creando una capa delgada o *biofilm* (Telegdi et al., 2020). Este *biofilm* es utilizado por los micro y macroorganismos para su posterior fijación, de tal manera que, a las pocas horas o días, se fijarán las diatomeas y otras algas microscópicas (0,1-1,0 mm). Posteriormente, al cabo de unos días o meses, se producirá el crecimiento de las macroalgas, cirrípedos, briozoos, gusanos tubícolas (1-30 cm), mejillones, ostras, esponjas y laminarias (30-100 cm) (Abed et al., 2019; Bressy et al., 2022; Kochina et al., 2022) (Figura 4).

En base a la clasificación propuesta por Chapman et al. (2014), los organismos del *biofouling* pueden dividirse en tres categorías: 1) *microfouling* (incluye microalgas, diatomeas, bacterias y hongos); 2) *macrofouling* blando (incluye macroalgas, corales blandos, anémonas, tunicados y esponjas), y 3) *macrofouling* duro (incluye bivalvos, briozoos, gusanos tubícolas y balanos/percebes), que son difíciles de eliminar una vez establecidos. En latitudes más altas, las especies dominantes serán los balanos/percebes, gusanos tubícolas, mejillones, ascidias, anémonas de mar y corales blandos, mientras que, en latitudes más bajas, también suelen estar presentes organismos como los corales y las ostras (Swain, 2017; Kochina et al., 2022).

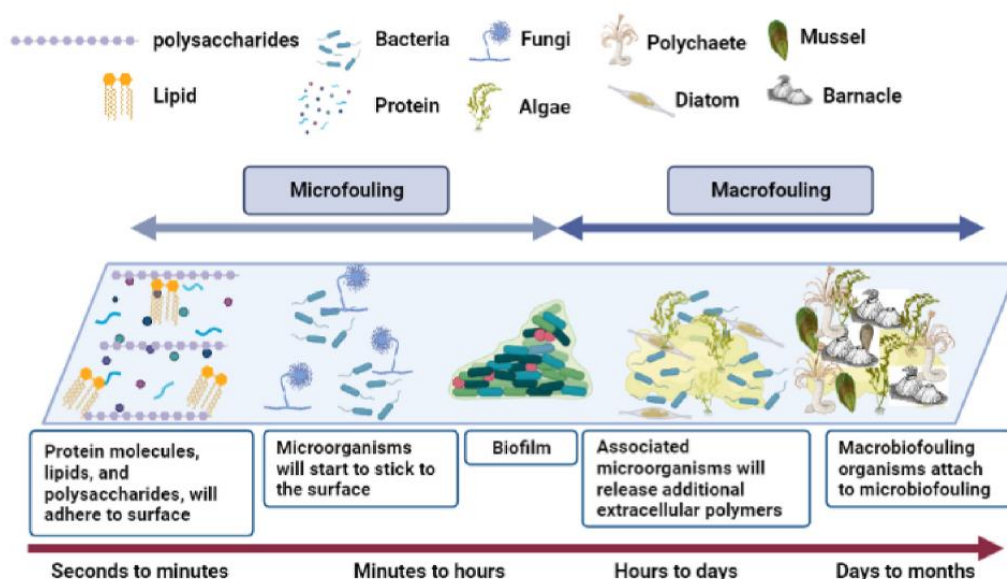


Figura 4. Sucesión temporal en el desarrollo de las incrustaciones biológicas en el medio marino (Ghattavi et al., 2024).

Actualmente, se han identificado más de 4.000 especies marinas diferentes relacionadas con el *biofouling* (Jin et al., 2021; Qiu et al., 2024). No obstante, predecir con exactitud el tipo y la cantidad de organismos que se adherirán y crecerán en una estructura es complicado, debido al limitado conocimiento sobre la distribución biogeográfica de los organismos incrustantes y la gran variabilidad de sistemas acuáticos a nivel mundial. Además, la información sobre la composición y magnitud del *biofouling* en las diferentes zonas bioclimáticas está dispersa en artículos e informes. Con el objetivo de apoyar al sector de las ERM y otras industrias marítimas, se desarrolló una base de datos en el marco del proyecto europeo OCEANIC (<http://oceanic-project.eu/>) que permite un acceso rápido a las especies de *biofouling* más relevantes del reino noratlántico templado europeo (Vinagre et al., 2020). Por otro lado, el proyecto BIOFREE (<http://www.emec.org.uk/press-release-biofree-webinarto-update-on-marine-energy-biofouling/>) (Want et al. 2017) y el proyecto francés ABIOP/ABIOP+ (<https://www.france-energiesmarines.org/en/projects/abiop-plus/>) (Quillien et al. 2018) recopilaron información sobre especies formadoras de *fouling* en ciertas zonas, cubriendo pocas ecorregiones. Finalmente, Sylvester et al. (2022) desarrollaron una base de datos que inventarió los principales grupos de bioincrustaciones marinas en barcos comerciales que llegaron a diferentes puertos de Canadá.

En este contexto, y con el objetivo de cubrir el mayor número de ecorregiones posibles, en el marco del proyecto EKIOCEAN (de la Convocatoria ELKARTEK 2023), se realizó una revisión sistematizada de la literatura científica (SLR, de sus siglas en inglés) (Mengist et al., 2020) (Figura 5), a partir de SCOPUS y Web of Science, sobre incrustaciones biológicas marinas a nivel mundial, cubriendo diferentes zonas biogeográficas, completando así la base de datos desarrollada en el proyecto NEOMAT (de la Convocatoria ELKARTEK 2021). Los términos de búsqueda seleccionados fueron "*Marine biofouling*", "*Marine biofouling**", "*Marine biofouling AND impact*", "*Marine fouling AND community*", "*Marine fouling AND organism*". La SLR se estructuró en cuatro fases: identificación, consulta, selección e inclusión. De las dos fuentes de información consultadas, se identificaron un total de 3.448 artículos, y tras descartar los artículos duplicados y/o incompletos y comunicaciones orales, se seleccionaron 1.434 artículos, de los cuales 1.069 no tenían finalmente interés, 293 artículos eran de carácter cualitativo y 72 de carácter cuantitativo.

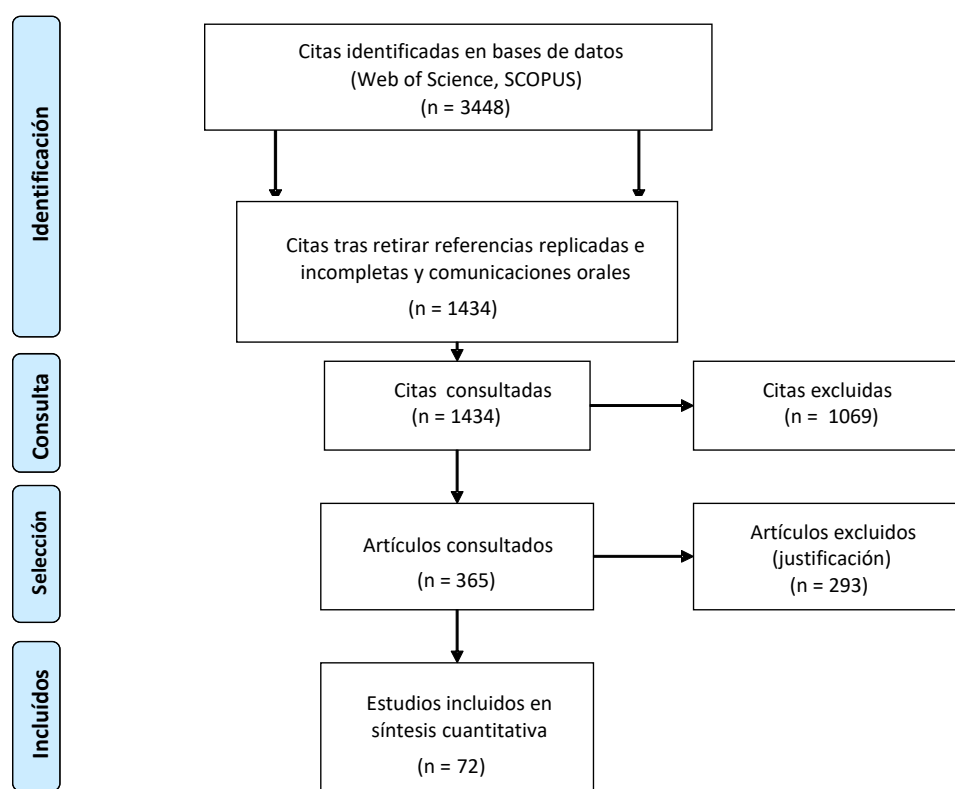


Figura 5. Resultados de la revisión sistematizada de la literatura científica.

A partir de los 72 artículos clasificados como cuantitativos, se extrajeron los siguientes campos de información descritos en la Tabla 1.

Tabla 1: Campos de información para la identificación y clasificación del *biofouling*

:ID	Número de registro correspondiente a un artículo
Reino (Spalding et al., 2007)	Regiones biogeográficas marinas del mundo, incluyendo los reinos y las provincias biogeográficas, según Spalding et al. (2007). Esto permite obtener una visión general de los países en los que se han llevado a cabo estudios de bioincrustaciones, proporcionando información sobre posibles patrones en su distribución
Provincia (Spalding et al., 2007)	
Ecoregion (Spalding et al., 2007)	
País-Ciudad	País y ubicación de la zona de estudio
Sitio	
Coordenadas	
Distancia a tierra (Km)	Hace referencia a la distancia entre el sitio muestreado y la costa más cercana
Equipamiento	Descripción de las superficies investigadas, incluidos placas/paneles/equipos/estructuras
Año	Año del estudio
Periodo min (meses)	Hace referencia al período (meses/años) durante el cual los organismos incrustantes han ido creciendo (es decir, al tiempo de instalación del equipamiento hasta la recopilación de datos).
Periodo max (meses)	
Profundidad (m)	Profundidad a la que se colocó el equipamiento y, por lo tanto, la profundidad a la que se han registrado las bioincrustaciones
Profundidad min	
Profundidad max	
Max grosor (mm)	Grosor máximo de la placa
Max peso muestra (peso fresco) (g)	Peso máximo de la muestra en peso fresco
Dimensiones de la placa (cm)	Altura y anchura de la placa/panel sobre el que han crecido las bioincrustaciones
Biomasa organismos (g/m ²)	Incluye información cualitativa y cuantitativa de los organismos incrustantes encontrados en las muestras: los datos taxonómicos provienen de la base de datos de WoRMS (<i>World Record of Marine Species</i>) (http://www.marinespecies.org). Los
Grupo (WoRMS, AlgaeBase)	
Sub-grupo (WoRMS, AlgaeBase)	
Especie (WoRMS, AlgaeBase)	

Nombre común (WoRMS, AlgaeBase)	datos cuantitativos de las muestras incluyen el peso, cobertura y/o número de individuos por unidad de superficie
Abundancia (ind/m ²)-Cobertura (%)	
Referencia	Autores, título del estudio, año y revista en la que está publicado
Observaciones	Otra información de interés

Para la asignación geográfica se usó la propuesta de Spalding et al. (2007), donde las zonas costeras y de la plataforma continental se clasifican, basándose en configuraciones taxonómicas, en un sistema jerárquico compuesto de 12 reinos, 62 provincias y 232 ecorregiones.

Las referencias revisadas cubrían nueve de los 12 reinos propuestos por Spalding et al. (2007), con una predominancia de las publicaciones referentes a la **zona biogeográfica noratlántica templada** (n=34). En general, en todas las provincias europeas estudiadas (Mar Negro, Lusitania, Mediterráneo y Mares del Norte de Europa) se identificaron los mismos filos (artrópodos, briozoos, anélidos, moluscos, cnidarios) predominantes, con ligeras diferencias entre las zonas biogeográficas.

En el **Mar Negro**, en la Bahía de Sevastopol, las especies que presentaron una mayor biomasa en estructuras de diferentes materiales (aluminio, caucho mecánico, acero de baja aleación, vidrio, plástico, vidrio acrílico), y situadas a profundidades de 1,5-2,0 metros, fueron el briozoo *Cryptosula pallasiana* (1046-1538 ind/m²), seguido por el cirrípedo (filo de los artrópodos) *Amphibalanus improvisus* (654-1646 ind/m²). También se observaron en menores cantidades otros briozoos (*Conopeum seurati*, 83-155 ind/m²), anélidos (familia Serpulidae, 73-150 ind/m²) y cnidarios (*Gonothyraea loveni*, 75-210 ind/m²) (véase Smirnova et al., 2021).

En el **Mediterráneo** (n=8), en cuanto a presencia, los filos predominantes fueron los anélidos y los moluscos. Los anélidos de la clase Polychaeta (gusanos tubícolas), con representantes de los géneros *Hydroides*, *Spirobranchus* y *Serpula*. Los moluscos de la clase bivalvos, representados por los géneros *Mytilus* y *Ostrea*. Se encontraron en superficies de poliestireno (polietileno en el caso de los bivalvos), terracota, fibras vegetales, bloques de hormigón y en los pilotes de plataformas de gas, a profundidades comprendidas entre los 0,3 y 36 m. En cuanto a los cnidarios, los representantes mayoritarios fueron los hidrozoos *Obelia dichotoma* y *Halecium* sp., en superficies de polietileno, amianto-cemento y PVC localizadas en profundidades de 0,2-6 metros (véanse Relini et al., 1998; Kocak et al., 1999; Abdelsalam y Wahab, 2012; Martell et al.,

2018; Bosch-Belmar et al., 2019; Fortič et al., 2021; Varello et al., 2021). En cuanto a los cordados, los representantes mayoritarios fueron de la clase ascidia, presentes sobre fibras vegetales y bloques de hormigón (Giangrande, et al., 2021).

En los Mares del Norte (n=21), que comprenden el **Mar Céltico, el Mar del Norte y el Mar Báltico**, los filos dominantes fueron los anélidos y los moluscos. Los moluscos de la clase bivalvos, representados por los géneros *Mytilus*, tanto en las estructuras más cercanas a costa como en aquellas localizadas en alta mar (80 km), a profundidades comprendidas entre los 0,5 y 43 m y en diferentes materiales (PVC, plástico corrugado, cimientos de molinos de viento y convertidores de la energía del oleaje, hormigón, Reef Cubes®, a base de cemento, etc.). También se registraron: la almeja *Mya arenaria* y el berberecho *Cerastoderma glaucum* a profundidades menores (0,5-15 m) en estructuras de PVC y plástico corrugado; la almeja *Hiatella arctica* en superficies de plexiglás, paneles metálicos y en convertidores de energía del oleaje a profundidades de 0,5 a 22 m; la almeja *Anomia ephippium* en superficies de cemento Reef Cubes® a profundidades de 10 m (Hickling et al., 2022). Con respecto a los briozoos, la clase más abundante fue la Gymnolaemata y concretamente, las especies *Electra pilosa* y *Einhornia crustulenta*, la primera presente en estructuras de metal, plexiglás y en los cimientos de molinos de viento, a profundidades de 1-40 m, y la segunda en estructuras de plástico corrugado y PVC en zonas más someras (0,5-15 m). También perteneciente a esta clase destaca la especie invasora *Schizoporella japonica* localizada sobre dispositivos de energías de las olas (Nall et al., 2017) y paneles de polietileno (Nall et al., 2022). Con respecto a los artrópodos, las especies predominantes fueron *Balanus crenatus*, *Balanus balanus* y *Semibalanus balanoides*, presentes en materiales como el plexiglás, cimientos de estructuras en alta mar, PVC, etc., a profundidades comprendidas entre los 0,5 y los 25 metros (véanse Anger, 1978; Picken, 1986; Whomersley y Picken, 2003; Dziubińska y Janas, 2007; Sugden et al., 2007; Langhamer et al., 2009; Kerckhof et al., 2010; Lindeyer y Gittenberger, 2011; Ronowicz et al., 2014; De Mesel et al., 2015; Brzana y Janas, 2016; Van der Stap et al., 2016; Nall et al., 2017; Want et al., 2017, 2021; Becker et al., 2020; Vinagre et al., 2020; Hickling et al., 2022; Nall et al., 2022). Mavraki et al. (2023) estudiaron específicamente la composición de las comunidades de organismos adheridos a una instalación piloto de energía solar flotante en el Mar del Norte, cerca de la costa holandesa, durante 8 meses. De nuevo, los mejillones, de la especie *Mytilus edulis*, fueron uno de los invertebrados más abundantes, colonizando rápidamente las superficies disponibles (Figura 6). Otras

especies también abundantes fueron el percebe *Austrominius modestus*, los briozoos *Conopeum reticulum* y *Electra pilosa*, cnidarios de la especie *Obelia bidentata*, anélidos de la especie *Platynereis dumerilii* y artrópodos del infraorden Brachyura.

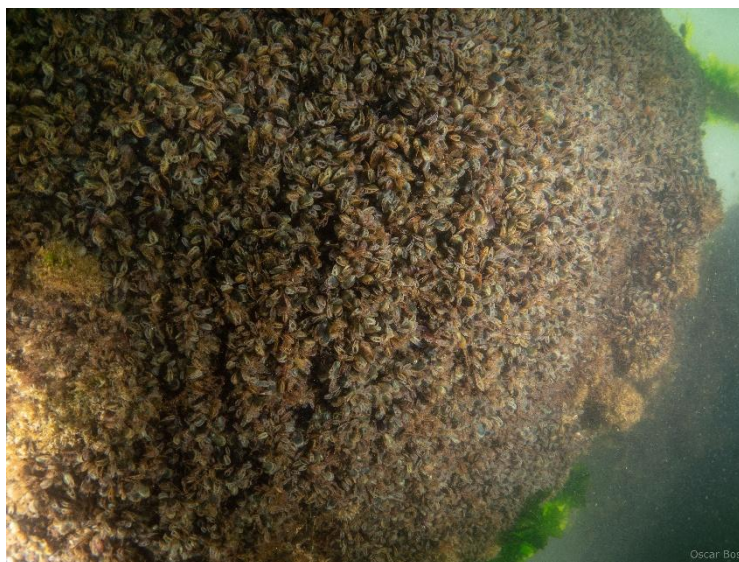


Figura 6. Imagen de la parte submarina de los flotadores completamente colonizada por *biofouling* incrustante, y especialmente por mejillones de la especie *Mytilus edulis*. (fuente: Oscar Bos/Wageningen Marine Research, Mavraki et al. (2023)).

En cuanto a la provincia **Lusitana**, solo hay disponibles dos documentos que hacen referencia al desarrollo de incrustaciones biológicas (véanse Cámara et al., 2017; Vinagre et al., 2020). En la plataforma Cantábrica, a profundidades de 15 m, la especie que presentó una mayor biomasa fue el briozoo *Bugula* sp. (0,34 g/m²), seguido por el cirrípedo (grupo de los artrópodos) *Perforatus perforatus* (0,17 g/m²), sin apenas diferencias de cobertura entre materiales (metal y plástico) y equipos, y el molusco bivalvo *Hiatella arctica* (0,15 g/m²) en materiales metálicos y apenas presente en el plástico. Otras especies presentes fueron el mejillón *Mytilus galloprovincialis*, la ostra *Anomia ephippium* y el gusano tubícola *Spirobranchus* sp. En la Bahía de Cádiz, los organismos predominantes en paneles de mármol sumergidos a 10 metros de profundidad fueron los artrópodos (abundancia 25%; con el cirrípedo *Balanus* sp. como especie predominante) y anélidos (abundancia 8%; *Spirobranchus triqueter*), con una menor presencia de briozoos (abundancia 2%) y moluscos bivalvos (abundancia 3%). En cuanto a Portugal, se observó una marcada diferencia en la biomasa de organismos presentes en las estructuras, de metal y plástico, dependiendo de su localización. Mientras que en el puerto de Lisboa, a profundidades comprendidas entre los 0 y 3,5 m, las especies predominantes (anélido *Spirobranchus* sp., 0,26 g/m²; cirrípedo *Perforatus*

perforatus, $0,34 \text{ g/m}^2$) presentaron una menor biomasa, en mar abierto, a profundidades de 5 a 10 metros, se registraron niveles de biomasa uno o dos órdenes de magnitud mayores, con la predominancia del molusco *Mytillus galloprovincialis* ($23,8 \text{ g/m}^2$), el cirrípedo *Perforatus perforatus* ($5,1 \text{ g/m}^2$) y el briozoo *Bugula* sp. ($3,7 \text{ g/m}^2$).

Esta clasificación proporciona un punto de partida para establecer las clases generales de incrustaciones que podrían esperarse sobre las superficies de las estructuras de fotovoltaica flotante situadas en esas ecorregiones. Sin embargo, los organismos que finalmente se establecerán vendrán determinados por las características específicas de la columna de agua, la profundidad, la época del año, el tipo de estructura y el tipo de material o revestimiento utilizado, así como el grosor medio, rugosidad y densidad del material (véase sección 7). En este sentido, a largo plazo, es crucial monitorear la fauna incrustante en los sistemas flotantes fotovoltaicos. Esto podría facilitar el diseño de estos sistemas, considerando el peso de los organismos que colonizan las nuevas superficies, y proporcionar información valiosa para el despliegue de dicha tecnología (Mavraki et al., 2023), así como para optimizar el rendimiento de los dispositivos y planificar su mantenimiento adecuado.

4. CUANTIFICACIÓN DEL BIOFOULING

Las técnicas de mantenimiento eficientes para la prevención del *biofouling* dependen en buena medida del proceso de detección y cuantificación de este. Sin embargo, detectar de forma temprana y eficaz el *biofouling* no es tarea fácil debido a su inherente imprevisibilidad y a las incertidumbres relacionadas, lo que dificulta evaluar con precisión sus impactos en la estructura monitoreada (Rashid et al., 2023).

El monitoreo de las bioincrustaciones, específicamente del *macrofouling*, a menudo consiste en el análisis de la composición, abundancia (como biomasa, densidad o cobertura) y/o parámetros de espesor después de que el equipo haya sido desplegado en condiciones marinas durante períodos predeterminados. Además, es fundamental comprender la estructura y magnitud de la bioincrustación en las etapas iniciales de colonización, especialmente durante las diferentes estaciones. Esto permite, por ejemplo, estimar los intervalos de tiempo mínimos y máximos para realizar tareas de mantenimiento y determinar los mejores períodos para instalar los equipos en el mar (Vinagre et al., 2024).

Hong et al., (2024) para evaluar y cuantificar el *biofouling* en entornos marinos, proponen un proceso de evaluación integral y sistemático que consta de ocho pasos principales (Figura 7):

1. **Muestreo e Identificación:** caracterización inicial de las muestras de *biofouling* mediante microscopio.
2. **Fotografía Macro:** empleando una cámara digital de alta resolución para capturar la adhesión microbiana en las superficies de los materiales.
3. **Observación de Microincrustaciones:** utilizando tecnología de microscopio de iluminación estructurada de alta sensibilidad para la observación microscópica de microincrustaciones.
4. **Detección de Proteínas y Polisacáridos:** utilizando microscopía de barrido láser confocal junto con técnicas de tinción específicas para identificar proteínas y polisacáridos dentro de las biopelículas.
5. **Morfología de Biopelículas:** empleando microscopio de fuerza atómica (AFM) para la observación detallada de las estructuras de las biopelículas.

6. **Fuerza Adhesiva de Biopelículas:** utilizando AFM con modos de medición de curvas de fuerza-distancia para evaluar las fuerzas de adhesión de las biopelículas en diferentes superficies de materiales.
7. **Morfología Celular de Bioincrustaciones:** utilizando microscopía electrónica de barrido equipada con un espectrómetro de espectroscopía de dispersión de energía para examinar y analizar la composición morfológica y química de las células del *biofouling*.
8. **Inteligencia Artificial:** análisis de datos avanzados y algoritmos de aprendizaje automático para sintetizar los datos recopilados en los siete pasos anteriores, con el fin de predecir los tipos de organismos que pueden adherirse, sus tasas de adhesión, así como estimar la vida útil esperada del material.

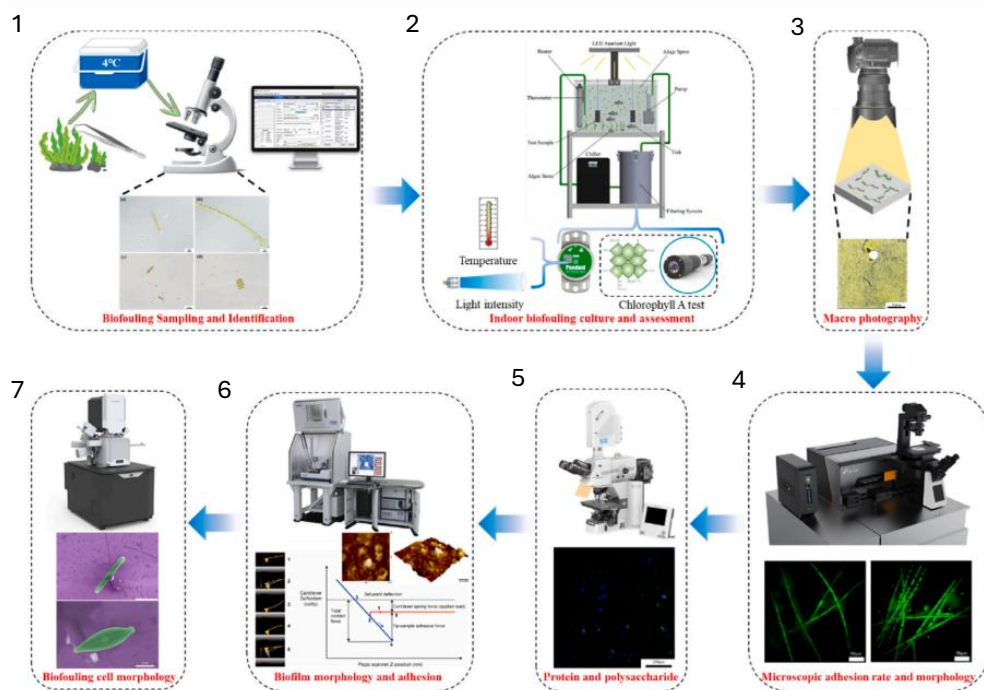


Figura 7. Diagrama descriptivo del proceso de evaluación y cuantificación del *biofouling* marino; 1. Muestreo e identificación del *biofouling* (microscopio); 2. Cultivo y evaluación del *biofouling* en interiores; 3. Fotografía macro; 4. Tasa de adhesión microscópica y morfología (his-sim); 5. Detección de Proteínas y Polisacáridos; 6. Morfología y adhesión del *biofouling*; 7. Morfología celular del *biofouling*, con microscopía electrónica de barrido. Figura tomada de Hong et al. (2024).

Respecto al **uso de la inteligencia artificial**, algunos autores han desarrollado un sistema de monitoreo basado en datos que utiliza imágenes de vídeo de turbinas sumergidas, con el objetivo de detectar estas bioincrustaciones a tiempo real y asegurar el funcionamiento continuo de los dispositivos (Habbouche et al., 2024). Gormley et al.

(2018) validaron CoralNet, un software automatizado de análisis de imágenes de bioincrustaciones marinas en plataformas offshore del Reino Unido. Los resultados mostraron niveles variados de diversidad en las bioincrustaciones. CoralNet permitió un enfoque más eficiente y consistente para la evaluación de bioincrustaciones en estructuras offshore. Otro enfoque es el desarrollado por First et al. (2021), que consiste en la cuantificación de bioincrustaciones utilizando una cámara submarina de bajo coste y el desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes. Las imágenes *in situ* fueron analizadas con modelos de aprendizaje automático para clasificar y cuantificar las incrustaciones. Este enfoque resultó ser rápido, simple y rentable para gestionar las bioincrustaciones. Pedersen et al. (2022) utilizaron análisis de imágenes para evaluar la eficacia de recubrimientos a bioincrustaciones en comparación con las inspecciones manuales. Este modelo de clasificación de píxeles permitió cuantificar la cobertura de bioincrustaciones en paneles expuestos en el medio marino. Los resultados facilitaron una evaluación estandarizada de la resistencia del recubrimiento al *biofouling*. Signor et al. (2023) utilizaron herramientas de aprendizaje automático para clasificar imágenes de *macrofouling* en cuatro categorías: “mejillones”, “percebes”, “gusanos calcáreos” y “ausencia de *macrofouling*”, ya que como se ha expuesto en el apartado 3 del presente informe, se trata de los organismos que tienen mayor impacto en las superficies y estructuras instaladas en el medio marino. En este estudio se exploró un “enfoque de aprendizaje por transferencia” es decir, a partir de una red neuronal convolucional (CNN), y se modificó un algoritmo de entrenamiento de código abierto para asegurar la rápida reproducibilidad de la metodología, que incluía: selección de imágenes, adaptación de la CNN, proceso de entrenamiento y validación, y evaluación de la calidad. El rendimiento medio en cuanto a una buena detección de los modelos desarrollados en las imágenes de prueba fue del 69% para todas las clases combinadas, con una detección media del 81% y 79% para “mejillón” y “ausencia de *macrofouling*”, respectivamente. Por otro lado, en el marco del proyecto NEOMAT, se realizó un análisis del *biofouling* sobre materiales y recubrimientos *antifouling*, en probetas colocadas en distintas zonas de exposición (salpicadura e inmersión) del **laboratorio flotante HarshLab** (<https://harshlab.eu/>, ubicado en Bimep, frente a la costa vasca) (Figura 8), entre el verano de 2022 y el verano de 2023.



Figura 8. Fotografiado de las probetas en junio de 2023, colocadas en el laboratorio flotante HarshLab (<https://harshlab.eu/>, ubicado en Bimep).

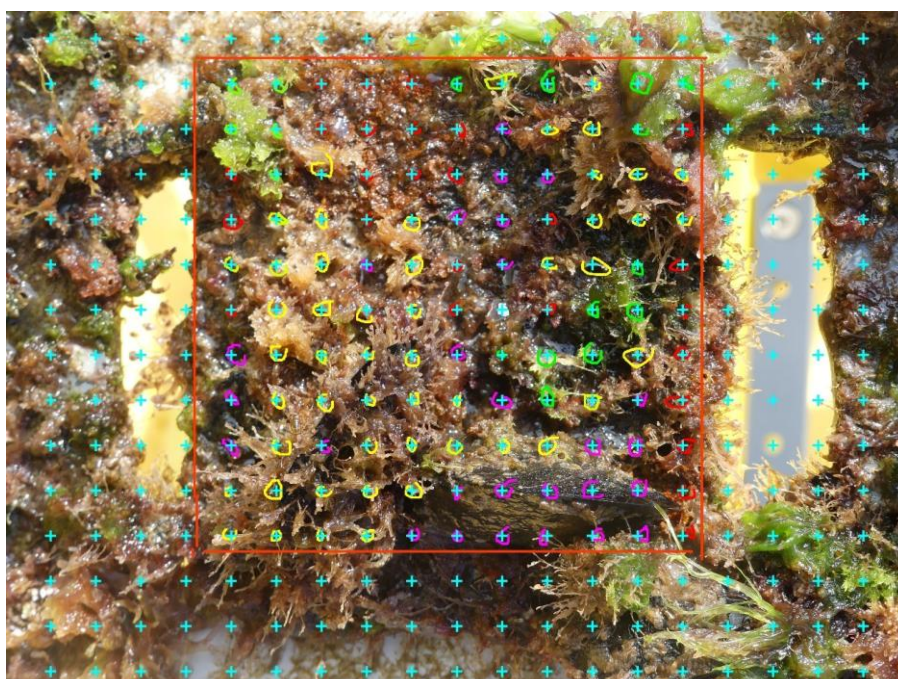
En el marco del proyecto EKIOCEAN, se ha realizado la caracterización del *biofouling* y sus mecanismos de degradación sobre diferentes probetas de elementos críticos del sistema de fotovoltaica flotante en la zona intermareal y submareal de la estación océano-meteorológica de Pasaia (País Vasco) (Figura 9), para evaluar la efectividad de cuatro recubrimientos/tratamientos *antifouling* basados en el látex, entre junio de 2024 y marzo de 2025. Se colocaron un total de 30 probetas (3 réplicas del control o probetas sin tratar y 3 réplicas para cada tratamiento, en ambas zonas).



Figura 9. Colocación de las probetas en junio de 2024 en la zona intermareal de la estación océano-meteorológica de Pasaia (Gipuzkoa).

Tanto en EKIOCEAN, como en el mencionado proyecto NEOMAT, 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). 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 10). En cada una de las visitas realizadas se calculó la cobertura relativa (en tanto por 1) y el número de especies totales en cada probeta.



Código	Grid	sp1	sp2	sp3	sp4	sp5	sp6	sp7	sp8
PANAp12 placa6	132	14/132	32/132	11/132	5/132	25/132	4/132	4/132	36/132

Figura 10. Cuantificación del *biofouling* mediante el software ImageJ sobre la fotografía tomada a la probeta “PANAp12placa6” en el HarshLab, en junio de 2023.

En la Figura 11 se muestran los resultados de la cobertura relativa del conjunto de especies del *biofouling* sobre las probetas de hormigón, colocadas en la zona intermareal y submareal de la estación océano-meteorológica de Pasaia, obtenidos durante los monitoreos de septiembre y de noviembre en 2024.

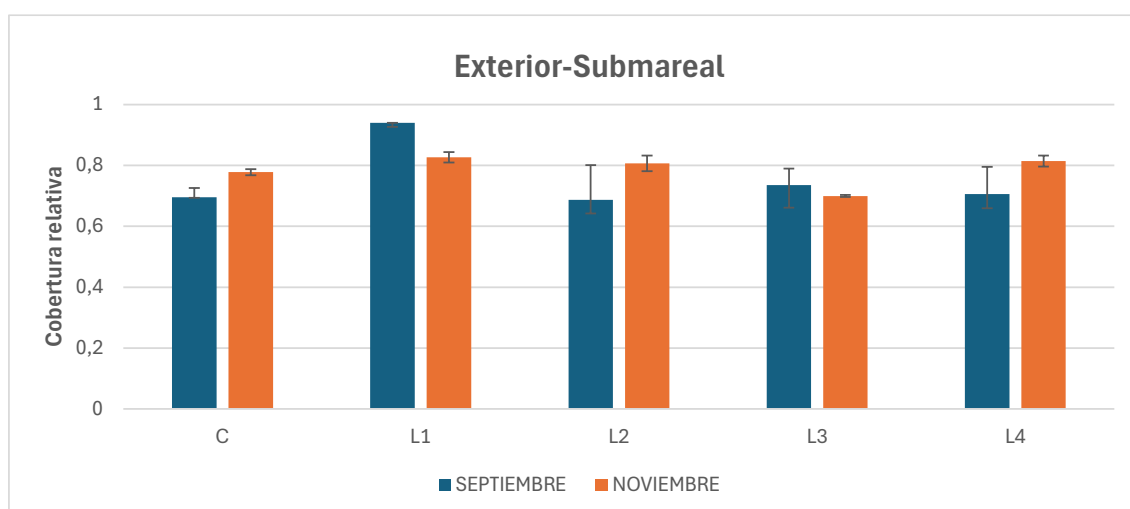
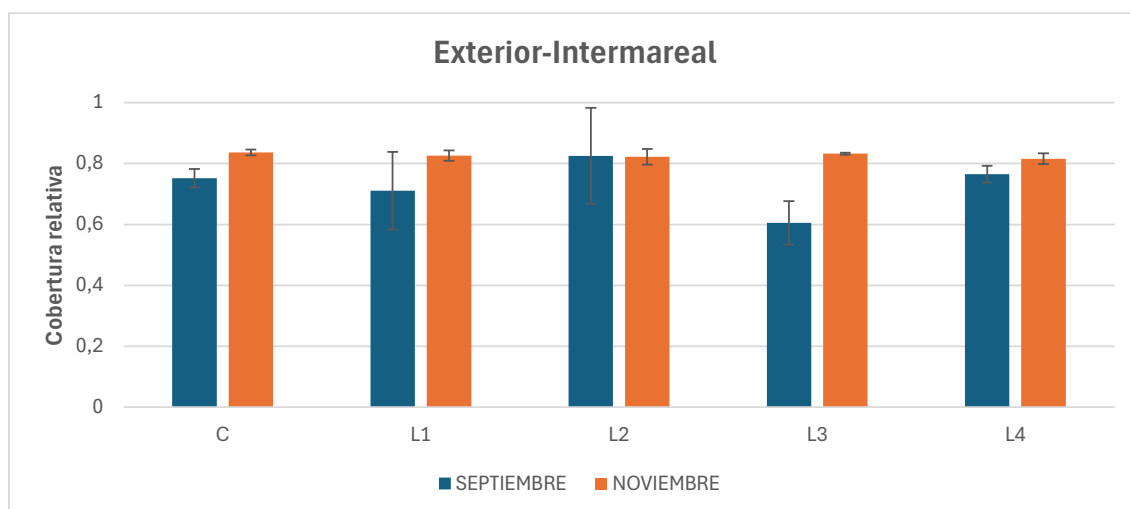


Figura 11. Cobertura relativa (tanto por 1) del conjunto de especies sobre las probetas de hormigón colocadas en la zona intermareal (arriba) y submareal (abajo) de la estación océano-meteorológica de Pasaia, obtenidos durante el monitoreo de septiembre y de noviembre del 2024. Control (C) y tratamientos-látex L1, L2, L3, y L4.

De forma general, en ambas localizaciones y en casi 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 generalizado de la cobertura entre el primer (septiembre) y segundo muestreo (noviembre). Sin embargo, no se observan diferencias en la cobertura relativa entre las probetas control y los cuatro tratamientos.

5. MODOS DE FALLO CAUSADOS POR EL DESARROLLO DE LAS INCRUSTACIONES BIOLÓGICAS

Existen diversos diseños de estructuras FSPV, que pueden clasificarse en dos grandes grupos (Figura 12; Claus y López, 2022):

- 1) las que utilizan un pontón o plataforma flotante estable, donde se instalan los módulos fotovoltaicos: Clase 1, estructura de soporte para los paneles solares y flotadores en paralelo; Clase 2, cada panel solar está sujeto por un único flotador, con raíles incorporados; Clase 3, los flotadores se ensamblan para crear una gran plataforma o isla flotante, por la que se puede andar, donde se instalan los módulos fotovoltaicos y los componentes eléctricos de forma independiente.
- 2) aquellos en los que los módulos fotovoltaicos se colocan directamente sobre la superficie del agua o incluso parcialmente sumergidos, utilizando membranas flexibles (uso de módulos flexibles de capa fina o módulos cristalinos en un soporte de espuma flexible, donde la flotabilidad se obtiene con una lámina de neopreno distribuida uniformemente y flotadores perimetrales) o bien estructuras rígidas (normalmente funcionan bajo una fina capa de agua, pero pueden sumergirse y volver a la superficie bombeando agua en las boyas).

Aunque variarán dependiendo del tipo de estructura FSPV, los diferentes componentes que pueden estar presentes en estas estructuras son (Figura 13):

- estructura que sostenga los paneles fotovoltaicos,
- módulos fotovoltaicos para la obtención de energía solar,
- flotadores que garanticen la flotabilidad de toda la estructura,
- varios componentes eléctricos,
- sistema de sujeción que impida que la estructura vaya a la deriva y/o vuelque.

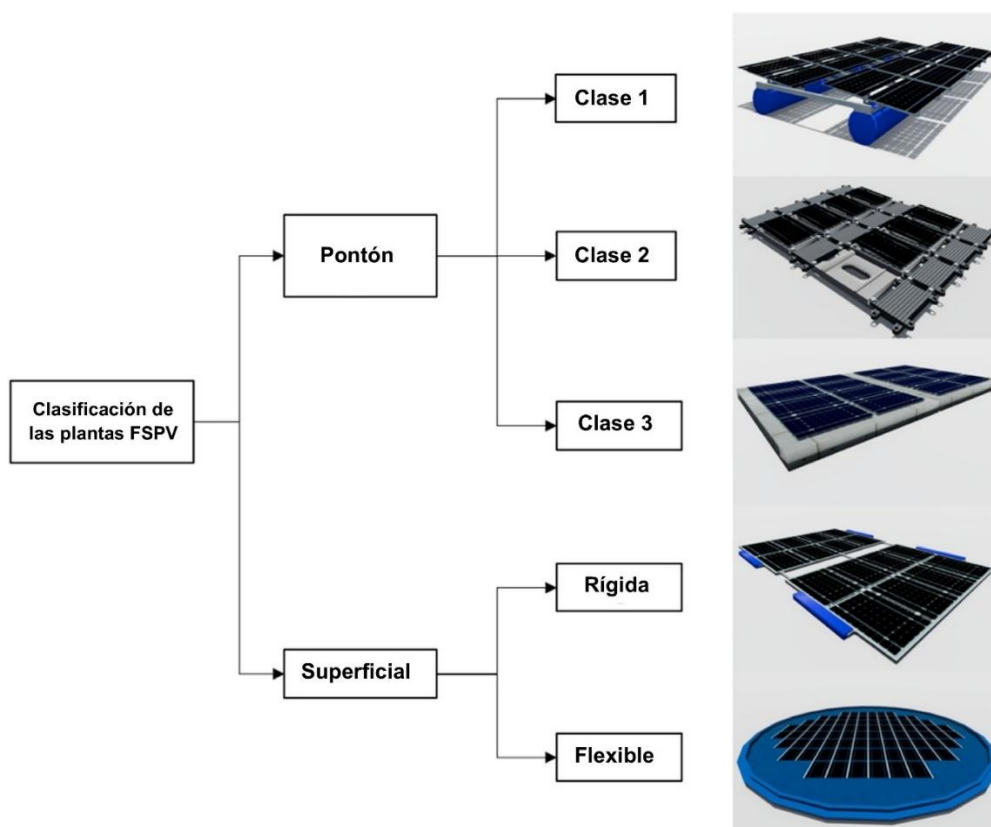


Figura 12. Clasificación de las plantas FSPV (Figura modificada, obtenida de Claus y López, 2022).

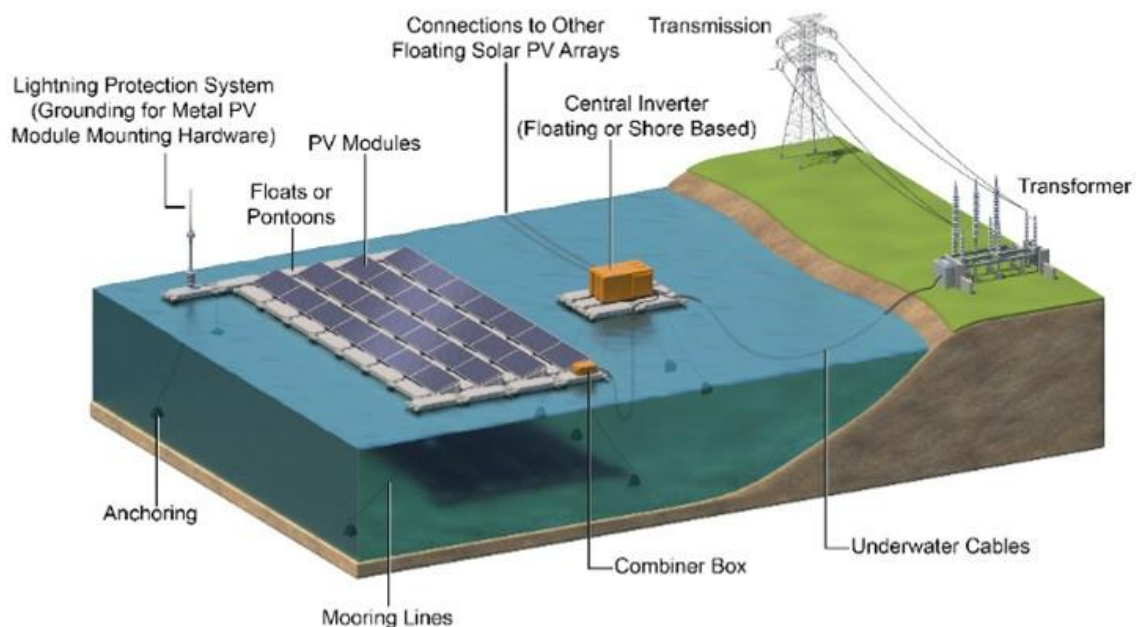


Figura 13. Componentes de un sistema de FSPV genérico (Figura obtenida de Lee et al., 2020).

Estos componentes estarán sujetos a los efectos de las incrustaciones biológicas, pero de forma diferente, dependiendo de su exposición al agua marina. A continuación, se presentan los materiales habitualmente utilizados en estos elementos y los principales modos de fallo a los que podrían verse sujetos (véanse Pham et al., 2019; Claus y López, 2022; Ghigo et al., 2022; Amer et al., 2023; Shi et al., 2023; Clemente et al., 2024; Djalab et al., 2024; Wu et al., 2024):

- La mayoría de los diseños de FSPV incluyen una **estructura metálica sobre la que se acomodan los paneles fotovoltaicos**, aunque en ocasiones algunos diseños carecen de este elemento, alojando un único modulo fotovoltaico por flotador. Además, en algunos diseños marinos, esta estructura de soporte también se utiliza para mantener los paneles a una altura segura del nivel del mar. En otros entornos esta estructura suele estar realizada en materiales como el acero galvanizado o el aluminio, pero en el medio marino se está promoviendo el uso de materiales compuestos (*composite*, de su nombre en inglés), como los polímeros reforzados con fibras, que además de una mayor resistencia a la corrosión, presentan una menor densidad (véase Rubino et al., 2020). Esta estructura puede verse afectada por el *bioufouling* al encontrarse en la zona de salpicaduras, lo que podría conllevar el aumento del riesgo de corrosión y en menor medida el aumento del peso de la estructura.
- Los **módulos fotovoltaicos** constan de células fotovoltaicas que convierten la luz (fotones) procedente de la radiación solar en energía eléctrica (electrones), mediante el efecto fotovoltaico. Estas células suelen ser de silicio, telurio de cadmio, sulfuro de cadmio, o bien son células orgánicas y poliméricas, células fotovoltaicas híbridas o de capa fina. Hasta la fecha, las instalaciones FSPV a gran escala han empleado casi exclusivamente módulos basados en placas de silicio cristalino, pero también se ha propuesto el uso de membranas flexibles basadas en la tecnología de capa fina, especialmente en el medio marino, ya que esta flexibilidad podría ser beneficiosa para soportar las cargas de las olas. Al igual que en el caso anterior, si los módulos fotovoltaicos se encuentran en contacto directo con el agua o en la zona de salpicaduras, podrían verse afectados por el *biofouling*, lo que podría aumentar el riesgo de corrosión y de fallo de los paneles fotovoltaicos (daño del cristal de los paneles, disminuyendo su transmitancia espectral).

- Los **flotadores** se utilizan para soportar la carga de la estructura y mantenerla por encima del agua. Uniendo diferentes flotadores se crean los pontones, hasta alcanzar la superficie deseada. Los flotadores suelen estar fabricados de materiales plásticos, con alta resistencia a la luz ultravioleta y a la tracción, y que requieren un limitado mantenimiento, como el polietileno de alta densidad (*HDPE*, de su nombre en inglés). Aunque el HDPE sea el material más utilizado, se ha sugerido su sustitución por plásticos sostenibles al tratarse de una potencial fuente de microplásticos al medio marino. También se utilizan los polímeros reforzados con fibra, ya que tienen un peso más ligero, mayor resistencia a la corrosión y mejores propiedades mecánicas. Además, otros trabajos también han valorado el uso de otros materiales más densos, como el cemento y el acero. Las bioincrustaciones podrían ocasionar el aumento de peso y de resistencia en los flotadores, y, por tanto, la pérdida de propiedades mecánicas. Las estructuras FSPV de tipo superficiales también pueden verse afectadas por el *biofouling*.
- Además, se necesitan un **conjunto de cables y componentes eléctricos** para transformar y transportar la electricidad desde las instalaciones FSPV a tierra o a baterías para su almacenaje. Dependiendo de la distancia a costa, el cableado puede realizarse por encima o por debajo del agua, lo que condicionará la presencia de las bioincrustaciones y su relevancia relativa. Con respecto al convertidor, que garantiza que la tensión de salida de los módulos fotovoltaicos alcance la de la red eléctrica, su localización dependerá de la distancia a costa. Así, en grandes plantas FSPV, situadas mar adentro, los convertidores suelen instalarse en islas flotantes, y, por tanto, estarán sujetos a las mismas presiones ambientales y biológicas que el resto de los elementos que componen la infraestructura FSPV.
- Finalmente, en el medio marino se utilizan diferentes **sistemas de amarre** que garantizan que la estructura esté firmemente sujeta al fondo marino (o a tierra en el caso de las plantas de FSPV que se localizan en la costa). Dependiendo del presupuesto, la profundidad del agua, el estado del fondo marino y otros parámetros adicionales, el método de anclaje puede ser por gravedad (peso muerto), arrastre, tensión o succión. Los cabos de amarre pueden ser de nylon o caucho, lo que permite que el sistema se ajuste a la profundidad del agua, evitando las sacudidas bruscas que pueden afectar a los puntos de amarre, pero en el medio marino los más utilizados son cadenas o cables de acero. Al estar sumergidos en la columna

de agua, estarán sujetos a las especificidades de los organismos bioincrustantes presentes a diferentes profundidades.

El desarrollo de las incrustaciones biológicas en las estructuras FSPV puede generar una serie de problemas de diseño y funcionamiento que los ingenieros y desarrolladores de las estructuras fotovoltaicas flotantes deberán tener en cuenta para garantizar la funcionalidad de los dispositivos y que la industria FSPV se considere una alternativa económicamente viable. Con una vida útil prevista de 20-25 años, el rendimiento de las estructuras FSPV a largo plazo dependerá de la eficiencia operativa de las estructuras, en cuanto a la longevidad y funcionalidad de los dispositivos y su eficiencia energética, y de su correcto mantenimiento, ya que un mantenimiento no adecuado podría provocar una pérdida de eficiencia del 15-30% de los paneles fotovoltaicos, acortando así su ciclo de vida útil (Wim et al., 2022).

Se detallan a continuación los **problemas más importantes asociados al desarrollo del biofouling** en las estructuras de FSPV. Al tratarse de una tecnología cuya aplicación en el medio marino es relativamente reciente, también se hará referencia a los problemas a los que se enfrentan otras estructuras de ERM, cuya información sea transferible a las FSPV.

Las bioincrustaciones pueden tener implicaciones técnicas en el **rendimiento operativo** de los dispositivos, al **aumentar el diámetro efectivo** de los elementos cilíndricos (cables y líneas de amarre), provocando un aumento del coeficiente de resistencia y de las cargas de inercia y, además, afectando a la conductividad térmica de los cables (Figura 14). Además, causarán el **aumento de la rugosidad y las irregularidades de la superficie**, lo que modificará el flujo alrededor de los componentes, dando lugar a la alteración de los coeficientes de arrastre y sustentación. También podría esperarse **la disminución de la tasa de absorción de la luz**, debido a la acumulación del *biofouling* en la superficie de los módulos fotovoltaicos, originando “puntos calientes”, lo que conllevaría una rápida degradación del sistema y un aumento de los costes de funcionamiento y mantenimiento (véanse Marty et al., 2021; Want et al., 2021; Schoefs and Tran, 2022; Maduka et al., 2023; Mannino et al., 2023; Djalab et al., 2024; Wu et al., 2024).



Figura 14. A) Bioincrustaciones en un cable submarino tras un periodo de inmersión de seis meses a cinco metros de profundidad en Milford (Reino Unido) (fuente: <https://www.fugro.com/news/long-reads/2023/a-closer-look-at-biofouling-on-dynamic-cables-at-floating-wind-farms>); B) *biofouling* en el sistema de amarre de un dispositivo de conversión de la energía de las olas (fuente: Want et al., 2023).

La modificación de la geometría externa de los elementos cilíndricos, y de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre ellos, dará lugar a perturbaciones fluido-estructura, que podrían ocasionar la **fatiga de los componentes afectados**. En este sentido, se ha estimado que la presencia de bioincrustaciones podría provocar una reducción del 20% de la vida útil de las líneas de amarre, que son las que acumulan el mayor daño por fatiga (Yang et al., 2017). Otros factores que pueden tener un impacto significativo en los coeficientes de fuerza hidrodinámica, aparte de la rugosidad de la superficie, son la geometría/tamaño de la rugosidad, el índice de cobertura superficial, la configuración de las estructuras FSPV, las especies bioincrustantes presentes y el patrón de colonización. En el caso de los cables, el *biofouling* puede generar una capa de aislamiento adicional, impidiendo que el cable disipe el calor de forma eficaz, creando

un **riesgo de sobrecalentamiento**. Con respecto a los módulos fotovoltaicos, el *biofouling* puede extenderse a la zona de salpicaduras, colonizándolos, lo que podría afectar significativamente a la transmisión de luz, incluso en presencia de una baja biomasa de organismos, debido a la presencia de finas películas de organismos con altas tasas de absorción solar (Hooper et al., 2021).

Otro de los factores importantes es el **aumento de la carga estructural** debido al crecimiento de las incrustaciones biológicas (Figura 15), lo que afectará a los coeficientes hidrodinámicos de la estructura y a su peso, aumentando la tasa de desgaste y la carga de fatiga de los componentes, contribuyendo así, a la probabilidad de fallo (Miller y MacLeod, 2016; Oliveira-Pinto y Stokkerman, 2020; Maduka et al., 2023; Want et al., 2023). El peso de las bioincrustaciones dependerá del volumen del *biofouling* y las proporciones relativas entre especies duras y densas y especies blandas y menos densas. Las especies dominantes dependerán de las características ambientales del lugar donde se instalen las estructuras. Los mejillones son un componente dominante de la bioincrustación “dura” en estructuras sumergidas a poca profundidad y pueden ejercer un peso sustancial sobre las estructuras sumergidas. En estudios realizados en boyas marinas y en plataformas de petróleo y gas, se ha observado que las incrustaciones biológicas (sobre todo mejillones y ostras) pueden llegar a pesar más de 33 y 132,5 kg/m², respectivamente (Loxton et al., 2017). Aunque no son tan pesados como los mejillones, los balanos/percebes, gusanos tubícolas y los briozoos también pueden añadir un peso considerable a las estructuras, habiéndose registrado ~4-5 kg de peso fresco por m² en paneles de prueba sumergidos durante 12 meses en la costa occidental portuguesa, a profundidades de 5-10 m (Vinagre et al., 2020). En cuanto al aumento de peso por la presencia de algas, se han registrado valores de hasta 40 kg peso fresco/m², pero debido a su flotabilidad es más probable que afecten a la hidrodinámica de las estructuras, causando un mayor arrastre y abrasión estructural (Miller y MacLeod, 2016; Titah-Benbouzid y Benbouzid, 2017; Vinagre et al., 2020). En Escocia se ha observado un aumento total del peso de las estructuras flotantes, en el orden de 2,5 kg/m² de peso húmedo, debido a la presencia de organismos incrustantes en la parte submareal poco profunda de las estructuras (Nall et al., 2017). En estructuras fijas del Mar del Norte, en Alemania, se han registrado valores de biomasa del *biofouling* de 67 kg de peso húmedo a 1 m de profundidad (Mavraki et al., 2023). En este sentido, se ha estimado mediante modelos que el

biofouling podría llegar a representar el 10% de la masa total de un convertidor del oleaje (Tiron et al., 2015).



Figura 15. A) Algas colonizando el lateral del convertidor de energía del oleaje Pelamis P2; B) *biofouling* presente a una profundidad de ~0,5-2 m; C) parte inferior del dispositivo Pelamis P2 (figura obtenida de Nall et al., 2017).

Otro de los modos de fallos más comunes y la principal razón del deterioro, destrucción y eventual abandono de infraestructuras y equipos instalados en el medio marino es la **corrosión** (Figura 16). La corrosión por influencia microbiológica (MIC, por su nombre en inglés) hace referencia a la corrosión de materiales metálicos, acelerada directamente por las actividades vitales de los microorganismos o indirectamente por sus metabolitos. La biocorrosión viene explicada, en gran medida, por la sinergia entre las bacterias oxidantes del hierro y las bacterias reductoras de sulfato presentes en las biopelículas. Las primeras consumen el oxígeno presente en el medio, lo que genera un entorno de crecimiento adecuado para las segundas, que promueven la corrosión de los materiales (Li y Ning, 2019). La corrosión influenciada por los microorganismos del *biofouling* deteriora la superficie a medida que la película microbiana corrosiva inicial madura, lo que generalmente resulta en corrosión por “picaduras” en las estructuras de acero en contacto con el agua marina (Lou et al., 2020). Además, la interacción mutualista de ciertos grupos del *biofouling*, como las bacterias y las algas, puede llegar

a cuadruplicar la tasa de corrosión en comparación con el efecto individual de estos organismos (Dong et al., 2022). El *macrofouling* puede facilitar aún más la biocorrosión iniciada por las comunidades microbianas, bien sea debido a los compuestos endógenos que utilizan para adherirse a los sustratos (p. ej., los cirrípedos y los percebes), que corroen el acero de todas las aleaciones, o a la perforación de los materiales (algunos bivalvos) (Vinagre et al., 2020). La corrosión puede acelerarse aún más si el recubrimiento de las estructuras resulta dañado físicamente por los organismos adheridos, por ejemplo, cuando están expuestos a las fuerzas de arrastre de las olas y las corrientes o cuando se retiran durante el mantenimiento.



Figura 16. A) Cadena de amarre que muestra una corrosión extensa y agujeros o cavidades en la superficie del material metálico o megapicaduras; B) detalle de megapicadura (figura obtenida de Witt y Ma, 2016).

Se estima que los daños causados por la **biocorrosión** y el *biofouling* en las estructuras sumergidas suponen anualmente un coste de 150 billones de dólares para la industria. Sólo en China la corrosión supone una pérdida anual de alrededor del 3% al 5% del PIB (Li y Ning, 2019). La corrosión puede afectar al marco del módulo fotovoltaico y al sistema de montaje y también podría tener un efecto negativo en los adhesivos de silicona que sellan los bordes de los módulos (Mannino et al., 2023). Con respecto a las líneas de amarre, se ha estimado que la corrosión causada por las bioincrustaciones podría reducir la vida útil de las líneas de amarre en un 20% (Hooper et al., 2021). En el caso de los módulos fotovoltaicos y del resto de elementos que se sitúan en la zona de salpicaduras, la presencia del *biofouling* unida a la acumulación de la sal del agua pueden aumentar la corrosión de las estructuras metálicas y componentes de los paneles, reduciendo su vida útil y el rendimiento del sistema (Djalab et al., 2024).

En resumen, aunque se carece de datos específicos sobre la tasa de fallos asociada al *biofouling* en el sector de las FSPV, los efectos adversos más importantes podrían ser los siguientes:

- (i) aumento del coeficiente de resistencia y de las cargas de inercia de los elementos cilíndricos debido al aumento de la rugosidad de la superficie, y reducida conductividad térmica de los cables, lo que ocasionará un aumento de los costes de funcionamiento y mantenimiento;
- (ii) aparición de fallos en los componentes de las estructuras por el aumento del desgaste mecánico y de la abrasión;
- (iii) aumento de las cargas de servicio inesperadas, aumentando la tasa de desgaste y la carga de fatiga de los componentes;
- (iv) la degradación de los materiales y aumento de la corrosión.

6. ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LAS INCRUSTACIONES BIOLÓGICAS

Para hacer frente de manera eficiente a los efectos perniciosos de las incrustaciones biológicas en las estructuras expuestas al medio marino es necesario el desarrollo de un **plan de gestión y control específico** e interdisciplinar, que incluya el conocimiento de ingenieros, desarrolladores de estructuras de ERM, investigadores y expertos en *biofouling* y técnicos y gestores de las estructuras (Figura 17).

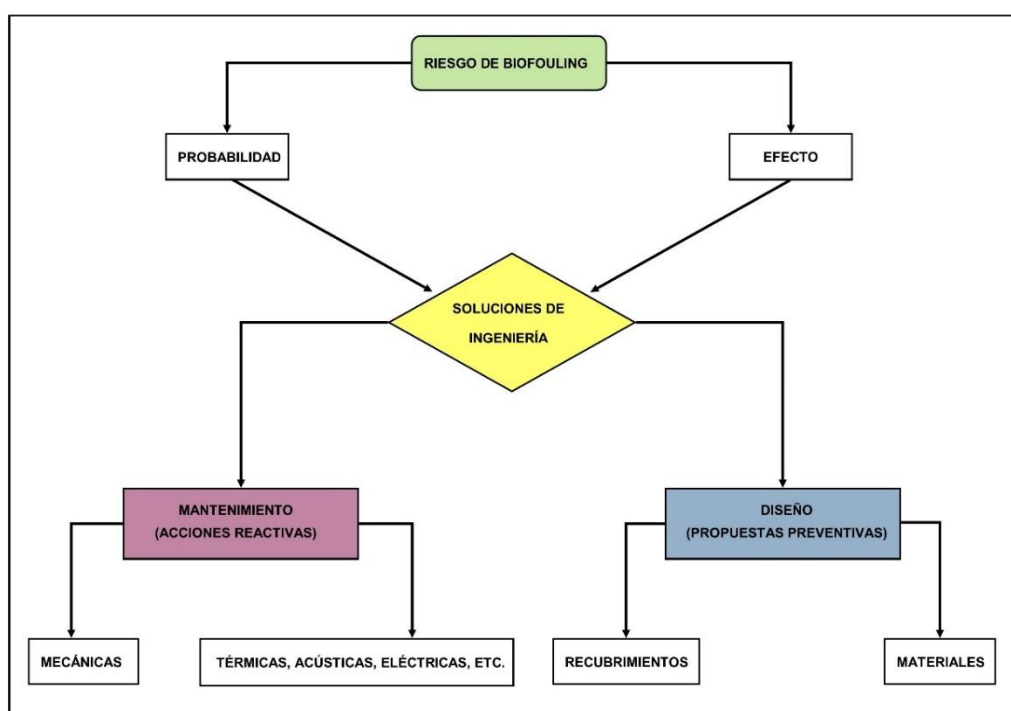


Figura 17. Plan de gestión del desarrollo de incrustaciones biológicas en superficies sumergidas (Figura modificada, obtenida de Swain, 2017).

La elección del método de control más adecuado dependerá de diferentes factores. La primera tarea es evaluar el riesgo del *biofouling*, es decir, la probabilidad de que se desarrolle y su potencial impacto en las estructuras y en su funcionamiento. Una vez evaluado el riesgo, se pueden valorar las diferentes alternativas, bien diseñando estructuras que prevengan o mitiguen el desarrollo de las incrustaciones biológicas (propuestas preventivas) y/o incorporando en el plan de gestión actividades de mantenimiento para el control de estas (acciones reactivas).

6.1 Medidas preventivas

La prevención es, en teoría, la estrategia más efectiva contra el *biofouling*, aunque también es la más complicada debido a la complejidad de los patrones de desarrollo de las incrustaciones biológicas y las duras condiciones en alta mar. Según Price y Figueira (2017), reparar los revestimientos en estructuras eólicas marinas puede ser extremadamente difícil y costoso, llegando a ser hasta 50 veces más caro que el tratamiento inicial de los materiales para prevenir el *biofouling* y la corrosión. En las últimas décadas se han desarrollado nuevos materiales antiincrustantes, principalmente para prevenir la incrustación biológica en los barcos, que ayudan a reducir el asentamiento y crecimiento de organismos en las superficies, mejorando la eficacia y durabilidad de las soluciones antiincrustantes. Estos materiales se categorizan en seis clases principales (Figura 18):

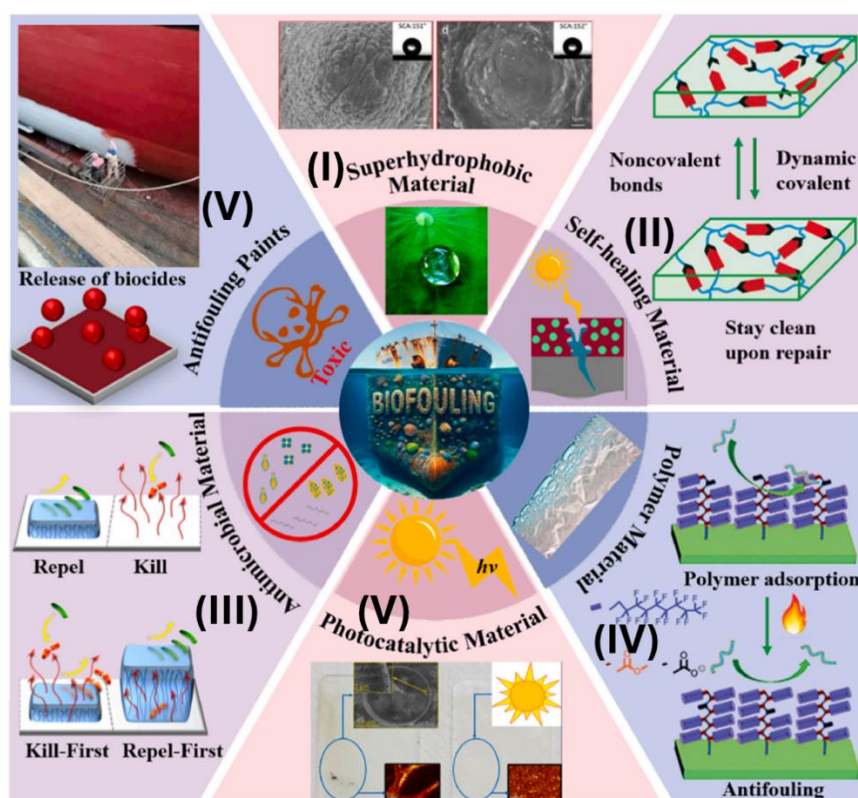


Figura 18. Clasificación de los materiales y recubrimientos anti-bioincrustaciones (Figura tomada de Hong et al., 2024).

- (I) *materiales superhidrofóbicos*: diseñados para repeler el agua, minimizando la adhesión superficial, atrapan el aire disminuyendo la interfaz agua-material,

previniendo el asentamiento y crecimiento de organismos incrustantes (Ashok et al., 2023).

- (II) *materiales autorreparables*: con capacidad de reparar daños de manera autónoma mediante polímeros que pueden reorganizarse o unirse químicamente, asegurando la eficacia antiincrustante a largo plazo (Lin et al., 2021).
- (III) *materiales antimicrobianos*: que inhiben o eliminan directamente los microorganismos, alterando las membranas celulares, alterando el metabolismo o inhibiendo la replicación del ADN, proporcionando una defensa de amplio espectro contra la incrustación biológica (Calabrese et al., 2022).
- (IV) *materiales poliméricos*: diseñados para resistir la incrustación biológica a través de medios físicos y químicos, que resisten la adsorción de proteínas y la adhesión microbiana, aprovechando la hidrofobicidad, la carga y la movilidad molecular (Hsissou et al., 2021).
- (V) *materiales fotocatalíticos*: que aprovechan las reacciones químicas activadas por la luz para degradar la materia orgánica y eliminar microorganismos, generando especies reactivas de oxígeno, con efectos tanto antiincrustantes como de autolimpieza, pudiendo descomponer biopelículas y prevenir la incrustación superficial (Kumar et al., 2021).
- (VI) *recubrimientos antiincrustantes*: método más extendido para prevenir la adhesión de los organismos y el desarrollo de las bioincrustaciones. Los recubrimientos antiincrustantes se dividen en dos grupos, aquellos recubrimientos con biocidas y sin ellos (Calabrese et al., 2022).

En el caso de los recubrimientos antiincrustantes, los **biocidas** se encuentran dentro de la matriz de la pintura que está diseñada para liberar de manera controlada los biocidas a una tasa suficiente para evitar el *biofouling*. La mejor manera de conseguirlo es mediante el uso de **pinturas ablativas a base de colofonia**, que al deteriorarse arrastran las incrustaciones adheridas a la superficie, o polímeros que se hidrolizan en el agua a una velocidad determinada (pintura de copolímero o autolimpiante). Paz-Villarraga et al, (2022) evaluaron las frecuencias de ocurrencia y las concentraciones relativas de biocidas en formulaciones de pinturas antiincrustantes registradas para su comercialización en todo el mundo. Los resultados señalaron que el óxido cuproso, la

piritona de cobre, la piritiona de zinc, el zineb, el DCOIT y el tiocianato cuproso eran los más frecuentes, con concentraciones relativas medias de $35.9 \pm 12.8\%$, $2.9 \pm 1.6\%$, $4.0 \pm 5.3\%$, $5.4 \pm 2.0\%$, $1.9 \pm 1.9\%$ y $18.1 \pm 8.0\%$, respectivamente. Otra alternativa es utilizar **aglutinantes inertes** como los epoxis, los ésteres de vinilo y el poliuretano, pero estos no controlan la tasa de liberación de los biocidas tan bien como la pintura a base de colofonia o la pintura autolimpiante. La efectividad de los recubrimientos con biocida tiene una duración estimada de entre 1 y 5 años, por lo que es necesario volver a aplicarlos con cierta regularidad para garantizar su eficacia.

Por otro lado, en cuanto a los **revestimientos sin biocidas**, su atractivo reside en que se trata de recubrimientos antiincrustantes ecológicos, debido a su respeto por el medio ambiente, es decir, no liberan sustancias tóxicas, y a sus buenas propiedades antiincrustantes (Liu et al., 2023). Los más utilizados consisten en recubrimientos a base de silicona, que proporcionan más de 10 años de vida útil, pero son caros, difíciles de aplicar y son menos resistentes que los recubrimientos con biocidas. Lagerström et al. (2022) demostraron que la silicona funcionaba igual de bien o significativamente mejor que los recubrimientos con biocidas basados en cobre. Respecto a otro tipo de recubrimientos ecológicos, Sanz et al. (2024), después de cuatro años de experimentación en un entorno real, confirmaron que el recubrimiento cerámico a base de titanio mejora la eficacia frente al crecimiento del *biofouling* respecto a la pintura antiincrustante.

En este sentido, es recomendable seleccionar el tipo de revestimiento más adecuado en base a las condiciones de exposición en el medio marino y el tipo de protección deseada. En la Figura 19 se muestra el proceso de selección del tipo de recubrimiento más adecuado en base a ciertas condiciones de exposición.

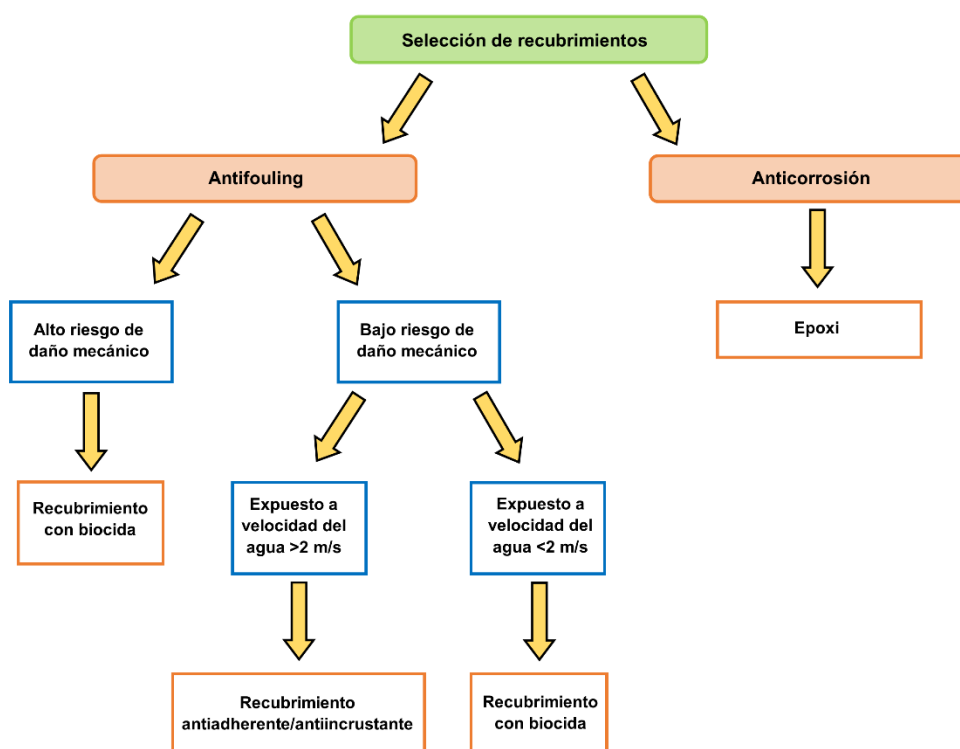


Figura 19. Proceso de selección del tipo de recubrimiento (Figura modificada, obtenida de Vance et al., 2014).

También se han desarrollado revestimientos con **biocidas naturales**, inspirados en la capacidad antiincrustante de los organismos en la naturaleza. Los antiincrustantes de productos naturales son sustancias activas naturales extraídas de plantas terrestres y flora y fauna marina utilizando biotecnología (Pereira et al., 2020; Levert et al., 2021; Darya et al., 2022; Liu et al., 2023). En su mayoría son compuestos orgánicos de origen biológico, como esteroides, ácidos grasos, aminoácidos, indoles y alcaloides (Tian et al., 2020).

Aunque la potencia de algunos productos bioactivos naturales se encuentre a la altura de otros biocidas disponibles, y se haya conseguido aumentar en algunas ocasiones la potencia de la molécula madre mediante la derivación sintética o semisintética, todavía no existe en el mercado ningún producto *biofouling* natural disponible para su uso en el sector de las ERM.

Los desafíos más relevantes para la aplicación de agentes antiincrustantes naturales son su bajo contenido en la naturaleza y en los organismos, la ineficiencia de la tecnología de separación y purificación, lo que dificulta la obtención de grandes

cantidades, así como su poca estabilidad y la dificultad de su conservación a largo plazo (Liu et al., 2023). Una alternativa sería la utilización de **bioactivos sintéticos**. Labriere et al. (2020) sintetizaron un análogo de una sustancia activa antiincrustante natural mediante la modificación química del producto natural marino Phidianidine A y realizaron pruebas antiincrustantes de 84 días sobre probetas expuestas en el medio marino. Los resultados mostraron que el recubrimiento antiincrustante añadido con el análogo de Phidianidine A tenía un fuerte efecto inhibitor sobre el asentamiento de bacterias marinas y microalgas. Otras biocidas sintéticos, como la medetomidina, que se utiliza como analgésico y anestésico, actualmente se usa para impedir el asentamiento de cirrípedos en las estructuras marinas, encontrándose en el mercado bajo el nombre de Selektope™ (ItechAB, Suecia). Otros bioactivos sintéticos cuyo desarrollo se está promoviendo son los péptidos cortos catiónicos, que interrumpen la integridad de la membrana de los organismos incrustantes, y los antiparasitarios como la ivermectina, que, incorporados en revestimientos blandos, matan los organismos incrustantes por contacto.

Por último, se han desarrollado nuevas superficies antiincrustantes modificando la **topografía de la superficie**, imitando aquellas superficies con micro/nanoestructuras que a ciertos animales o plantas les permiten evitar la adhesión de organismos incrustantes como percebes, algas y bacterias (Figura 20).

Así, por ejemplo, Yang et al. (2019) utilizaron diversas superficies biomiméticas de la piel de tiburón y constataron que la fuerza de adhesión de las proteínas disminuía. Por su parte, Chen et al. (2021) observó que, en ensayos de laboratorio, los caparzones de cangrejos resultaron eficaces para inhibir el *biofouling*. Sin embargo, la resistencia mecánica de las superficies modificadas no fue lo suficientemente duradera para las pruebas de campo, seguramente debido a la gran diversidad taxonómica presente en el medio natural, que supone grandes diferencias en las preferencias de asentamiento.

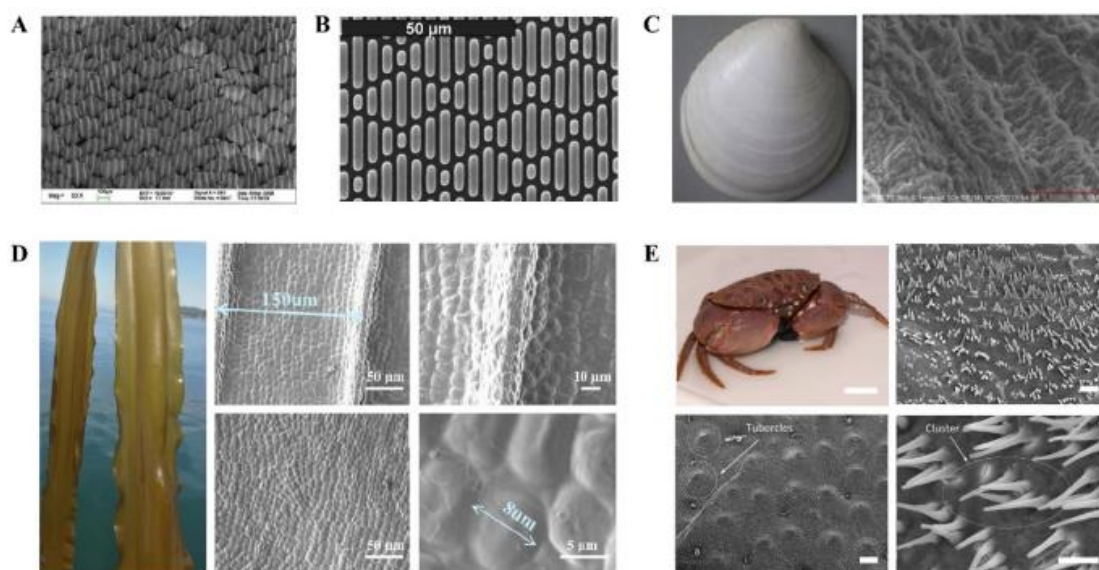


Figura 20. Microtomografías superficiales de organismos marinos capaces de evitar el *biofouling*. A y B: piel de tiburón, imagen obtenida con microscopio electrónico de barrido, por Bai et al., (2013) y por Schumacher et al. (2007), respectivamente; C: concha del bivalvo *Dosinia japonica*, Bai et al. (2013). D: *Laminaria japonica*, Zhao et al. (2020). E: caparazón del cangrejo marino *Myomenippe hardwickii*, Brzozowska et al. (2014).

En líneas generales podría decirse que los revestimientos eficaces permiten una protección antiincrustante pasiva, que sólo necesita una mínima intervención humana para su limpieza y mantenimiento. Sin embargo, actualmente no existe ningún antiincrustante que sea eficaz de forma simultánea para todos los organismos incrustantes y aplicable a nivel mundial. Además, típicamente deben aplicarse anualmente, siendo la alternativa el uso de pinturas con una vida útil mayor, de 3 a 5 años, pero con un coste muy elevado. La retirada de las estructuras localizadas en alta mar para ser anualmente pintadas o realizar dicha aplicación *in situ*, puede suponer un problema logístico importante, dependiendo de las condiciones climáticas y oceánicas, y de gran coste. Otro problema a tener en cuenta es el impacto medioambiental de los biocidas, de los catalizadores y conservantes y de la persistencia de las partículas de pintura que se desprendan de las estructuras, que podrían acumularse en los sedimentos, lo que podría conducir a “zonas negras” de contaminación en la proximidad de las estructuras.

6.2 Medidas reactivas

Aunque las medidas preventivas, como los recubrimientos *antifouling*, han mitigado significativamente los problemas de bioincrustación en las superficies de las estructuras expuestas en el medio marino, es importante reconocer que estos recubrimientos tienen una duración limitada y no eliminan por completo la bioincrustación. Por todo ello, los métodos de control del *biofouling* más extendidos en las estructuras sumergidas en el medio marino son las **acciones reactivas**, es decir, aquellas que abordan el *biofouling* después de que se haya establecido (Kim et al., 2024). Entre las medidas reactivas, las más comunes son las de tipo mecánico, consistentes en **limpiezas regulares** de la superficie (Tabla 2) (p. ej., agua a presión, cepillado/raspado mediante buceo), para asegurar un rendimiento constante y la durabilidad de los materiales.

Los procedimientos de limpieza generalmente se categorizan en dos enfoques principales:

- limpieza en dique seco: aunque con un mayor coste económico (Gong et al., 2019), es más respetuosa con el medio ambiente, ya que no libera químicos al océano.
- limpieza bajo el agua (Morrisey y Woods, 2015): presenta un menor coste económico y menor tiempo de dedicación, sin embargo, podría suponer la introducción inadvertida de una gran cantidad de sustancias peligrosas, incluidos productos químicos antiincrustantes, metales pesados, agentes de limpieza y especies no nativas en el medio marino (Kim et al., 2024).

La limpieza de las superficies suele realizarse mediante agua a alta presión, que constituye una técnica que, no solo erradica la bioincrustación, sino que también protege la integridad de las pinturas *antifouling* presentes en el casco (Floerl et al., 2010). En este sentido, Lin et al. (2022), con el fin de lograr una mejor resistencia a las incrustaciones y eficiencia en la limpieza, sugieren unos parámetros de limpieza concretos con respecto a la fuerza de limpieza, su duración y la frecuencia de la limpieza en los recubrimientos *antifouling*. Sin embargo, estos métodos de limpieza resultan ineficaces a medio-largo plazo y deben realizarse con cierta frecuencia, conllevando un elevado coste y evidentes limitaciones de viabilidad (Hopkins et al., 2021).

Como alternativas emergentes, se está promoviendo diversas técnicas: (i) vehículos operados remotamente; (ii) flujo continuo de burbujas; (iii) tratamientos térmicos; (iv) métodos acústicos; (v) campos eléctricos (Tabla 2).

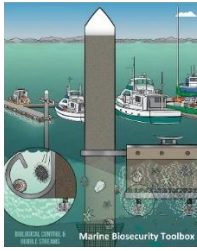
El uso de **vehículos operados remotamente** que incluyen brazos manipuladores o cepillos empleados para la limpieza de los cascos de barcos submarinos (Hachicha et al., 2019; Song y Cui, 2020) (Tabla 2), en algunos casos utilizando radiación láser para este fin (Zimbelmann et al., 2022).

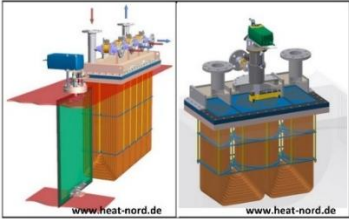
Otras medidas menos extendidas, utilizadas de forma exitosa para prevenir la acumulación de *biofouling* en los cascos de los barcos y en las infraestructuras portuarias sumergidas, es el uso de un **flujo continuo de burbujas** o micro-burbujas (Tabla 2). Según un estudio realizado por Hopkins et al. (2023), las burbujas fueron muy efectivas (>95%) para controlar el crecimiento del *macrofouling* durante los primeros 2 meses, aunque su eficacia disminuyó cuando las burbujas fueron obstruidas por las bioincrustaciones desarrolladas en el difusor. A los 4 meses, las superficies tratadas tenían menos bioincrustaciones (27,5%) comparado con las no tratadas (79,6%), concluyendo que las corrientes de burbujas son efectivas a corto y medio plazo, pero que el diseño del sistema debe ser mejorado para una solución a largo plazo.

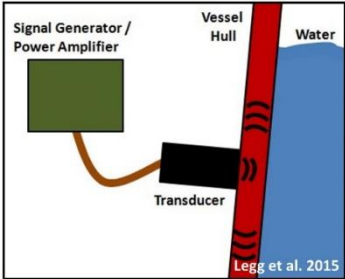
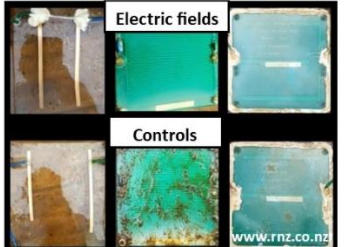
Existen otros métodos menos utilizados pero que podrían aplicarse de manera individual o en combinación con otros métodos para el control del *biofouling*. El **tratamiento térmico** se ha utilizado de manera exitosa como medida de control del *biofouling* en barcos, estructuras estáticas situadas en la costa (Kim et al., 2024) y en cultivos de acuicultura (Hatakeyama et al., 2024) (Tabla 2), envolviendo las superficies en agua de mar y elevando la temperatura (aproximadamente a 70 °C), destruyendo no solo las algas maduras, sino también las esporas de las algas y retrasando el rebrote de macroalgas (Floerl et al., 2010).

También se han propuesto otras alternativas basadas en **métodos acústicos**, con preferencia por las frecuencias ultrasónicas, mediante la formación de ondas con presiones tanto negativas como positivas, desencadenando la generación y posterior ruptura de microburbujas (Albitar et al., 2016), para desalojar organismos sésiles, incluyendo algas y percebes, de las superficies de los cascos. Sin embargo, a pesar de

Tabla 2. Tipos de acciones reactivas emergentes.

Método	Categoría	Técnica	Frecuencia	En el mar/terra	Beneficios	Limitaciones	Coste	Foto
Robots marinos operados a distancia	Mecánica	Sistemas de cepillos giratorios, chorros de alta presión, radiación láser	Periódica y/o continua	En el mar	Baja intensidad de trabajo, alta eficiencia, control óptico y ahorra tiempo	Actualmente su uso está limitado a aguas protegidas, sin olas y corrientes	Bajo	
Flujo de burbujas	Mecánica	Flujos continuos de burbujas o micro-burbujas	Continua	En el mar	Efectivo en paneles con recubrimientos antiincrustantes, no necesita un control constante por parte del operador	Los principales obstáculos son el consumo de energía, el coste inicial de instalación y el mantenimiento de los difusores	Alto	

Método	Categoría	Técnica	Frecuencia	En el mar/tierra	Beneficios	Limitaciones	Coste	Foto
Calor	Térmica	Sistema automatizado capaz de elevar y mantener la temperatura a 60 ± 2 °C (temperatura óptima para tratar el <i>biofouling</i> , aunque se han visto respuestas positivas a temperaturas > 40 °C)	Periódica	Ambos	Efectivo como medida de control en barcos, estructuras estáticas situadas en la costa y en cultivos de acuicultura Los organismos muertos permanecen adheridos a la superficie del casco y se desprenden lentamente con la navegación.	No hay evidencias sólidas sobre su efectividad en infraestructuras de ERM, ni de las condiciones óptimas de funcionamiento. Puede no ser efectivo para algunos organismos	Alto	
Métodos acústicos	Acústica	Dispositivos, compuestos de generador de señales o un circuito auto-oscilante, un amplificador de potencia y un	Periódica	En el mar	Los ultrasonidos (alrededor de 20 kHz) son eficaces para inhibir la formación de <i>biofouling</i>	Eficacia evidenciada en acuicultura, disminuye con la distancia a los transductores; necesidad de una fuente de energía	Bajo	

Método	Categoría	Técnica	Frecuencia	En el mar/tierra	Beneficios	Limitaciones	Coste	Foto
		transductor, que emiten ondas mecánicas en la gama de frecuencias ultrasónicas (> 20 kHz) y audibles (20Hz - 20 kHz)			en superficies suspendidas en el agua	(puede ser fotovoltaica); es necesaria una mayor investigación sobre los efectos a largo plazo sobre la biota		
Campos eléctricos	Eléctrica	Dos electrodos localizados bajo el agua, que crean un campo eléctrico que altera la capacidad de pequeños organismos de vivir en determinadas superficies submarinas	Continua	En el mar	Efectiva como medida de control en barcos y estructuras estáticas situadas en la costa	Es necesario conectar los electrodos a cajas de alimentación	Bajo	

su demostrada eficacia en acuicultura, Knobloch et al. (2021) evidenció una perturbación de la microbiota de las branquias y la piel en peces, incluyendo un aumento de las bacterias potencialmente patógenas, lo que obliga a una mayor investigación sobre los efectos a largo plazo de los métodos acústicos sobre la biota.

Por último, los **campos eléctricos** han resultado eficientes evitando significativamente la presencia de ciertas especies de bacterias (*Pseudomonas* sp., *Vibrio* sp., bacterias de hierro, *Navicula* sp.) y larvas de *Balanus reticulatus* (Feng et al., 2018). En este sentido, podría ser una opción prometedora para aplicarse como método *antifouling* en el futuro, aunque todavía no hay evidencias sólidas sobre las condiciones óptimas de funcionamiento.

7. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO PARA INSTALACIONES FV FLOTANTES

Dada la relevancia del *biofouling* y de sus efectos en las estructuras sumergidas en el medio marino, existen **normas, directrices y legislación específicas** (p. ej., Det Norske Veritas-DNV, British Standards Institute, International Organisation for Standardisation) para la consideración del *biofouling* en su **diseño**: p. ej., utilizar valores potenciales de *biofouling* de 60-100 mm a profundidades de 2-40 metros y de 30-50 mm a profundidades mayores de 40 m (DNV, 2015); consideraciones con respecto al peso del *biofouling* en las líneas de amarre (DNV, 2013). Sin embargo, estas directrices a menudo se basan en datos obtenidos en el Mar del Norte y no proporcionan recomendaciones adaptadas a otros lugares o regiones, ni específicas para los dispositivos utilizados en las ERM (Miller y Loxton, 2016; Miller y MacLeod, 2016). Con respecto a las estructuras FSPV, no existen recomendaciones para el medio marino. Por el contrario, en agua dulce, las recomendaciones para el diseño, desarrollo y explotación de estas estructuras hacen referencia a las bioincrustaciones con respecto a las cargas hidrodinámicas, aumento de la carga estructural y la corrosión de los elementos (DNV GL, 2021).

La presencia y abundancia de las incrustaciones biológicas en cada uno de los elementos que componen las estructuras FSPV vendrá determinado por diferentes factores, pero en líneas generales los componentes de las estructuras que están más expuestos a los efectos del *biofouling* serán, principalmente, los anclajes y líneas de amarre, los cables submarinos y los flotadores y/o membranas donde se colocan los paneles solares. En menor medida también pueden verse afectados por el *biofouling*, al encontrarse en la zona de salpicaduras, la estructura metálica utilizada en ocasiones como soporte de los paneles, los módulos fotovoltaicos y los convertidores de energía si están colocados en una isla flotante (véase sección 5).

Como se ha mencionado anteriormente, los problemas más relevantes generados por el *biofouling* en los elementos que componen las estructuras FSPV son la corrosión acelerada de los materiales, el aumento de la carga estructural del sistema, y la alteración de las propiedades hidrodinámicas y de los coeficientes de transferencia térmica. La probabilidad y grado de importancia de estos modos de fallo dependerá en gran medida del tipo de organismo bioincrustante presente en las estructuras, y de su biomasa, lo que viene determinado por diferentes factores, haciendo difícil proponer

soluciones únicas aplicables a todas las instalaciones FSPV. Sin embargo, en esta sección, a partir del análisis de los **factores más relevantes que determinarán la presencia y desarrollo del *biofouling*** en los diferentes elementos que componen las estructuras FSPV (véanse de Mesel et al., 2015; Macleod et al., 2016; Nall et al., 2017; Want et al., 2017, 2021, 2023), se proponen diferentes **opciones de mantenimiento que podrían utilizarse para optimizar el control del *biofouling*** en estas estructuras (véanse Tiron et al., 2015; Loxton et al., 2017; Djalab et al., 2024; Wu et al., 2024).

7.1 Factores condicionantes del desarrollo del *biofouling* en las estructuras FSPV

La **previsión de las comunidades** que van a colonizar las estructuras FSPV sería uno de los factores que ayudaría a la gestión del *biofouling*, ya que permitiría establecer pautas sobre el tipo de mantenimiento y la cadencia con la que sería necesario realizarlo para optimizar los resultados. En este sentido, no todos los organismos bioincrustantes presentes en una estructura generarán el mismo impacto, siendo los más relevantes (Miller y Loxton, 2016; Miller y MacLeod, 2016):

- (i) *las algas de gran de tamaño*, como las laminarias, que teniendo una flotabilidad neutra pueden ocasionar la abrasión de las estructuras debido a la alteración de las propiedades hidrodinámicas (Figura 21).
- (ii) *los mejillones y ostras*, que además de aumentar la rugosidad de las estructuras y el diámetro de los elementos cilíndricos, aumentan la carga estructural debido al peso de sus conchas calcáreas (Figura 21).
- (iii) *los balanos/percebes o bellotas de mar*, que causan daños similares a los mejillones (Figura 21). También hay que mencionar, por su abundancia y los daños que ocasionan, los gusanos tubícolas calcáreos y los briozoos.

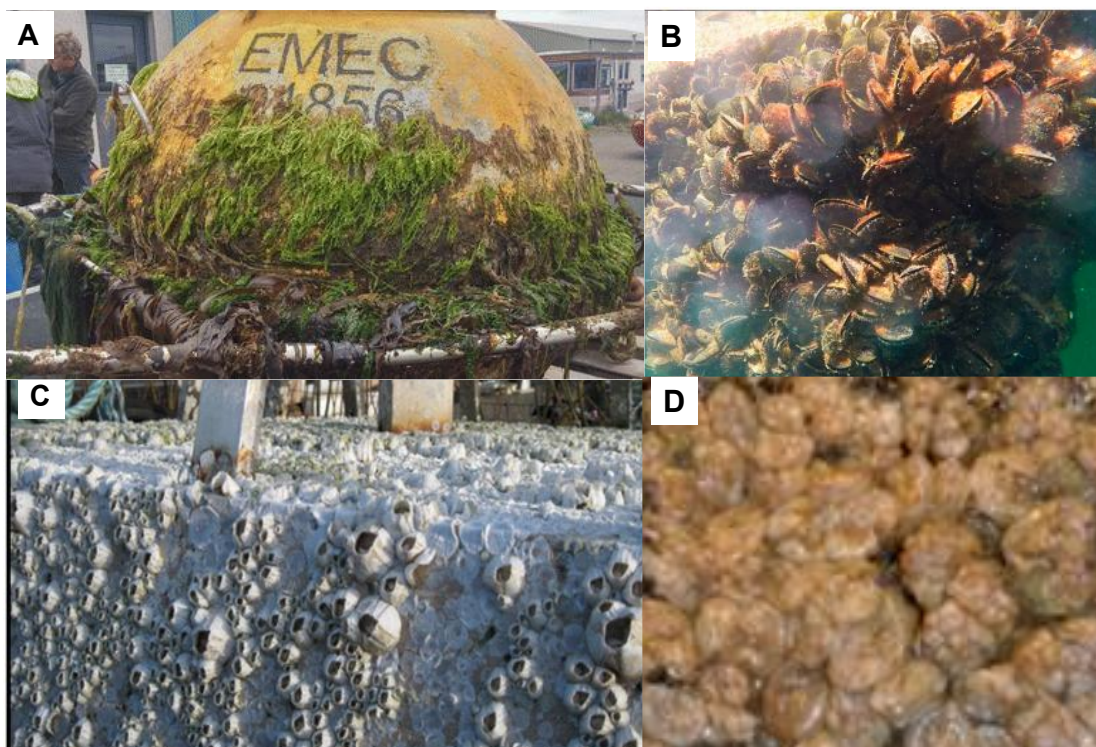


Figura 21. Organismos bioincrustantes generando distintos impactos sobre diferentes estructuras instaladas en el medio marino: A) Laminaria y *Ulva* (modificada de Want et al., 2017); B) Mejillones debajo de un pantalán (modificada de Vinagre et al., 2020); C) balanos/percebes o bellotas de mar sobre una boya (modificada de Want et al., 2017); D) ascidias sobre una placa de acero (modificada de Menchaca et al., 2014).

Los organismos dominantes en las estructuras FSPV, su densidad y el grosor del *biofouling* vendrán determinados mayoritariamente por las **condiciones ambientales y estructurales**. Las condiciones ambientales, hacen referencia sobre todo a la velocidad de la corriente, la exposición al oleaje, la salinidad, la temperatura y la disponibilidad de alimento y luz. En gran parte, estas variables están ligadas a la **zona biogeográfica** donde se instalen las estructuras FSPV. Como se ha detallado en la sección 3 del presente informe, existen pequeñas diferencias en cada zona geográfica estudiada (i.e., predominancia de los bivalvos, cirrípedos y briozoos en los mares del norte (Mar Céltico, el Mar del Norte y el Mar Báltico), briozoos y cirrípedos en el Mar Negro, briozoos (costa Cantábrica), cirrípedos (en Cádiz) o cirrípedos o moluscos (en Portugal dependiendo de la profundidad y distancia a costa) en la provincia lusitana y los gusanos tubícolas y bivalvos en el Mediterráneo), sin embargo, los grupos previamente mencionados suelen ser los predominantes en las superficies sumergidas en la zona biogeográfica noratlántica templada.

Con respecto a la **temperatura del agua**, este es un parámetro determinante en la composición de las comunidades del *biofouling*, ya que influye en el periodo de desove, asentamiento, crecimiento y reproducción de los organismos; por ejemplo, en las zonas templadas (temperaturas de 5-20 °C), el *biofouling* se producirá durante todo el año y mostrará una fuerte estacionalidad, donde la mayor parte del desove y el crecimiento tendrá lugar desde la primavera (principios de abril) hasta principios del otoño (finales de octubre).

Otros factores específicos a tener en cuenta son el **contenido de materia orgánica, factores bióticos y el perfil energético en la zona** donde se colocarán los dispositivos, ya que esto en gran medida determinará las especies que colonizarán las superficies de las estructuras y el número de taxones presentes en la comunidad del *biofouling*. Por ejemplo, la presencia de las algas se ve limitada a elementos que se encuentren en la zona fótica, pero su proliferación también viene determinada por la turbidez del agua, que limitará la luz, afectando a la fotosíntesis y al crecimiento. Por encima de un umbral de velocidad del agua, los mejillones y balanos/percebes sustituyen a las algas, ya que se ven favorecidos por el aporte de partículas de las corrientes. En el caso de los mejillones, tienden a formar agregaciones densas hasta los 30 m de profundidad, donde empiezan a dominar los percebes. Sin embargo, el predominio entre mejillones y percebes viene determinado por otros factores, como la corriente y la exposición al oleaje (los mejillones toleran corrientes intermedias-altas, mientras que los percebes tienen mayor tolerancia a corrientes muy altas y al oleaje).

Las **condiciones estructurales** hacen referencia a los **materiales utilizados** en las estructuras, pero también a parámetros relativos a la **localización de las estructuras, como son la distancia a costa y la profundidad**. En cuanto a la distancia a costa, entre aquellas localizadas en zonas cercanas, se han observado diferencias substanciales en la composición biológica del *biofouling* dependiendo de si eran estructuras flotantes o fijas. Estas diferencias se atribuyeron a la presencia o ausencia de una zona intermareal, o zona de "barrido", así como a los distintos niveles de exposición a la luz. Las larvas y huevos de muchos invertebrados y las esporas de las algas son arrastradas por las corrientes hasta alcanzar un lugar adecuado para el asentamiento o hasta que el propágulo deja de ser viable. Por ello, a mayor proximidad a la costa, mayor será la probabilidad de éxito de la colonización, especialmente en las estructuras fijas (Miller and Macleod, 2016). Además, se podrían esperar diferentes

organismos bioincrustantes dependiendo de la composición de las superficies (p. ej., metal, plástico, madera), el color, la rugosidad, el tiempo de inmersión y el movimiento (p. ej., dispositivos de movimiento libre como los flotadores, frente a estructuras estáticas como los anclajes). También se pueden observar diferentes tipos de *biofouling* en una misma estructura FSPV, con diferentes especies colonizando las zonas de salpicaduras, intermareal poco profundas y submareales más profundas. Por ejemplo, los elementos presentes en las zonas de salpicaduras, por encima de la línea de flotación, estarán expuestos a largos periodos de desecación, proporcionando un hábitat ideal para las especies del litoral superior en comparación con las zonas sumergidas. Sin embargo, en líneas generales, las comunidades de *biofouling* estarán dominadas por mejillones, macroalgas y percebes cerca de la superficie del agua, artrópodos filtradores a profundidades intermedias y anémonas en la zona más profunda (Figura 22; ejemplo de zonación vertical en un aerogenerador marino que podría extrapolarse a las líneas de amarre y los cables submarinos) (Schoefs et al., 2022). Además, podrían esperarse valores de riqueza de especies más altos en las zonas intermedias, entre los 15 y 25 m (Coolen et al., 2020).

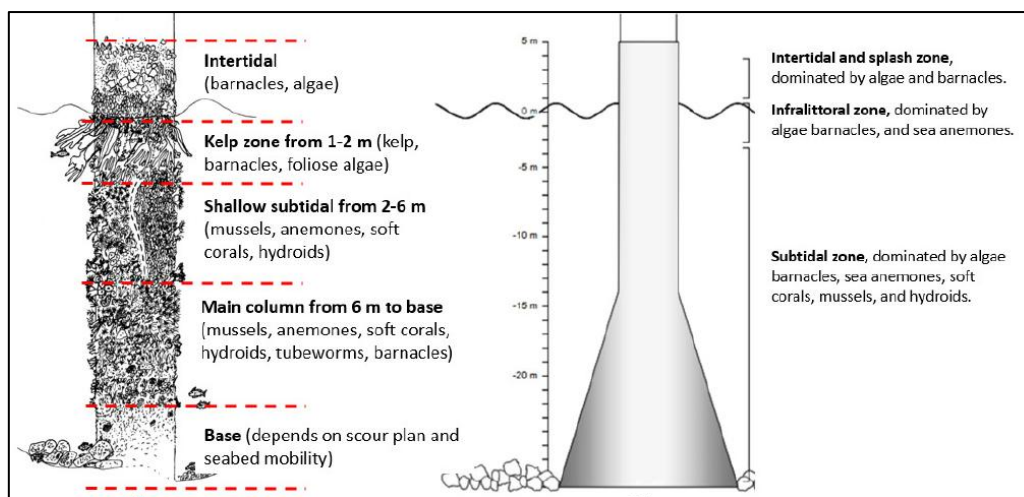


Figura 22. Esquema de la distribución vertical, con la profundidad, de los organismos bioincrustantes en la parte sumergida de un aerogenerador marino (Figura obtenida de Schoefs et al., 2022).

A la hora de valorar las especies que dominarán en las estructuras FSPV, también hay que tener en consideración la **sucesión de especies a lo largo del tiempo**, ya que las estructuras FSPV tienen potencialmente una vida útil de 25 años. Estudios previos han identificado tres etapas de sucesión (Figura 23): (i) una relativamente corta (0-2 años) con pocos organismos colonizadores, (ii) una etapa intermedia (3-5 años) caracterizada

por la presencia de numerosos suspensívoros y (iii) una última etapa “clímax” (6 años en adelante) codominada por anémonas y mejillones. Con el tiempo, el *biofouling* de la sección vertical de las estructuras marinas será bastante uniforme, con dominancia de unas pocas especies competitivas (De Mesel et al., 2015; Degraer et al., 2020).

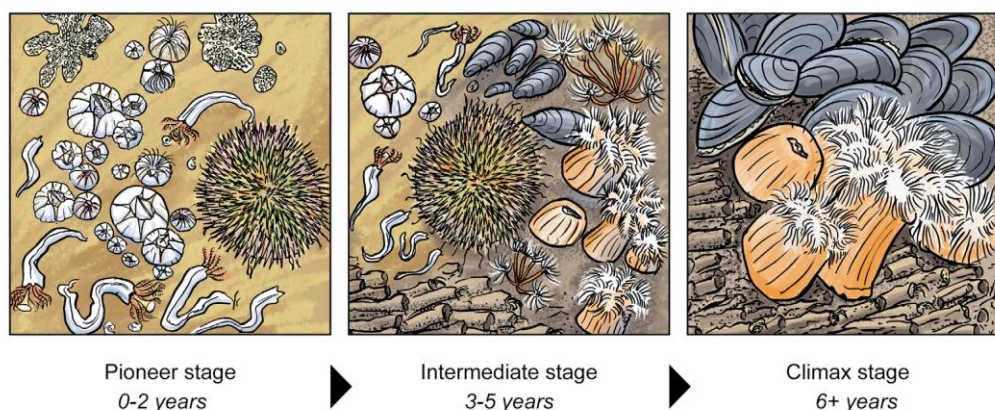


Figura 23. Colonización de turbinas eólicas mostrando las diferentes etapas de sucesión del *biofouling* (Figura obtenida de Degraer et al., 2020).

La información descrita anteriormente puede utilizarse para **establecer un protocolo de actuación** en las estructuras FSPV (véase sección 6), ya sea en la fase de desarrollo de nuevas infraestructuras FSPV, a la hora de **seleccionar materiales** (metales y aleaciones, hormigón, etc.) con cierta resistencia al *biofouling* y/o recubrimientos (con y sin biocidas) que protejan, a largo plazo, la superficie de los materiales, como a la hora de **establecer estrategias de mantenimiento específicas**. Debido al elevado coste en los desarrollos de materiales y recubrimientos que hagan frente a las bioincrustaciones y su falta de eficacia a largo plazo, los métodos de control del *biofouling* más extendidos entre los gestores de las estructuras sumergidas en el medio marino son las **medidas reactivas** (i.e., abordan el *biofouling* después de que se haya establecido). Tal y como se ha detallado en la sección 6.2, las más habituales son las mecánicas (p. ej., agua a presión, cepillado/raspado mediante buceo).

7.2 Opciones de mantenimiento para las estructuras FSPV

El objetivo del mantenimiento es maximizar los beneficios económicos, extender la vida útil de los componentes, reducir las reparaciones de emergencia y evitar fallos impredecibles de los equipos. Se ha estimado, que reducir el acceso a las estructuras localizadas offshore en una visita al año, podría suponer un ahorro de 30.000 euros por estructura (Want et al., 2023), lo que demuestra la relevancia de una buena planificación

y conocimiento del *biofouling* presente en las estructuras. El mantenimiento operacional de las estructuras marinas incluye a menudo actividades de raspado, limpieza o eliminación de las bioincrustaciones. Sin embargo, en la actualidad no existen protocolos estandarizados para el mantenimiento de las estructuras *offshore* de energías renovables.

Con el fin de identificar las problemáticas a las que se enfrentan los gestores de estructuras marinas *offshore* y las estrategias de control aplicadas y su frecuencia, en el 2022, en el marco del proyecto NEOMAT (de la Convocatoria ELKARTEK 2021), se preparó un **cuestionario** con 17 preguntas que se envió a diferentes desarrolladores y gestores de infraestructuras localizadas en alta mar. Los participantes (n=18) representaban una amplia variedad de estructuras (p.ej., boyas, estructuras de acuicultura, un aerogenerador marino, estructuras flotantes para la experimentación marina, cadenas, etc.), situadas a distancias de 0-50 km de la costa. En general, el *biofouling* se identificó como uno de los factores más relevantes del deterioro de las estructuras (Figura 24). La mayoría indicó que la limpieza de las estructuras se realizaba anualmente, aunque en algunos casos la limpieza se hacía con una cadencia menor (mensual o semestral) o mayor (cada 2-4 años o cuando se observaban acumulaciones relevantes), y el periodo elegido normalmente era la primavera-verano. Indicaron que realizaban las limpiezas mayormente mediante agua a presión y raspado, tanto en tierra como en la propia ubicación de la estructura, con un coste aproximado de 3.000-60.000 euros por actuación, siendo los bivalvos, algas y gusanos tubícolas los organismos más abundantes. Solamente dos de los participantes indicaron una estima aproximada de la biomasa de las incrustaciones biológicas retiradas de una boya localizada en el mar Cantábrico a 4 kilómetros de la costa y de un barco en Estados Unidos, donde se recogieron 36 y 100 kg de bioincrustaciones, respectivamente. Además, solamente un participante indicó que realizaban la gestión de las bioincrustaciones retiradas, utilizándolas para preparar compost.

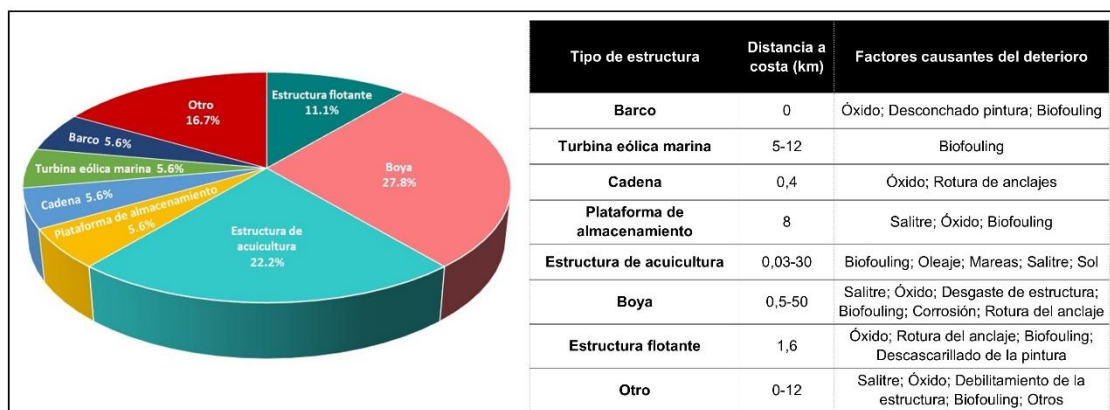


Figura 24. Tipo de estructuras referidas por los participantes, su localización (distancia a costa, en km) y los factores más relevantes causantes de su deterioro.

Posteriormente, en el contexto del proyecto EKIOCEAN, **dicho cuestionario ha sido adaptado** (Anexo, Figura A1) y enviado a los desarrolladores más importantes de fotovoltaica flotante en el medio marino: *Oceans of Energy*, *Bluewater*, *Solar duck*, *Tractebel-Engie*, *Swimsol*, *Moss Maritime*, *Ocean Sun*, *RWE*, *Solar in Blue*, *Helio Rec*, *Ciel&Terre* and *SeaVolt*. De los 12 cuestionarios enviados, sólo se recibió la respuesta de *Oceans of Energy* en Países Bajos. Este desarrollador mantuvo instalado y operativo un dispositivo de fotovoltaica flotante, compuesto de 64 módulos interconectados, durante 4 años, desde 2020, a 12 km de la costa en el Mar del Norte. Se trata del primer dispositivo del mundo que opera en alta mar con olas altas. Indicaron que el tipo de deterioro más común correspondía a los excrementos de las aves, que pueden ser muy abundantes en los días de verano con vientos de intensidad baja, ya que afectan a los módulos fotovoltaicos (véase Vlaswinkel et al., 2023). Realizaron la limpieza de la estructura dos veces al año, coincidiendo con la época estival, aunque dicho dispositivo contaba con un sistema de autolimpieza que permitía un mantenimiento más eficaz y continuo. Respecto al *biofouling*, señalaron que éste sólo fue retirado después del desmantelamiento de la estructura y en puerto, mediante lavado con agua a presión y raspado *in situ*. Por último, no realizaron ningún tipo de gestión o reciclaje selectivo, pero indicaron su interés de cara al futuro.

Como puede observarse en la literatura más reciente (p. ej., Mavraki et al., 2023; Vlaswinkel et al., 2023) y en las respuestas enviadas por *Oceans of Energy*, al contrario de lo que sucede con tecnologías *offshore* más maduras (p. ej., acuicultura, plataformas de petróleo y gas, energías undimotriz y mareomotriz), en estos momentos el *biofouling* no es uno de los factores más relevantes para los desarrolladores de estructuras FSPV

marinas. Hay que tener en cuenta que los sistemas FSPV están experimentando una transición en su desarrollo, pasando de entornos de agua dulce relativamente controlados a entornos marinos altamente complejos y con sus propios retos (medio salino, oleaje y corrientes, vientos fuertes, ocasionales fenómenos extremos). Estos pueden afectar significativamente a las estructuras FSPV, ocasionando la fatiga prematura de los componentes, la reducción de la vida útil, y la disminución de la potencia máxima de salida y de la eficiencia (Djalab et al., 2024). Es por ello, que la mayoría de las acciones en el campo de las estructuras FSPV se están enfocando en el desarrollo de soluciones tecnológicas para mejorar su integridad estructural y viabilidad económica en el medio marino, con el fin de alcanzar niveles de madurez tecnológica (*TRLs*, de su nombre en inglés) altos que permitan su comercialización (actualmente el prototipo de *Oceans of Energy*, que es el único que ha soportado olas de 10 m, se encuentra en un TRL 6, indicando que la infraestructura ha sido probada y demostrada en un entorno relevante; Vlaswinkel et al., 2023). Sin embargo, en base a la información disponible sobre la gestión del *biofouling* en estructuras FSPV en agua dulce y de otras estructuras marinas sumergidas, en esta sección se ofrecen recomendaciones para el mantenimiento de las estructuras FSPV *offshore*.

Según se establece en las recomendaciones prácticas para el diseño, desarrollo y funcionamiento de las estructuras FSPV en agua dulce (DNV GL, 2021), deberían realizarse estudios específicos para determinar el **crecimiento del *biofouling* y las especies dominantes** en el emplazamiento donde estén las infraestructuras FSPV (según lo señalado en el apartado 7.1) y esta evaluación debería utilizarse para seleccionar las **estrategias de mantenimiento** adecuadas para el control y mitigación del *biofouling*.

7.2.1 Estudios específicos para determinar el *biofouling*

Con el fin de determinar las especies que podrían dominar las estructuras FSPV presentes en un lugar concreto, se pueden utilizar **diferentes enfoques** (p. ej., Miller y MacLeod, 2016; Want et al., 2017; Zupan et al., 2023):

- a. realizar una serie larga de **monitoreo para la identificación de comunidades del *biofouling***.
- b. utilizar las **bases de datos de *biofouling*** desarrolladas en el marco de diferentes proyectos europeos (p. ej., proyecto ABIOP, proyecto

BIOFREE, proyecto OCEANIC, presente proyecto), que incluyen no sólo el inventario de especies incrustantes presentes en las diferentes ecorregiones, sino también datos relativos a los parámetros clave de las bioincrustaciones, como el grosor y el peso de estas.

- c. usar los **datos oceanográficos, medioambientales y biológicos** de acceso libre para establecer relaciones que permitan el desarrollo de mapas predictivos del crecimiento del *biofouling* en una zona.
- d. **desarrollo de ensayos** o desplegar, antes de la instalación de las estructuras FSPV, paneles de asentamiento en los lugares donde se pretenden instalar estas estructuras para entender cuál es el comportamiento específico del *biofouling* presente en esa zona, incluyendo estudios estacionales y de sucesión.

7.2.2 Estrategias de mantenimiento

Los enfoques descritos en el apartado anterior proporcionarían información de utilidad a los gestores de las estructuras FSPV para la **programación de las actividades de mantenimiento**. Por ejemplo, si las incrustaciones en una profundidad y ubicación concretas estuviesen dominadas por balanos/percebes, y sabiendo que estos liberan los propágulos mayormente en primavera, podría organizarse el mantenimiento a finales de verano, proporcionando el máximo tiempo antes de que comience la nueva fase de crecimiento. Otro ejemplo sería la programación de actividades de mantenimiento específicas para las algas pardas en situaciones en las que se esperase que estas fueran los organismos incrustantes dominantes (sobre todo en estructuras colocadas en la zona fótica y en aguas con bajo contenido de nutrientes), evitando así los cambios hidrodinámicos y la abrasión debido al contacto con las algas pardas de gran tamaño (véase Figura 25 como ejemplo).

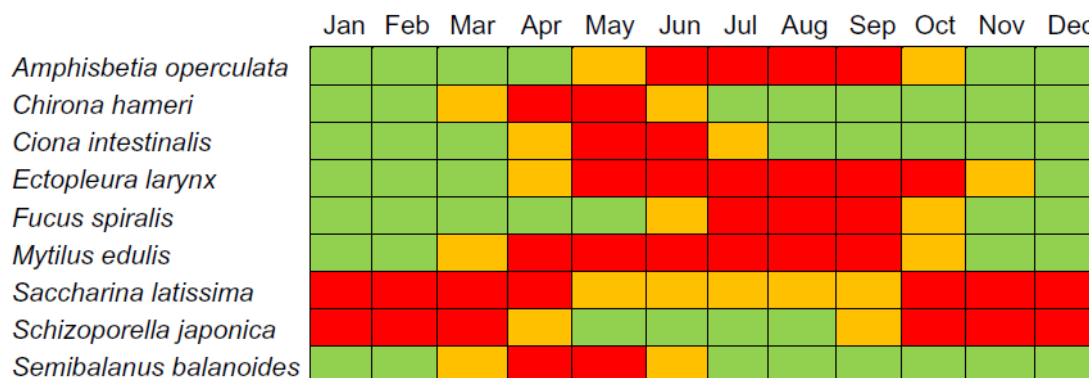


Figura 25. Especies clave de *biofouling* identificadas en estructuras de energías renovables marinas en Orkney (Escocia) y sus periodos de asentamiento. Los meses en rojo indican la temporada de asentamiento más alta; los meses en naranja son de riesgo intermedio, y los meses en verde son los de menor riesgo (figura obtenida de Want et al., 2017).

• Factores a considerar

Además, atendiendo a cada uno de los elementos que conforman las estructuras de FSPV, a continuación se detallan los **factores a considerar para su mantenimiento** (véanse Pham et al., 2019; World Bank Group/ESMAP/SERIS, 2019; Shi et al., 2023):

- El funcionamiento y mantenimiento de la **parte eléctrica del sistema FSPV** deberá seguir las indicaciones estándar del sector industrial. En el caso de los **convertidores**, el daño más relevante podría ser la corrosión facilitada por el *biofouling*. Para el mantenimiento, deberían seguirse las indicaciones establecidas por el fabricante para evitar posibles averías que ocasionen un bajo rendimiento.
- Con respecto a los **módulos fotovoltaicos**, deberían realizarse inspecciones de electroluminiscencia cuando se sospeche la degradación de los sistemas. Estas inspecciones pueden realizarse manualmente o mediante drones, lo que facilitaría la revisión de los paneles en las estructuras localizadas en mar abierto.
- En el caso de los **cables**, podrían ocurrir fallos de aislamiento o daños visibles en la cubierta debido al *biofouling*, por lo que deberá controlarse periódicamente el *biofouling* y retirarlo adecuadamente. En el caso del **sistema de anclaje y las líneas de amarre**, estos deben inspeccionarse para detectar desgaste, fatiga, corrosión, bioincrustaciones y otras formas de degradación o daños mediante

inspecciones realizadas por personal cualificado. Estas inspecciones visuales pueden realizarse mediante buceadores, pero en el caso de las estructuras *offshore*, se recomienda el uso de vehículos operados por control remoto (ROV) equipados con cámaras. En la inspección se prestará especial atención al revestimiento de los cables y a los puntos de conexión entre el flotador y las líneas de amarre. Esto permitirá realizar la sustitución de los cables y/o cabos averiados antes de que afecte a la productividad de la estructura. También podrían utilizarse galgas extensométricas, que proporcionen información sobre la transmisión de la energía y la integridad de las líneas de amarre. En el caso de los anclajes, también deberían realizarse inspecciones visuales periódicas para detectar cualquier desgaste u otro tipo de degradación. En el caso de los componentes situados por encima y/o cerca de la superficie del agua, como los grilletes, las cadenas y los cables, se puede realizar una inspección semestral en busca de *biofouling*, corrosión y degradación. En el caso de los componentes sumergidos como anclas, grilletes subacuáticos, cabos de amarre y cables submarinos, se pueden realizar inspecciones visuales bienalmente.

- Los **flotadores** deberían inspeccionarse periódicamente para detectar desgaste, fatiga, pérdida de flotabilidad u otras formas de degradación (como la corrosión de los componentes metálicos) mediante sensores e inspecciones visuales. Los trabajos de mantenimiento pueden requerir la retirada temporal de uno o varios flotadores de la estructura FSPV para su reparación o sustitución. Esto deberá tenerse en cuenta y realizarse de manera que no afecte a los requisitos funcionales y los criterios de rendimiento de la estructura FSPV.

- **Limpiezas**

Como se ha indicado en la sección 6.2, la **limpieza de las estructuras** se puede llevar a cabo en dique seco o en alta mar. La primera opción es ambientalmente más sostenible, ya que reduce la introducción de cantidades sustanciales de material microscópico (biológico y químico) al medio, pero supone un coste mayor, por eso la mayor parte de las limpiezas de las estructuras FSPV se realizarán previsiblemente en alta mar. Aunque la limpieza puede realizarse manualmente, el mantenimiento de las estructuras offshore se verá facilitado por el uso de métodos que funcionen a distancia o de manera continua *in situ*, con un mínimo control por parte de los gestores de las infraestructuras, como los robots de limpieza subacuáticos que sustituirían la limpieza mediante buzos o dispositivos unidos magnéticamente a las estructuras y que realicen la limpieza de manera continua e independiente (Rémouit et al., 2018; Wu et al., 2024) (Figura 26).



Figura 26. Robot de limpieza para los módulos fotovoltaicos (izquierda) (figura obtenida de Wu et al., 2024).

La programación de la limpieza debería planificarse en base a las condiciones ambientales e idealmente debería llevarse a cabo después de los periodos previstos de mayor crecimiento del *biofouling*. Otra alternativa, una vez que se tengan datos operativos suficientes, sería la organización de **limpiezas preventivas**, llevadas a cabo antes de que el desarrollo del *biofouling* sea relevante, ya que esto supone un riesgo menor para la introducción de especies no nativas, porque minimiza la traslocación de especies macroincrustantes. Independientemente del tipo de limpieza seleccionado, si esta se realiza en alta mar, sería recomendable incluir un proceso de captura de los residuos retirados de las estructuras, y su posterior procesado, ya que esto minimizaría el riesgo de introducción de compuestos químicos en el agua y la liberación de especies no nativas (GESAMP, 2024; Want et al., 2017).

- **Seguimiento de las bioincrustaciones**

Otras recomendaciones que provienen del seguimiento de las bioincrustaciones en los buques (IMO, 2023), y que podrían ser de interés para los gestores de las FSPV, es instaurar un **plan de gestión de las bioincrustaciones** y un libro de gestión de las mismas, donde se incluya un calendario de inspecciones, una descripción del seguimiento de los parámetros de riesgo del *biofouling* y un plan de contingencia específico en base al seguimiento realizado (p. ej., zonas de especial acumulación del *biofouling*). En el libro de registros del *biofouling* se deberían incluir detalles sobre la limpieza y las inspecciones y sus resultados. Estas acciones darán información sobre la abundancia, distribución y composición de las comunidades de organismos presentes en el *biofouling* y esta información podría ser utilizada para elaborar estrategias de gestión (GESAMP, 2024).

- **Impacto del cambio climático**

Por último, es importante destacar que la gestión del *biofouling* podría volverse aún más complicada en el futuro cercano debido al cambio climático (Vinagre et al., 2024). Concretamente, el aumento de la temperatura y la acidificación del océano pueden alterar la estructura, composición y abundancia de las comunidades del *biofouling*, donde organismos calcáreos, como percebes y mejillones, podrían ser reemplazados por especies de cuerpo blando como las ascidias (Dobretsov et al., 2019). Además, las temperaturas más cálidas aceleran el metabolismo y las tasas reproductivas de los organismos, lo que podría conllevar el aumento del asentamiento y colonización de las superficies sumergidas. Esto resultaría en una dinámica de *biofouling* acelerada, donde los organismos que se establecen crecen a un ritmo más rápido, agravando la dificultad de la gestión del *biofouling* en mares templados y polares. **Este ritmo acelerado de crecimiento del *biofouling* supondría un aumento en la frecuencia de limpieza de las estructuras.** Por lo tanto, el aumento de la temperatura y la acidificación también pueden afectar la durabilidad y eficacia de algunas soluciones *antifouling*, lo que podría tener importantes repercusiones económicas y ambientales.

8. CONCLUSIONES

- En la actualidad no existen guías o protocolos estandarizados para la gestión del *biofouling* en las estructuras de ERM, incluidos las de FVFP, debido a su relativamente reciente desarrollo y a la confidencialidad asociada a los proyectos.
- Sin embargo, el *biofouling* se considera uno de los principales retos de la Economía Azul en la transición hacia un sistema de producción de energía renovables que sea sostenible, eficiente y económico. Las incrustaciones biológicas perjudican el rendimiento del sistema y aumentan el riesgo de daños estructurales debido al aumento de peso y la biocorrosión, lo que tiene importantes repercusiones económicas y ambientales.
- Por lo tanto, el éxito del sector de las ERM dependerá en parte del desarrollo de un sistema de gestión específico e interdisciplinar, que permita prevenir o combatir de manera eficiente las incrustaciones biológicas.
- En primer lugar, es necesario **comprender los factores** del desarrollo del *biofouling*: la presencia y abundancia de las incrustaciones biológicas depende de numerosos factores como la zona biogeográfica, factores bióticos (p.ej., ciclos de vida de los organismos, preferencias de asentamiento) y abióticos (p.ej., temperatura, turbidez, nutrientes), características de las estructuras (p.ej., rugosidad, material, móviles o fijas) y posición de la estructura (p.ej., profundidad, distancia a costa, perfil energético). En todo caso, los organismos más relevantes, debido a su potencial para dañar las estructuras de ERM (i.e., el grosor y rugosidad de las incrustaciones y el aumento de peso son los factores que más afectan a la eficiencia de las estructuras de ERM), son los mejillones, balanos/percebes y gusanos tubícolas, que son, a su vez, los organismos predominantes en las superficies sumergidas en la zona biogeográfica noratlántica templada.
- En segundo lugar, se trata de **elegir las mejores medidas preventivas**, mediante el uso de recubrimientos o materiales adecuados **y/o aplicar las mejores prácticas reactivas**. Una buena alternativa sería combinar métodos físicos/químicos reactivos autónomos (o semi-autónomos) con revestimientos o materiales más eficientes, que cumplan con las necesidades del sector energético renovable marino, en términos de inocuidad ambiental, efectividad *antifouling* y anticorrosión por periodos largos de tiempo y con limitados costes.

- En tercer lugar, **entender las pautas del crecimiento del *biofouling* y las especies predominantes** en la zona donde se van a instalar las estructuras es de gran relevancia, por lo que se debería **monitorear y evaluar** con cierta frecuencia la presencia del *biofouling*, con el fin de garantizar la efectividad y eficiencia de los métodos preventivos y reactivos, así como para establecer una programación óptima de las actividades de mantenimiento, que alargue la vida útil de las FSPV y maximice su funcionamiento.

9. BIBLIOGRAFIA

- Abed, R.M., Al Fahdi, D., Muthukrishnan, T., 2019. Short-term succession of marine microbial fouling communities and the identification of primary and secondary colonizers. *Biofouling* 35, 526–540.
- Abdelsalam, K.M., Wahab, M.M.A., 2012. Effects of depth and orientation on marine fouling assemblages in the coastal waters of Abu Qir Harbor, Egypt. *Journal of King Abdulaziz University* 23(2), 3-24.
- Adams, T.P., Miller, R.G., Aleynik, D., Burrows, M.T., 2014. Offshore marine renewable energy devices as stepping stones across biogeographical boundaries. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 51, No. 2, pp.330–38.
- Albitar, H., Dandan, K., Ananiev, A., Kalaykov, I., 2016. Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 13, 7
- Amer, A., Attar, H., As'ad, S., Alsaqoor, S., Colak, I., Alahmer, A., Alali, M., Borowski, G., Hmada, M., Solyman, A., 2023. 'Floating photovoltaics: assessing the potential, advantages, and challenges of harnessing solar energy on water bodies', *Journal of Ecological Engineering*, vol. 24, no. 10, pp. 324-339. <https://doi.org/10.12911/22998993/170917>
- Anger, K., 1978. Development of a subtidal epifaunal community at the island of Helgoland. *Helgol Wiss Meeresunters* 31, 470-475.
- Ashok, D., Cheeseman, S., Wang, Y., Funnell, B., Leung, S.F., Tricoli, A., Nisbet, D. 2023. Superhydrophobic surfaces to combat bacterial surface colonization. *Adv. Mater. Interfac.* 10 (24), 2300324 <https://doi.org/10.1002/admi.202300324>
- Bai, X.Q., Xie, G.T., Fan, H., Peng, Z.X., Yuan, C.Q., Yan, X.P., 2013. Study on biomimetic preparation of shell surface microstructure for ship antifouling. *Wear* 306, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.020>
- Becker, L.R., Ehrenberg, A., Feldrappe, V., Krönche, I., Bischof, K., 2020. The role of artificial material for benthic communities – Establishing different concrete materials as hard bottom environments. *Marine Environmental Research* 161: 105081.

- Benjamins, S., Williamson, B., Billing, S.-L., Yuan, Z., Collu, M., Fox, C., Hobbs, L., Masden, E. A., Cottier-Cook, E. J., Wilson, B., 2024. Potential environmental impacts of floating solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114463>.
- Bressy, C., Briand, J.-F., Lafond, S., Davy, R., Mazeas, F., Tanguy, B., Martin, C., Horatius, L., Anton, C., Quiniou, F., 2022. What governs marine fouling assemblages on chemically-active antifouling coatings? *Prog. Org. Coating* 164, 106701.
- Bosch-Belmar, M., Escurriola, A., Milisenda, G., Fuentes, V.L., Piraino, S., 2019. Harmful fouling communities on fish farms in the SW mediterranean sea: Composition, growth and reproductive periods. *Journal of Marine Science and Engineering* 7(9).
- Brzana, R., Janas, U., 2016. Artificial hard substrate as a habitat for hard bottom benthic assemblages in the southern part of the Baltic Sea - a preliminary study. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 45(1), 121-130.
- Brzozowska, A.M., Parra-Velandia, F.J., Quintana, R., Zhu, X.Y., Lee, S.S.C., Chin-Sing, L., Janczewski, D., Teo, S.L.M., Vancso, J.G., 2014. Biomimicking micropatterned surfaces and their effect on marine biofouling. *Langmuir* 30, 9165–9175. <https://doi.org/10.1021/la502006s>.
- Calabrese, C., La Parola, V., Testa, M.L., Liotta, L.F., 2022. Antifouling and antimicrobial activity of Ag, Cu and Fe nanoparticles supported on silica and titania. *Inorg. Chim. Acta*. 529, 120636 <https://doi.org/10.1016/j.ica.2021.120636>.
- Cámara, B., de Buergo, M.A., Bethencourt, M., Fernández-Montblanc, T., La Russa, M.F., Ricca, M., Fort, R., 2017. Biodeterioration of marble in an underwater environment. *Science of the Total Environment* 609, 109-122.
- Chapman, J., Hellio, C., Sullivan, T., Brown, R., Russell, S., Kitteringham, E., Le Nor, L., Regan, F., 2014. Bioinspired synthetic macroalgae: examples from nature for antifouling applications. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 86, 6–13.
- Chen, L., Duan, Y., Cui, M., Huang, R., Su, R., Qi, W., He, Z., 2021. "Biomimetic surface coatings for marine antifouling: Natural antifoulants, synthetic polymers and surface microtopography." *Science of The Total Environment* 766: 144469.

- Claus, R., López, M., 2022. Key issues in the design of floating photovoltaic structures for the marine environment. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112502>
- Clemente, G., S. Ramos-Marin, S., Guedes Soares, C., 2024. Overview of the floating offshore photovoltaic energy potential. DOI: 10.1201/9781003508779-45
- Coolen, J. W., Boon, A. R., Crooijmans, R., Van Pelt, H., Kleissen, F., Gerla, D., et al., 2020. Marine stepping-stones: connectivity of *Mytilus edulis* populations between offshore energy installations. *Mol. Ecol.* 29, 686–703. doi: 10.1111/mec. 15364
- Darya, M., Abdolrasouli, M.H., Yousefzadi, M., Sajjadi, M.M., Sourinejad, I., Zarei, M., 2022. Antifouling coating based on biopolymers (PCL/PLA) and bioactive extract from the sea cucumber *Stichopus herrmanni*. *AMB Express*, 12, 24.
- Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., Vanaverbeke, J., 2020. Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning. *Oceanography*, 33(4), 48-57.
- De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A., Rumes, B., Degraer, S., 2015. Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia* 756(1): 37-50.
- Det Norske Veritas, 2010. Recommended Practice DNV–RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads. 124 pp.
- Det Norske Veritas, 2013. Design of Offshore Wind Turbine Structures DNV-OS-J101. 214 pp.
- Djalab, A., Djalab, Z., El Hammoumi, A., Tina, G. M., Motahhir, S., Laouid, A. A., 2024. A comprehensive review of floating photovoltaic systems: Tech advances, marine environmental influences on offshore PV systems, and economic feasibility analysis. *Solar Energy*, 277, 112711.
- DNV, 2013. Position Mooring DNV-OS-E301. Marine Growth. 113 pp.
- DNV, 2015. Standard DNVGL-ST-0164– Edition October 2015 (<https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0164-tidal-turbines.html>).

- DNV GL, 2021. DNV-RP-0584: Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems, 152 pp.
- Dobretsov, S., Coutinho, R., Rittschof, D., Salta, M., Ragazzola, F., Hellio, C., 2019. The oceans are changing: impact of ocean warming and acidification on biofouling communities. *Biofouling*, 35(5), 585-595.
- Dong, Y., Song, G. L., Zhang, J., Gao, Y., Wang, Z. M., Zheng, D., 2022. Biocorrosion induced by red-tide alga-bacterium symbiosis and the biofouling induced by dissolved iron for carbon steel in marine environment. *Journal of Materials Science & Technology*, 128, 107-117.
- Dziubińska, A., Janas, U., 2007. "Submerged objects - A nice place to live and develop. Succession of fouling communities in the Gulf of Gdańsk, Southern Baltic. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 36(4): 65-78.
- Feng, T., Wu, J., Chai, K., Yang, P., 2018. The anti-biofouling behavior of high voltage pulse electric field (HPEF) mediated by carbon fiber composite coating in seawater. *Bioelectrochemistry*, 123, 137-144.
- First, M.R., Riley, S.C., Islam, K.A., Hill, V., Li, J., Zimmerman, R.C., Drake, L.A., 2021. Rapid quantification of biofouling with an inexpensive, underwater camera and image analysis. *Manage. Biol. Invasions* 12 (3), 599–617.
- Floerl, O., Peacock, L., Seaward, K., Inglis, G., 2010. Review of Biosecurity and Contaminant Risks Associated With In-water Cleaning. Australian Department of Agriculture, Fisheries and Forestry.
- Fortič, A., Mavrič, B., Pitacco, V., Lipej, L., 2021. Temporal changes of a fouling community: Colonization patterns of the benthic epifauna in the shallow northern Adriatic Sea. *Regional Studies in Marine Science* 45: 101818.
- Giangrande, A., Arduini, D., Borghese, J., Del Pasqua, M., Lezzi, M., Petrocelli, A., Pierri, C., 2021. Macrobenthic success of non-indigenous species related to substrate features in the Mar Grande of Taranto, Italy (Mediterranean Sea). *BioInvasions Record*, 10(2).

- Ghattavi, S., Homaei, A., Fernandes, P., 2024. Marine natural products for biofouling elimination in marine environments. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103385.
- GESAMP (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/ISA/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection), 2024. *Marine Biofouling: Non-Indigenous Species and Management Across Sectors*. Rep. Stud. GESAMP No. 114, 147 p.
- Ghigo, A., Faraggiana, E., Sirigu, M., Mattiazzo, G., Bracco, G., 2022. Design and analysis of a floating photovoltaic system for offshore installation: The case study of Lampedusa. *Energies*, 15(23), 8804.
- Gong, C., Frangopol, D.M., Cheng, M., 2019. Risk-based life-cycle optimal dry-docking inspection of corroding ship hull tankers. *Eng. Struct.* 195, 559–567.
- Gormley, K., McLellan, F., McCabe, C., Hinton, C., Ferris, J., Kline, D.I., Scott, B.E., 2018. Automated image analysis of offshore infrastructure marine biofouling. *J. Mar. Sci. Eng.* 6 (1), 2.
- Habbouche, H., Rashid, H., Amirat, Y., Banerjee, A., Benbouzid, M., 2024. A 2D VMD video image processing-based transfer learning approach for the detection and estimation of biofouling in tidal stream turbines. *Ocean Engineering*, 312, 119283.
- Hachicha, S., Zaoui, C., Dallagi, H., Nejim, S., Maalej, A., 2019. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning. *Ocean Engineering*, 181, 303-313.
- Hatakeyama, Y., Fujibayashi, M., Maruo, C., Nishimura, O., Sakamaki, T., 2024. Dual benefits of biofouling reduction in non-fed aquaculture: On-site heat treatment enhances oyster production and mitigates local environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 472, 143502.
- Hickling, S., Matthews, J., Murphy, J., 2022. The suitability of alkali activated slag as a substrate for sessile epibenthos in Reef Cubes®. *Ecological Engineering*, 174, 106471.

- Hong, H., Lv, J., Deng, A., Tang, Y., Liu, Z., 2024. A review of experimental Assessment Processes of material resistance to marine and freshwater biofouling. *Journal of Environmental Management*, 357, 120766.
- Hopkins, G., Davidson, I., Georgiades, E., Floerl, O., Morrissey, D., Cahill, P., 2021. Managing Biofouling on Submerged Static Artificial Structures in the Marine Environment – Assessment of Current and Emerging Approaches. *Frontiers in Marine Science* 8: 759194.
- Hopkins, G. A., Scott, N., Cahill, P., 2023. Application of bubble streams to control biofouling on marine infrastructure—pontoon-scale implementation. *PeerJ*, 11, e16004.
- Hooper, T., Armstrong, A., Vlaswinkel, B., 2021. Environmental impacts and benefits of marine floating solar. *Solar Energy*, 219, 11-14.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., Elharfi, A., 2021. Polymer composite materials A comprehensive review. *Compos. Struct.* 262, 113640 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>
- IMO, 2023. *Guidelines for the Control and Management of Ships' Biofouling to Minimize the Transfer of Invasive Aquatic Species*. MEPC.378(80).
- Iswadi, A., Porter, J. S., Bell, M. C., Garniati, L., Harris, R. E., Priyotomo, G., 2022. Establishing an agenda for biofouling research for the development of the marine renewable energy industry in Indonesia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 384.
- Jin, H., Tian, L., Bing, W., Zhao, J., Ren, L., 2021. Toward the application of graphene for combating marine biofouling. *Advanced Sustainable Systems*, 5(1), 2000076.
- Kerckhof, F., Rumes, B., Jacques, T., Degraer, S., Norro, A., 2010. Early development of the subtidal marine biofouling on a concrete offshore windmill foundation on the Thornton Bank (southern North Sea): First monitoring results. *International Journal of the Society for Underwater Technology* 29(3), 137-149.
- Knobloch, S., Philip, J., Ferrari, S., Benhaïm, D., Bertrand, M., Poirier, I., 2021. The effect of ultrasonic antifouling control on the growth and microbiota of farmed European sea

- bass (*Dicentrarchus labrax*). *Marine Pollution Bulletin*, 164, 112072.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112072>
- Kim, D. H., Alayande, A. B., Lee, J. M., Jang, J. H., Jo, S. M., Jae, M. R., Chae, K. J., 2024. Emerging marine environmental pollution and ecosystem disturbance in ship hull cleaning for biofouling removal. *Science of The Total Environment*, 906, 167459.
- Kocak, F., Ergen, Z., Çinar, M.E., 1999. Fouling organisms and their developments in a polluted and an unpolluted marina in the Aegean Sea (Turkey). *Ophelia* 50(1), 1-20.
- Kochina, T.A., Kondratenko, Y.A., Shilova, O.A., Vlasov, D.Y., 2022. Biocorrosion, biofouling, and advanced methods of controlling them. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* 58(1), 129–150.
- Kumar, S., Ye, F., Mazinani, B., Dobretsov, S., Dutta, J., 2021. Chitosan nanocomposite coatings containing chemically resistant ZnO–SnOx core–shell nanoparticles for photocatalytic antifouling. *Int. J. Mol. Sci.* 22 (9), 4513. <https://doi.org/10.3390/ijms22094513>
- Labriere, C., Elumalai, V., Staffansson, J., Cervin, G., Norcy, T.L., Denardou, H., Réhel, K., Moodie, L.W.K., Hellio, C., Pavia, H. et al., 2020. Phidianidine A and synthetic analogues as naturally inspired marine antifoulants. *Journal of Natural Products*, 83(11), 3413-3423.
- Lagerström, M., Wrange, A. L., Oliveira, D. R., Granhag, L., Larsson, A. I., Ytreberg, E., 2022. Are silicone foul-release coatings a viable and environmentally sustainable alternative to biocidal antifouling coatings in the Baltic Sea region?. *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114102.
- Langhamer, O., Wilhelmsson, D., Engström, J., 2009. Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys - a pilot study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 82(3), 426-432.
- Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirlitz, H., Aznar, A., Spencer, R., Cox, S., 2020. Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *Renewable Energy*, 162, 1415-1427.

- Lever, A., Foulon, V., Fauchon, M., Tapissier-Bontemps, N., Banaigs, B., Hellio, C., 2021. Antifouling activity of meroterpenes isolated from the ascidian *Aplidium aff. densum*. *Marine Biotechnology*, 23, 51-61.
- Li, Y., Ning, C., 2019. Latest research progress of marine microbiological corrosion and biofouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. *Bioactive Materials* 4, 189-195.
- Lin, X., Xie, Q., Ma, C., Zhang, G., 2021. Self-healing, highly elastic and amphiphilic silicone-based polyurethane for antifouling coatings. *J. Mater. Chem. B* 9 (5), 1384–1394. <https://doi.org/10.1039/D0TB02465A>
- Lin, S., Bi, H., Weinell, C. E., & Dam-Johansen, K., 2022. Submerged surfaces exposed to marine biofouling—Experimental investigation of cleaning parameters effectiveness. *Progress in Organic Coatings*, 172, 107097.
- Lindeyer, F. Gittenberger, A., 2011. Ascidiaceans in the succession of marine fouling communities. *Aquatic Invasions* 6(4), 421-434.
- Liu, D., Shu, H., Zhou, J., Bai, X., Cao, P., 2023. Research progress on new environmentally friendly antifouling coatings in marine settings: a review. *Biomimetics*, 8(2), 200.
- López-Fuerte, F.O., A Siqueiros-Beltrones, D., Veleza, L., Huerta-Quintanilla, D.A., 2017. Species composition and assemblage structure of microfouling diatoms growing on fiberglass plates off the coast of Yucatán, Mexico. *HIDROBIOLOGICA* 27, 23–37.
- Lou, Y., Dai, C., Chang, W., Qian, H., Huang, L., Du, C., Zhang, D., 2020. Microbiologically influenced corrosion of FeCoCrNiMo0. 1 high-entropy alloys by marine *Pseudomonas aeruginosa*. *Corrosion Science*, 165, 108390.
- .
- Loxton, J., Macleod, A., Nall, C., McCollin, T., Machado, I., Simas, T., Vance, T., Kenny, C., Want, A., Miller, R., 2017. Setting an agenda for biofouling research for the marine renewable energy industry. *International Journal of Marine Energy* 19, 292-303.

- Macleod, A.K., Stanley, M.S., Day, J.G., Cook, E.J., 2016. Biofouling community composition across a range of environmental conditions and geographical locations suitable for floating marine renewable energy generation. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research* 32(3), 261-276.
- Maduka, M., Schoefs, F., Thiagarajan, K., Bates, A., 2023. Hydrodynamic effects of biofouling-induced surface roughness—Review and research gaps for shallow water offshore wind energy structures. *Ocean Engineering*, 272, 113798.
- Mannino, G., Tina, G. M., Cacciato, M., Merlo, L., Cucuzza, A. V., Bizzarri, F., Canino, A., 2023. Photovoltaic module degradation forecast models for onshore and offshore floating systems. *Energies*, 16(5), 2117.
- Martell, L., Bracale, R., Carrion, S.A., Purcell, J.E., Lezzi, M., Gravili, C., Piraino, S., Boero, F., 2018. Successional dynamics of marine fouling hydroids (Cnidaria: Hydrozoa) at a finfish aquaculture facility in the Mediterranean Sea. *PLoS ONE* 13(5): e0196883.
- Marty, A., Berhault, C., Damblans, G., Facq, J. V., Gaurier, B., Germain, G., et al., 2021. Experimental study of hard marine growth effect on the hydrodynamical behaviour of a submarine cable. *Applied Ocean Research*, 114, 102810. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102810w>
- Mavraki, N., Bos, O. G., Vlaswinkel, B. M., Roos, P., de Groot, W., van der Weide, B. et al., 2023. Fouling community composition on a pilot floating solar-energy installation in the coastal Dutch North Sea. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1223766.
- 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
- Mérigaud, A., Ringwood, J.V., 2016. Condition-based maintenance methods for marine renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66, 53–78
- Mengist, W., Soromessa, T. Legese, G., 2020. Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7, 100777, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.100777>.

- Miller, R., Loxton, J., 2016. Role of Biofouling in Marine Renewable Energy Development. Annex IV Environmental Research Webinar Series, 66 pp.
- Miller, R.G., Macleod, A.K., 2016. Marine Growth Mapping and Monitoring: Feasibility of Predictive Mapping of Marine Growth. A report by SAMS Research Services Ltd to the Offshore Renewable Energy Catapult. Glasgow, UK. 51 pp.
- Morrissey, D.J., Woods, C., 2015. In-water Cleaning Technologies: Review of Information. Ministry for Primary Industries, New Zealand Government
- Nall, C.R., Schläppy, M-L., Gerin, A.J., 2017. Characterisation of the biofouling community on a floating wave energy device. *Biofouling* 33(5), 379-396.
- Nall, C. R., Schläppy, M. L., Cottier-Cook, E. J., Guerin, A. J., 2022. Influence of coating type, colour, and deployment timing on biofouling by native and non-native species in a marine renewable energy context. *Biofouling*, 38(7), 729-745. <https://doi.org/10.1080/08927014.2022.2121209>.
- Oliveira-Pinto, S., Stokkermans, J., 2020. Marine floating solar plants: an overview of potential, challenges and feasibility. In *Proceedings of the institution of civil engineers-maritime engineering* (Vol. 173, No. 4, pp. 120-135). Thomas Telford Ltd.
- Paz-Villarraga, C. A., Castro, Í. B., Fillmann, G., 2022. Biocides in antifouling paint formulations currently registered for use. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Pedersen, M.L., Weinell, C.E., Ulusoy, B., Dam-Johansen, K., 2022. Marine biofouling resistance rating using image analysis. *J. Coat. Technol. Res.* 19 (4), 1127–1138.
- Pham, H. D., Schoefs, F., Cartraud, P., Soulard, T., Pham, H. H., Berhault, C., 2019. Methodology for modeling and service life monitoring of mooring lines of floating wind turbines. *Ocean Engineering*, 193, 106603.
- Picken, G. B., 1986. Marine fouling and structural loading. *Underwater Technology* 12(2), 18-26.

- Pereira, F., Almeida, J.R., Paulino, M., Grilo, I.R., Macedo, H., Cunha, I., Sobral, R.G., Vasconcelos, V., Gaudêncio, S.P., 2020. Antifouling napyradiomycins from marine-derived actinomycetes *Streptomyces aculeolatus*. *Mar. Drugs*, 18, 63.
- Price, S. J., Figueira, R. B., 2017. Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives. *Coatings* 7:25. doi: 10.3390/coatings7020025
- Qiu, Q., Gu, Y., Ren, Y., Ding, H., Hu, C., Wu, D., et al., 2024. Research progress on eco-friendly natural antifouling agents and their antifouling mechanisms. *Chemical Engineering Journal*, 153638.
- Quillienn, N., Lejart, M., Damblans, G., 2018. *Bibliographical Atlas of Biofouling Along the French Coasts in the Context of Offshore Renewable Energy*. France Energies Marines Editions, 70 pp.
- Ramanan, C.J, R., Lim, K. H., Kumia, J. C., Roy, S., Bora, B. J., Medhi, B. J., 2024. Towards sustainable power generation: Recent advancements in floating photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 194, 114322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114322>
- Rashid, H., Benbouzid, M., Titah-Benbouzid, H., Amirat, Y., Mamoune, A., 2023. Tidal stream turbine biofouling detection and estimation: A review-based roadmap. *J. Mar. Sci. Eng.* 11 (5), 908.
- Relini, G., Tixi, F., Relini, M., Torchia, G., 1998. The macrofouling on offshore platforms at Ravenna. *International Biodeterioration and Biodegradation* 41(1), 41-55.
- Rémouit, F., Chatzigiannakou, M-A., Bender, A., Temiz, I., Sundberg, J., Engström, J., 2018. Deployment and Maintenance of Wave Energy Converters at the Lysekil Research Site: A Comparative Study on the Use of Divers and Remotely-Operated Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering* 6:39.
- Röckmann, C., Lagerveld, S., & Stavenuiter, J., 2017. Operation and Maintenance Costs of Offshore Wind Farms and Potential Multi-use Platforms in the Dutch North Sea. In (pp. 97-113). https://doi.org/10.1007/978-3-319-51159-7_4

- Ronowicz, M., Kukliński, P., Lock, K., Newman, P.B., Burton, M., Jones, J., 2014. Temporal and spatial variability of zoobenthos recruitment in a north-east Atlantic marine reserve. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 94(7), 1367-1376.
- Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., Carlone, P., 2020. Marine application of fiber reinforced composites: a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26.
- Sanz, D., García, S., Trueba-Castañeda, L., Boullosa-Falces, D., 2024. Trueba, A., : Antifouling and Anticorrosive Protection of Renewable Energy Marine Structures with TiO₂-Based Enamel. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 18, No. 2, doi:10.12716/1001.18.02.21, pp. 419-424,
- Schoefs, F., Bakhtiari, A., Ameryoun, H., 2022. Evaluation of hydrodynamic force coefficients in presence of biofouling on marine/offshore structures, a review and new approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 558.
- Schoefs, F., Tran, T. B., 2022. Reliability updating of offshore structures subjected to marine growth. *Energies*, 15(2), 414.
- Schumacher, J.F., Aldred, N., Callow, M.E., Finlay, J.A., Callow, J.A., Clare, A.S., Brennan, A.B., 2007. Species-specific engineered antifouling topographies: correlations between the settlement of algal zoospores and barnacle cyprids. *Biofouling* 23, 307–317. <https://doi.org/10.1080/08927010701393276>.
- Sen, A., Mohankar, A.S., Khamaj, A., Karmakar, S., 2021. Emerging OSH Issues in Installation and Maintenance of Floating Solar Photovoltaic Projects and Their Link with Sustainable Development Goals. *Risk Manag Health Policy*. May 13;14:1939-1957. doi: 10.2147/RMHP.S304732. PMID: 34012306; PMCID: PMC8128445.
- Shi, W., Yan, C., Ren, Z., Yuan, Z., Liu, Y., Zheng, S., Li, X., Han, X., 2023. Review on the development of marine floating photovoltaic systems. *Ocean Engineering*, 286, 115560. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115560>.
- Signor, J., Schoefs, F., Quillien, N., Damblans, G., 2023. Automatic classification of biofouling images from offshore renewable energy structures using deep learning. *Ocean Engineering*, 288, 115928.

- Smirnova, L.L., Koshkarov, A.A., Sizova, O.S., 2021. Formation of fouling communities on anthropogenic surfaces in the coastal waters of the Black Sea. *Inland Water Biology* 14(5), 536-545.
- Solar Power Europe, 2023. *Floating PV Best Practice Guidelines Version 1.0*.
- Song, C., Cui, W., 2020. Review of underwater ship hull cleaning technologies. *Journal of Marine Science and Application* 19, 415–429.
- Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, N., Ferdaña, Z.A., Finlayson, M., Halpern, B.S., Jorge, M.A., Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C.A., Robertson, J., 2007. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. *BioScience* 57(7), 573-583.
- Sugden, H., Panusch, R., Lenz, M., Wahl, M., Thomason, J.C., 2007. Temporal variability of disturbances: Is this important for diversity and structure of marine fouling assemblages? *Marine Ecology* 28(3), 368-376.
- Sylvester, F., Chan, F., Bailey, S., 2022. Biofouling data from underwater surveys of commercial ships in Canada, Dryad, Dataset, <https://doi.org/10.5061/dryad.hdr7sqvkb>.
- Swain, G., 2017. A guide to developing a biofouling management plan. *Marine Technology Society Journal* 51(2), 105–110.
- Telegdi, J., Shaban, A., Trif, L., 2020. Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 9, 1–33.
- Tian, L., Yin, Y., Jin, H., Bing, W., Jin, E., Zhao, J., Ren, L., 2020. Novel marine antifouling coatings inspired by corals. *Mater. Today Chem.* 17, 100294.
- Tiron, R., Pinck, C., Reynaud, E. G., Dias, F., 2012. Is biofouling a critical issue for wave energy converters?. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE.
- Tiron, R., Gallagher, S., Doherty, K., Reynaud, E.G., Dias, F., Mallon, F., Whittaker, T., 2013. An experimental study of the hydrodynamic effects of marine growth on wave

- energy converters. In: Proceedings of the 32nd international conference on offshore mechanics and arctic engineering, OMAE. Nantes, France.
- Tiron, R., Mallon, F., Días, F., Reynaud, E.G., 2015. The challenging life of wave energy devices at sea: a few points to consider. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43, 1263–1272.
- Titah-Benbouzid, H., Benbouzid, M., 2017. Biofouling issue on marine renewable energy converters: a state of the art review on impacts and prevention. *International Journal on Energy Conversion (I.R.E.CON.)* 5:3.
- Vance, T., Ellis, R., Fileman, T., 2014. ETI MA1001 - Reliable Data Acquisition Platform for Tidal (ReDAPT) project: ME8.5 'Final Report'. Energy Technologies Institute, 47 pp.
- Van der Stap, T., Coolen, J.W.P., Lindeboom, H.J., 2016. Marine fouling assemblages on offshore gas platforms in the southern North Sea: Effects of depth and distance from shore on biodiversity. *PLoS ONE* 11(1): e0146324.
- Varello, R., Wetzel, M.A., Cima, F., 2021. Two facets of geotextiles in coastal ecosystems: Anti- or profouling effects? *Marine Environmental Research* 170: 105414.
- Vinagre, P.A., Simas, T., Cruz, E., Pinori, E., Svenson, J., 2020. Marine biofouling: A European database for the marine renewable energy sector." *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 495.
- Vinagre, P.A., Fonseca, G., Vieira, M., 2024. Experimental insights on biofouling growth in marine renewable structures. *Open Res Europe*, 2:108 (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.14854.2>).
- Vlaswinkel, B., Roos, P., Nelissen, M., 2023. Environmental observations at the first offshore solar farm in the North Sea. *Sustainability*, 15(8), 653.
- Want, A., Crawford, R., Kakkonen, J., Kiddie, G., Miller, S., Harris, R.E., Porter, J.S., 2017. Biodiversity characterisation and hydrodynamic consequences of marine fouling communities on marine renewable energy infrastructure in the Orkney Islands Archipelago, Scotland, UK. *Biofouling* 33(7), 567-579.

- Want, A., Bell, M.C., Harris, R.E., Hull, M.Q., Long, C.R., Porter, J.S., 2021. Sea-trial verification of a novel system for monitoring biofouling and testing anti-fouling coatings in highly energetic environments targeted by the marine renewable energy industry. *Biofouling* 37(4), 433-451.
- Want, A., Goubard, A., Jonveaux, S., Leaver, D., Bell, M. C., 2023. Key Biofouling Organisms in Tidal Habitats Targeted by the Offshore Renewable Energy Sector in the North Atlantic Include the Massive Barnacle *Chirona hameri*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2168.
- Whomersley, P., Picken, G.B., 2003. Long-term dynamics of fouling communities found on offshore installations in the North Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 83(5), 897-901.
- Wim, S., Kingma, A., Hoogeland, M., vd Brink, R., Kroon, J., Folkerts, W., 2022. Challenges and potential for offshore solar [online]. Available from: <https://zonopwater.nl/u/files/Challenges%20and%20potential%20for%20offshore%20solar%202022.pdf>.
- Witt, D., Ma, K. T., Lee, T., Gaylarde, C., Celikkol, S., Makama, Z., Beech, I., 2016. Field studies of microbiologically influenced corrosion of mooring chains. In *Offshore Technology Conference* (p. D031S037R004). OTC.
- World Bank Group, ESMAP and SERIS, 2019. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners*. Washington, DC: World Bank
- Wu, S., Jiang, N., Zhang, S., Zhang, P., Zhao, P., Liu, Y., Wang, Y., 2024. Discussion on the development of offshore floating photovoltaic plants, emphasizing marine environmental protection. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1336783.
- Yadav, N., & Gupta, M. 2016. Energy assessment of floating photovoltaic system. <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915941>
- Yang, S., Rinsberg, J., Johnson, E., Hu, Z., 2017. Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems - Analysis of fatigue life and energy performance. *Applied Ocean Research* 65, 166-177.

- Yang, H., Zhang, W., Chen, T., Huang, S., Quan, B., Wang, M., et al., 2019. Direct Experimental Evidence of Biomimetic Surfaces with Chemical Modifications Interfering with Adhesive Protein Adsorption. *Molecules* 24(1): 27. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules24010027>
- Zhao, L.M., Chen, R.R., Lou, L.J., Jing, X.Y., Liu, Q., Liu, J.Y., Yu, J., Liu, P.L., Wang, J., 2020. Layer-by-layer-assembled antifouling films with surface microtopography inspired by *Laminaria japonica*. *Appl. Surf. Sci.* 511, 145564. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145564>.
- Zimbelmann, S., Emde, B., von Waldegge, T.H., Stübing, D., Baumann, M., Hermsdorf, J., 2022. Interaction between laser radiation and biofouling for ship hull cleaning. *Proc. CIRP* 111, 705–710.
- Zupan, M., Rumes, B., Vanaverbeke, J., Degraer, S., Kerckhof, F., 2023. Long-Term Succession on Offshore Wind Farms and the Role of Species Interactions. *Diversity*, 15(2), 288.

10. ANEXO



General Information

1. Type of structure: photovoltaic panel, pontoon, mounting system, mooring line, cable, inverter, anchor, mooring, other. If other, please specify.
2. Country, sea, ocean.
3. Distance to coast.
4. Type of deterioration (rank in order of importance): salt, rust, anchor breakage, paint chipping, structural wear, biological fouling (biofouling), bird dirt, general dirt-dust, other. If other, please specify.
5. Frequency of visit, cleaning, or maintenance: daily, weekly, biweekly, monthly, annually.
6. Time of year: spring (April-May-June), summer (July-August-September), autumn (October-November-December), winter (January-February-March) or other. If other, please specify.
7. Cleaning records: yes or no.
8. Estimate of biofouling removed: yes or no. If yes, please specify.
9. Cleaning method used: onsite pressure washing, scraping, underwater removal, others; on land: boarding, towing to shore, dock or sheltered area. If others, please specify.
10. Diving requirement? or autonomous equipment? robotic solutions established?
11. Type of biological fouling: Algae (calcareous, green, red, brown) or similar (bryozoan, coralligenous), bivalve (oyster, mussel or other), worm (calcareous tube), ascidian (gelatinous tube, anemone) or other. If others, please specify.
12. Management of fouling residues: yes or no.
13. Type of management: Sink it, bring it to shore, dump it, throw it in the trash, selective recycling, deliver it to a manager.
14. Economic cost of maintenance? Yes or no; If yes, please specify.
15. Do you know of any document related to the assessment/management of biofouling on your structures and, if so, could you identify it, please?

Figure A1. Cuestionario adaptado del proyecto NEOMAT para los desarrolladores de fotovoltaica flotante en el medio marino.