



**MAREAS ROJAS: CARACTERIZACIÓN,
RIESGOS Y MÉTODOS PARA SU
DETECCIÓN TEMPRANA Y
MINIMIZACIÓN DE IMPACTOS EN LA
OPERACIÓN DE PLANTAS DESALADORAS**

**RED TIDE: CHARACTERIZATION, RISKS
AND METHODS FOR ITS EARLY
DETECTION AND REDUCTION OF ITS
IMPACT IN THE OPERATION OF
DESALINATION PLANTS**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D^a. LAURA GALÁN VILLEGAS

Dirigido por:

D. RAFAEL BUENDÍA CANDEL

Alcalá de Henares, a 8 de JUNIO de 2020

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado a mis abuelas, que ya no están conmigo, pero las llevo siempre en mi corazón y deseo que puedan ver los logros que consigo.

A Rafa Buendía por proponerme este tema que me ha resultado súper interesante de estudiar.

A Joseli, por aguantar mis nervios y mis cabreos cuando me bloqueaba con cualquier tema del máster; por apoyarme incondicionalmente; y por hacerme feliz.

A mis padres y a Jorge, por apoyarme siempre.

A mis abuelos, porque juntos hacen mi club de fans.

Al resto de mi familia, por su cariño.

A mis amigos, especialmente a Diego, Alba y Sara, que han aguantado todas mis quejas y nervios; y que me han ayudado con sus consejos.

A mis compañeros del máster, por hacer que las tardes entre diario hayan sido lo más amenas posibles, hasta que el COVID-19 nos impidió seguir viéndonos.

A todos los profesores que han pasado por el máster, que nos han aportado mucho conocimiento en poco tiempo.

A mis compañeros de Sacyr Agua, por apoyarme y entender el cansancio que he tenido el último año.

¡A todos vosotros, GRACIAS!

ÍNDICE

Índice de figuras.....	4
Tabla de abreviaturas.....	6
Resumen.....	8
1. Introducción, justificación y objetivos	10
2. Metodología.....	11
3. Desarrollo del trabajo	12
3.1. Identificación y caracterización de las mareas rojas	12
3.1.1. Caracterización de mareas rojas según Jeong <i>et al.</i> (2005)	13
3.1.2. Caracterización de mareas rojas según Lassus <i>et al.</i> (2016)	15
3.2. Factores físicos que influyen en el crecimiento de las mareas rojas...	15
3.2.1. Concienciación y conocimiento	15
3.2.2. Eventos naturales	16
3.2.3. Condiciones climáticas inusuales	17
3.2.4. Eutrofización	18
3.2.5. Pesca indiscriminada	19
3.2.6. Acuicultura	19
3.2.7. Aguas de lastre	20
3.2.8. Comercio de marisco vivo.....	20
3.2.9. Cambio climático	20
3.3. Impactos de las mareas rojas en plantas desaladoras	21
3.3.1. Aumento de los sólidos en suspensión.....	22
3.3.2. Toxicidad del agua producto.....	23
3.4. Detección temprana de mareas rojas	23
3.4.1. Métodos convencionales.....	24
3.4.1.1. Detección visual directa con microscopio.....	24
3.4.1.2. Medición de factores físicos.....	26
3.4.2. Sistemas de monitorización mediante teledetección	28
3.4.3. Métodos avanzados de detección de AOM.....	28
3.4.3.1. Medición de TEPs.....	28
3.4.3.2. Tinción con lectinas y conteo microscopía confocal.....	28
3.4.3.3. Cromatografía líquida – detección de carbono orgánico..	29
3.4.3.4. Fluorescencia con matrices de excitación- emisión.....	29

3.4.3.5. Medición de fuerzas mediante microscopía de fuerzas atómicas.....	29
3.4.4. Índices de incrustación.....	30
3.4.4.1. Índice de Densidad de Sedimentos (SDI).....	30
3.4.4.2. Índice de incrustación modificado (MFI) – 0,45.....	30
3.4.4.3. Índice de incrustación modificado (MFI) – UF.....	31
3.4.5. Otras técnicas de detección.....	31
3.4.5.1. Medición de clorofila.....	31
3.4.5.2. Citometría de flujo.....	32
3.4.5.3. Sistema Ferrybox.....	33
3.4.5.4. Métodos matemáticos.....	33
3.5. Prevención y control de mareas rojas.....	34
3.5.1. Medidas de prevención.....	34
3.5.2. Medidas de mitigación – eliminación.....	35
3.6. Estrategias de operación y mitigación en plantas desaladoras	36
3.6.1. Captación de agua bruta.....	36
3.6.1.1. Captaciones superficiales.....	36
3.6.1.2. Captaciones subsuperficiales.....	38
3.6.1.3. Comparación de tipos de captaciones.....	41
3.6.2. Pretratamiento.....	42
3.6.2.1. Cloración – dechloración.....	43
3.6.2.2. Floculación – coagulación.....	43
3.6.2.3. Sistemas de flotación con aire disuelto (DAF).....	44
3.6.2.4. Filtración con medios granulares.....	45
3.6.2.5. Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF).....	46
3.6.2.6. Filtros de cartucho.....	48
4. Conclusiones.....	49
5. Bibliografía.....	50
6. Anexos.....	54
6.1. Anexo I: Toxinas: enfermedades, productores y zonas afectadas.....	54
6.2. Anexo II: Microalgas formadoras de mareas rojas.....	55
6.3. Anexo III: Configuración de pretratamientos en función de la calidad de agua bruta.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disponibilidad de recursos hídricos dulces distribuidos globalmente. Fuente: Villacorte, 2014.....	10
Figura 2. Marea roja formada por Noctiluca. Foto: H. Gheilani y K.C. Ho.....	10
Figura 3. Esquema del comportamiento de los grupos GM1 y GM2. Fuente: Jeong et al. (2005).....	14
Figura 4. Esquema del comportamiento de los grupos GM3 y GM4. Fuente: Jeong et al. (2005).....	15
Figura 5. Marea roja formando un frente paralelo a la orilla y una hilera creada por el viento. Foto: M. Godfrey. Fuente: Anderson et al., 2017.....	17
Figura 6. Incremento de mareas rojas (línea de puntos) en el Mar de Seto por eutrofización. Fuente: Lassus et al. (2016).....	18
Figura 7. Incremento de mareas rojas por la desestabilización de la cadena trófica con motivo de la pesca indiscriminada. Fuente: Lassus et al., 2016 (traducción propia).....	19
Figura 8. De izquierda a derecha: membrana virgen, membrana sucia, membrana tras limpieza con NaOCl y membrana tras limpieza con ascorbato. Fuente: Wang et al., 2014.....	22
Figura 9. Métodos de muestreo: izquierda, red de plancton con colector; centro, roseta con 24 botellas oceanográficas; derecha, manguera muestreadora.....	25
Figura 10. Ejemplos de boyas con sistemas de recogida de muestra y detección de organismos fitoplanctónicos. Fuente: Anderson et al., 2017.....	25
Figura 11. Evolución de la clorofila en el golfo de Arabia y el Golfo de Omán, a partir de los satélites Terra/Modis y Aqua/Modis el 24 de mayo de 2020. Fuente: visor Worldview, NASA.....	27
Figura 12. Circulación de fitoplancton en el Mar de Alborán, tomado por el sensor Aqua/MODIS el 17 de enero de 2018. Fuente: Gene C. Feldman, visor OBPB, NASA.....	28
Figura 13. Prototipo LSC donde un láser con longitud de onda 635 nm incide sobre la membrana para provocar la autofluorescencia del cultivo que se medirá con el detector PMT (fotomultiplicador).....	32
Figura 14. Ejemplo del sistema Ferrybox alemán. Fuente: Ferrybox, https://www.ferrybox.com	33

Figura 15. Dispersión de solución acuosa de arcilla en Korea. Fuente: Anderson et al., 2017.....	36
Figura 16. Tipos de sistemas de captación. Fuente: Anderson et al. (2017) (traducción propia).....	37
Figura 17. Algas y otros tipos de materia marina bloqueando la pantalla del sistema de captación (izquierda) y la misma pantalla después de realizar una limpieza (derecha) en una planta desaladora del Océano Índico. Fotos: Domingo Zarzo Martínez, Sacyr Agua S.L.....	38
Figura 18. Pozo convencional vertical (izquierda) y pozo Ranney (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.....	39
Figura 19. Pozo inclinado (izquierda) y pozo horizontal (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.....	39
Figura 20. Galería bajo la playa (izquierda) y bajo el lecho marino (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.....	40
Figura 21. Túnel de agua (izquierda) y foso kárstico (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.....	41
Figura 22. Alternativas de pretratamiento. Fuente: Abdulrahim et al., 2017.....	42
Figura 23. Esquema de un sistema DAF. Fuente: Petry et al., 2006 (traducción propia).....	44
Figura 24. Filtración media granular (GMF) en filtro presurizado. Fuente: Singh, 2015.....	45
Figura 25. Esquema de un sistema UF/MF. Fuente: Abdulrahim et al., 2017.....	46
Figura 26. Rechazo de la AOM con sistemas UF, coagulación y DAF. Fuente: Abdulrahim et al., 2017.....	47
Figura 27. Cartuchos instalados en un filtro horizontal (izquierda); ensuciamiento de un cartucho durante un evento severo de marea roja (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.....	48

TABLA DE ABREVIATURAS

AAO: Oscilación Antártica.

AOM: Materia Orgánica Algal.

ASLO: Asociación para las Ciencias de Limnología y Oceanografía.

ASP: Intoxicación amnésica por moluscos.

AZP: Intoxicación por mariscos con azaspirácidos.

CFP: Intoxicación por ciguatera de peces.

CLSM: Tinción con lectinas y conteo por microscopía confocal.

CTD: Conductividad, Temperatura, Profundidad.

CTP: Envenenamiento por toxinas de cianobacterias.

DAF: Flotación con aire disuelto.

DOC: Carbono Orgánico Disuelto.

DSP: Intoxicación diarreica por moluscos.

ENSO: El Niño – Oscilación del Sur.

FAN: Floraciones de Algas Nocivas.

FEEM: Fluorescencia con Matrices de Excitación – Emisión

GMF: Filtros granulares

ICHA: Conferencia Internacional de Algas Nocivas.

IMO: Organización Marítima Internacional.

LC – OCD: Cromatografía líquida – detección de carbono orgánico

LSC: Citometría de fase sólida

MF: Microfiltración.

MFI: Índice de Incrustación Modificado

NAO: Oscilación del Atlántico Norte.

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio.

NSP: Intoxicación neurológica por moluscos.

OBPG: Grupo de Procesamiento de Biología Marina.

PDO: Oscilación Decadal del Pacífico.

PSP: Intoxicación paralizante por moluscos.

RO: Ósmosis Inversa.

SDI: Índice de Densidad de Sedimentos

SWRO: Planta desaladora de agua de mar por ósmosis inversa

TEP: Partículas de Exopolímeros Transparentes

TFM: Trabajo de Fin de Máster.

TOC: Carbono Orgánico Total.

TSS: Sólidos Totales en Suspensión.

UF: Ultrafiltración.

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

RESUMEN

El aumento en la demanda de agua debido al incremento poblacional y la baja disponibilidad de recursos hídricos dulces, han impulsado el desarrollo de la industria de la desalación. Esta industria se ve afectada negativamente por los eventos de mareas rojas, proliferaciones extremas de fitoplancton que colorean el agua, aumentan la concentración de sólidos disueltos y liberan toxinas.

Las mareas rojas están formadas por diversos tipos de fitoplancton: diatomeas, cianobacterias, dinoflagelados, rapidofitos, clorofitas y haptofitas. Jeong et al. (2005) realizaron una división de las mareas rojas en función de su comportamiento y relaciones biológicas con el resto de los organismos del ecosistema; mientras que Lassus et al. (2016) dividieron las mareas rojas en función de los daños que estas provocan en su entorno.

En los últimos años, los eventos de mareas rojas han aumentado considerablemente tanto por factores naturales (surgencias, corrientes, estratificación de la columna de agua, regeneración de quistes vivos, etc.) como por factores antrópicos (eutrofización, aguas de lastre, comercio de marisco vivo, pesca indiscriminada y, sobre todo, cambio climático).

Son dos los principales impactos que estos eventos provocan en las plantas desaladoras. El primero tiene que ver con el posible envenenamiento del agua producto debido a las toxinas que liberan algunas especies de algas rojas. Estas especies liberan mediante lisis celular las toxinas que quedan retenidas en las membranas de ósmosis inversa, únicamente cuando estas presentan daños en su estructura, es cuando estas toxinas pueden pasar al agua producto.

Por otro lado, el segundo impacto potencial es el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa. Ambos impactos pueden llegar a parar la planta, con las consecuencias de no servir agua potable a la población.

La detección temprana de las mareas rojas se hace indispensable para los operadores de las desaladoras de manera que puedan anticiparse a su llegada

realizando los cambios pertinentes en la operación que minimicen los impactos. Los principales mecanismos para la detección temprana son la observación visual directa, la teledetección y la medición de la materia orgánica algal.

Existen diversas técnicas para evitar, o al menos ralentizar, la aparición de las mareas rojas entre las cuales se encuentran la reducción de los nutrientes que entran al sistema acuático, la modificación de condiciones hidráulicas en la medida de lo posible y la eliminación de la estratificación de la columna de agua.

Una vez la marea roja ha aparecido, existen estrategias que permiten eliminarla como la adición de floculantes que favorezcan la sedimentación de las células, la adición productos químicos que inhiben el crecimiento de algunos organismos o la adición de depredadores y competidores que regulen la cadena trófica.

Cuando las técnicas anteriores no funcionan o no es posible llevarlas a cabo, entonces las estrategias operacionales en plantas desaladoras se tornan importantes para minimizar los impactos. Estas estrategias se dividen en dos: actuaciones en la toma de agua bruta y actuaciones en el pretratamiento.

Respecto a la toma de agua bruta, existen dos tipos: tomas abiertas, que obtienen el recurso de la columna de agua; y tomas subsuperficiales que se sitúan por debajo de la arena litoral o del lecho marino. Las primeras necesitan un pretratamiento extensivo; mientras que las segundas actúan como un primer filtro, mejorando la calidad del agua que llega a planta.

Finalmente, la línea de pretratamiento puede contener diversos sistemas y su configuración dependerá de las características del agua de entrada y de la probabilidad de aparición de eventos de mareas rojas siendo el objetivo principal dotar al agua bruta de la calidad adecuada para que no impacte negativamente sobre las membranas de ósmosis inversa.

Los diferentes tipos de pretratamiento son cloración – dechloración, coagulación – floculación, filtración con aire disuelto, filtros granulares, sistemas de microfiltración y ultrafiltración y, como última etapa, filtración con cartuchos.

1. INTRODUCCIÓN, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La disponibilidad de recursos hídricos de agua dulce es bastante escasa en ciertas partes del mundo (Figura 1). En estos lugares la desalación cobra especial importancia para abastecer las necesidades de las poblaciones, tanto para agua de consumo como para agua de riego (Villacorte, 2014).

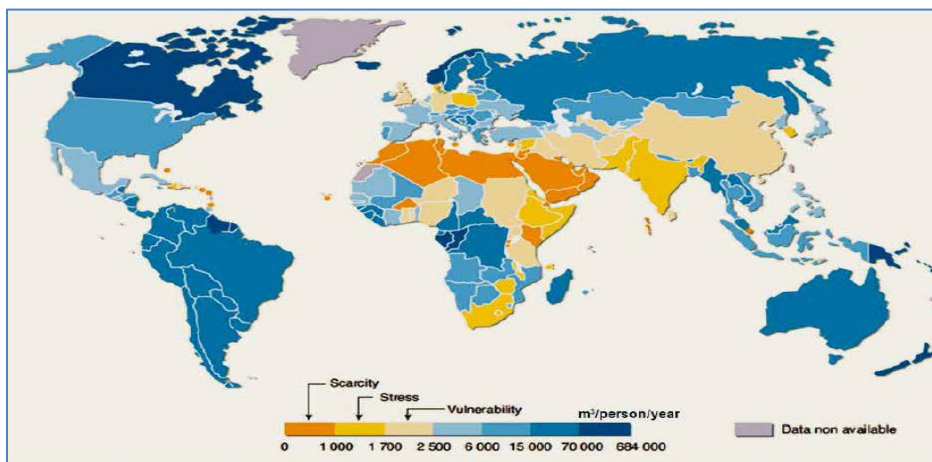


Figura 1. Disponibilidad de recursos hídricos dulces distribuidos globalmente. Fuente: Villacorte, 2014.

Uno de los mayores riesgos a los que se enfrentan las plantas desaladoras son las denominadas mareas rojas; estos eventos hacen referencia al crecimiento desmesurado de fitoplancton que otorgan a las aguas colores rojizos, caobas, marrones o verdes (Sellner *et al.*, 2003). Los organismos que las componen son muy variados, siendo los más numerosos los dinoflagelados en aguas marinas y las cianobacterias en aguas dulces (Hudnell, 2008).



Figura 2. Marea roja formada por *Noctiluca*. Foto: H. Gheilani y K.C. Ho.

La aparición de estos eventos provoca efectos negativos sobre los ecosistemas que rodean al punto de aparición y a diversas actividades antrópicas como zonas de baño o acuicultura. Además, algunas especies de fitoplancton producen toxinas que les aportan resistencia a ser depredadas pero que pueden producir grandes daños al resto de organismos y a la salud humana (Hudnell, 2008; Sellner *et al.*, 2003). En el Anexo I aparece más información sobre los distintos tipos de toxinas.

En los últimos años, el número de apariciones de estos eventos ha aumentado debido a factores naturales y antrópicos (Anderson *et al.*, 2017), si bien una de las causas más probables de este incremento, independientemente del lugar donde aparezcan, es el cambio climático (Dale *et al.*, 2006).

El interés creciente en su estudio se debe, principalmente, a los daños que producen en la naturaleza y en la actividad económica. En las plantas desaladoras, las mareas rojas pueden producir ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa y envenenamiento del agua producto por las toxinas, aunque esto únicamente se produce si las membranas están dañadas (Anderson *et al.*, 2017).

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) tiene como objetivo principal evaluar los impactos que las mareas rojas producen en las desaladoras, así como las estrategias de mitigación y operación en las plantas para reducir esos impactos. Para ello, se llevarán a cabo los siguientes objetivos secundarios: caracterización de las mareas rojas y análisis de los métodos de detección temprana.

2. METODOLOGÍA

El fenómeno de las mareas rojas, o proliferaciones extremas de algas, está ampliamente estudiado. Por lo que, para la obtención de la información en la cual está basado el presente TFM, se han utilizado diversas bases de datos de artículos científicos, libros y documentación de diversos congresos que trataban sobre desalación o sobre mareas rojas. Las bases de datos utilizadas han sido:

- *ACS Publications.*
- *Association for the Sciences of Limnology and Oceanography (ASLO).*
- *BioMedCentral.*
- *Engaged Scholarship – Cleveland State University*

- *El Sevier.*
- *Redalyc.*
- *Research Gate.*
- *Scielo.*
- *Science Direct.*
- *United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO).*

Por otro lado, los congresos que se han consultado son:

- *II Seminario Internacional de Desalación en Antofagasta, 2010.*
- *International Conference on Harmful Algae (ICHA), Brazil, 2016.*
- *International Conference on Harmful Algae (ICHA), France, 2018.*
- *Water Arabia, 2009.*

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1. Identificación y caracterización de las mareas rojas.

Las mareas rojas son eventos muy variados. Existen mareas rojas de pequeña extensión y con corta permanencia (uno – dos meses) que desaparecen gracias a los procesos de transporte naturales; y también existen mareas rojas masivas que cubren varios kilómetros, llegándose a ver desde el espacio, y con permanencias muy altas (meses, incluso años). Además, estos eventos tienen una gran variabilidad espaciotemporal, cambiando drásticamente en poco tiempo y de un punto a otro, incluso en puntos bastante cercanos (Anderson *et al.*, 2017).

Como ya se ha comentado, en la industria de desalación, es imprescindible controlar estos fenómenos para poder anticiparse a ellos y disminuir los daños que produzcan. Para ello, es imprescindible realizar una caracterización de estos. La Comisión Oceanográfica Internacional de la UNESCO identificó, aproximadamente, 300 grupos de fitoplancton que pueden formar mareas rojas, siendo los más habituales los siguientes seis (Villacorte, 2014):

- **Diatomeas:** algas marrones fotosintéticas móviles, pueden desplazarse a lo largo de la columna de agua en busca de nutrientes cuando estos faltan en la superficie.

- Dinoflagelados: estos organismos son los que dan el nombre a las mareas rojas ya que son organismos de color rojizo. Heterótrofos o fotosintéticos, y móviles. La principal característica de estos organismos es que, cuando las condiciones del agua dejan de ser favorables para su crecimiento, forman quistes que sedimentan en el lecho marino hasta que las condiciones vuelven a ser favorables (Anderson y Keafer, 1985).
- Cianobacterias: conocidas como las algas verde – azuladas, son organismos fotosintéticos móviles. Aparecen tanto en ecosistemas marinos como en ecosistemas de agua dulce y pueden formar grandes proliferaciones, llegando a albergar millones de células por mililitro confiriendo al agua un color verdoso. Algunas especies de este grupo pueden generar toxinas.
- Rapidofitos: grupo de algas fotosintéticas, tanto marinas como de agua dulce, que pueden formar mareas rojas tóxicas.
- Clorofitas: algas verdes fototrópicas cuyos tamaños abarcan desde rangos microscópicos hasta rangos macroscópicos. Estos organismos dan lugar a las denominadas “mareas verdes”.
- Haptofitas: microalgas que confieren al agua un color blanquecino debido a la calcita que contienen y que refleja la luz. Suelen formar proliferaciones muy cerca de la costa y provocan grandes mortalidades en la fauna local.

En el Anexo II se recoge una tabla con las especies más comunes de los grupos anteriormente enumerados (Villacorte, 2014), así como las concentraciones que pueden llegar a darse y los efectos negativos que producen en su entorno. A continuación, se presentan dos tipos de caracterizaciones de las mareas rojas.

3.1.1. Caracterización de mareas rojas según Jeong et al. (2005)

Jeong *et al.* (2005) considera imprescindible entender los procesos que producen la formación, crecimiento, persistencia y desaparición de las mareas rojas para anticiparse a estas. Así, ha clasificado los organismos en cuatro grupos en base a la obtención de nutrientes, a su comportamiento y a las relaciones biológicas con otros organismos. Esta clasificación no tiene en cuenta factores físicos.

- GM1: organismos fotótrofos inmóviles cuyo crecimiento se basa en los nutrientes presentes en el agua, así como en la intensidad de la luz que incide en el agua. Tienen una alta mortalidad debido a los depredadores y explica las mareas rojas que se producen en aguas eutrofizadas.
- GM2: organismos fotótrofos móviles. Al ser fotosintéticos, estos organismos necesitan luz y nutrientes para su desarrollo, y la movilidad les permite ascender y descender en la columna de agua para obtener los nutrientes de las capas inferiores, así como evitar a los depredadores que suben por la noche a alimentarse. La movilidad aporta resistencia a las mareas rojas y explica las mareas rojas en aguas oligotróficas alejadas de la costa.
- GM3: organismos mixótrofos móviles. Este grupo añade a los organismos GM2 la mixotrofia, es decir, la capacidad de obtener energía tanto de la fotosíntesis como de otros organismos, es decir, se alimentan de cianobacterias fotosintéticas y de bacterias heterótrofas, las cuales abundan en las aguas oceánicas. Este grupo explica la aparición de mareas rojas en aguas donde la concentración de nutrientes en superficie es pequeña y la nutriclina se encuentra muy profunda. El crecimiento y persistencia de este tipo de mareas rojas depende de la concentración de presas existente.
- GM4: este grupo contiene los organismos GM3 y tiene en cuenta las interacciones biológicas entre organismos que conviven en una misma región. Existen dos tipos de relaciones biológicas: directas e indirectas. Las primeras requieren contacto físico entre las dos especies que interactúan, por ejemplo, la depredación; mientras que las segundas se dan cuando el comportamiento de una especie dificulta la existencia de otra, por ejemplo, la aparición masiva de organismos que consumen los nutrientes disponibles.

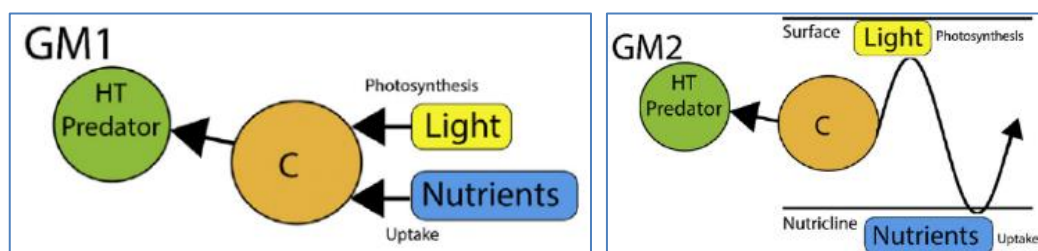


Figura 3. Esquema del comportamiento de los grupos GM1 y GM2. Fuente: Jeong et al. (2005).

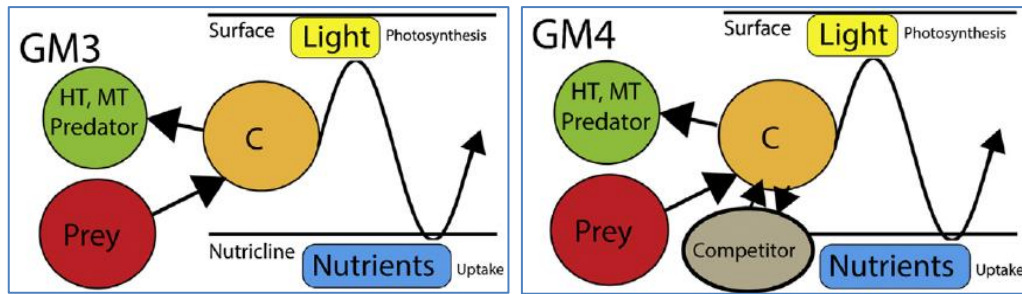


Figura 4. Esquema del comportamiento de los grupos GM3 y GM4. Fuente: Jeong et al. (2005).

3.1.2. Caracterización de mareas rojas según Lassus et al. (2016)

Las mareas rojas producen diversos daños, independientemente de la generación o no de toxinas, en su entorno. De esta manera, Lassus *et al.* (2016) realizaron una división de cinco grupos de organismos en base a los daños que puedan provocar sobre el medio ambiente, la cadena alimenticia y la salud humana:

- Grupo 1: especies no tóxicas pero que provocan grandes concentraciones de células provocando impactos negativos por el aumento de sólidos.
- Grupo 2: especies tóxicas que provocan envenenamiento del agua.
- Grupo 3: especies que provocan daños a otras especies mediante interacciones mecánicas.
- Grupo 4: especies tóxicas que provocan daños a humanos por contacto como, por ejemplo, por la generación de aerosoles que llegan a las costas.
- Grupo 5: especies que no están categorizadas como tóxicas para los humanos pero que se ha comprobado que pueden llegar a producir toxinas.

3.2. Factores físicos que influyen en el crecimiento de las mareas rojas.

La temperatura del agua, la luz que incide y los nutrientes son los parámetros limitantes en el crecimiento y desarrollo del fitoplancton, donde cada especie tiene su rango óptimo de crecimiento (Dale *et al.*, 2006). En los últimos años se ha producido un aumento en el número de apariciones de estos eventos debido a factores naturales y antrópicos que modifican los parámetros anteriores.

3.2.1. Concienciación y conocimiento

En los últimos años el acceso a la información se ha globalizado y la información sobre mareas rojas está disponible para todos los públicos en diversos medios

(Lassus *et al.*, 2016). Además, muchas de las nuevas especies documentadas en los últimos años, son especies autóctonas que han sido detectadas en la actualidad debido a la mejora de los métodos analíticos (Anderson *et al.*, 2017).

3.2.2. Eventos naturales

A pesar de que el aumento de apariciones de mareas rojas se atribuye principalmente a factores antrópicos, existen diversos factores naturales que son igual de importantes en la formación de mareas rojas (Sellner *et al.*, 2003). Estos factores naturales, cuando aumentan la temperatura del agua o la concentración de nutrientes, favorecen el crecimiento de las mareas rojas.

- Corrientes oceánicas y corrientes de viento: trasladan organismos de unas zonas a otras generando mareas rojas en sitios donde, con anterioridad, no habían aparecido (Sellner *et al.*, 2003).
- Precipitaciones: las corrientes formadas por las lluvias arrastran materiales ricos en nutrientes a las masas de agua (Dale *et al.*, 2006).
- Estratificación termal: los cambios de temperatura en las aguas favorecen la estratificación termal permitiendo el movimiento de los organismos móviles arriba y abajo en la columna de agua (Dale *et al.*, 2006).
- Frentes marinos: al igual que en la atmósfera, en el océano se producen frentes oceánicos cuando dos masas de agua con diferentes características se juntan; en estos frentes se favorece el crecimiento de las mareas rojas debido a las interacciones de los procesos físicos junto con las reacciones fisiológicas de los organismos (Anderson *et al.*, 2017; Franks, 1997). En la Figura 5 se muestra una marea roja a lo largo de un frente.
- Surgencias: fenómeno donde se produce un ascenso de masas de agua profundas a zonas superficiales. Estas masas de agua profundas tienen una temperatura muy inferior a las aguas superficiales provocando frentes marinos cuando se juntan con las masas superficiales; además, las masas de agua profunda son ricas en nutrientes, debido a la descomposición de

seres vivos que, cuando mueren, se depositan sobre el fondo marino (Anderson et al., 2017; Sellner et al., 2003). El ascenso de nutrientes favorece el crecimiento de los organismos formadores de mareas rojas.

- Quistes vivos: se han encontrado organismos en forma de quistes, especialmente de dinoflagelados, que se han preservado en lugares donde esas especies se encuentran extintas (Lassus et al., 2016). Estos quistes suelen ser mucho más resistentes que los organismos adultos por lo que pueden sobrevivir en condiciones extremas, lo cual es una ventaja respecto a sus competidores (Sellner et al., 2003).



Figura 5. Marea roja formando un frente paralelo a la orilla y una hilera creada por el viento. Foto: M. Godfrey. Fuente: Anderson et al., 2017.

3.2.3. Condiciones climáticas inusuales

Algunos fenómenos climáticos extremos que se producen con una frecuencia variable también provocan cambios drásticos en las condiciones de temperatura, luz y nutrientes de las masas de agua. Por ejemplo, los huracanes y tormentas tropicales; en 1972 se detectaron individuos de *Alexandrium tamarense*, endémico de Nueva Escocia, en el Golfo de Maine, y se concluyó que había sido transportado en un tornado (Lassus et al., 2016).

Otros fenómenos climáticos inusuales son las oscilaciones climáticas que afectan cíclicamente al clima de una determinada región. Algunas de estas oscilaciones se han ligado a la aparición de mareas rojas (Martínez et al., 2018):

- El Niño–Oscilación del Sur (ENSO): inestabilidad entre la presión del aire y la temperatura oceánica en el este y oeste del Pacífico (Lassus, et al., 2016) dando lugar a condiciones hidrológicas extremas a ambos lados del Pacífico.

- Oscilación del Atlántico Norte (NAO): fluctuaciones entre zonas de altas presiones (subtropicales) y bajas presiones (polar) en la cuenca del Océano Atlántico Norte. Oscilación asociada a fenómenos de surgencia que se dan en las costas españolas (Sellner *et al.*, 2003).
- Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Antártica (AAO): la PDO es un conjunto de fluctuaciones de presiones y temperaturas en el Pacífico Norte; mientras que la AAO describe el movimiento del cinturón de vientos del hemisferio sur. La correlación entre estos fenómenos y la proliferación de mareas rojas aún se encuentra en estudio (Martínez *et al.*, 2018).

3.2.4. Eutrofización

El aumento de la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en las masas de agua, es otro de los factores que aumentan la aparición de mareas rojas (Anderson *et al.*, 2017). El origen de los nutrientes que llegan a las aguas es muy variado: arrastre de fertilizantes, granjas de animales, aguas residuales, erosión de suelos, fenómenos de surgencia o acuicultura (Anderson *et al.*, 2017; Sellner *et al.*, 2003).

Lassus *et al.* (2016) ejemplifica la eutrofización con el caso del Mar de Seto. En este mar se produjo una fuerte eutrofización debido a los vertidos sin tratar de una industria papelera siendo estos regulados en el año 1972, momento en el cual las condiciones naturales del mar comenzaron a recuperarse.

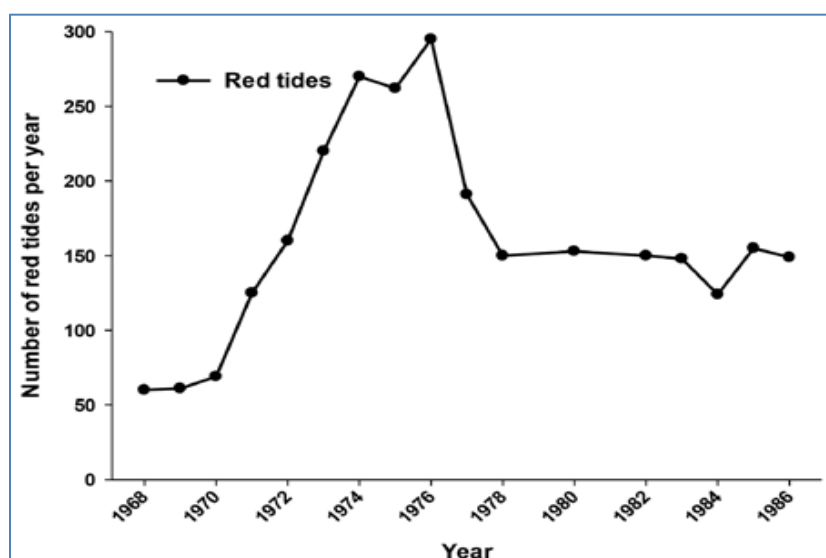


Figura 6. Incremento de mareas rojas (línea de puntos) en el Mar de Seto por eutrofización. Fuente: Lassus *et al.* (2016).

3.2.5. Pesca indiscriminada

Los peces que habitualmente son demandados por la población como alimento, son depredadores de peces más pequeños y medusas que, a su vez, son depredadores de pequeños organismos herbívoros que se alimentan de fitoplancton (Figura 7). De esta manera, al no tener depredadores, el fitoplancton crece sin control (Lassus *et al.*, 2016).

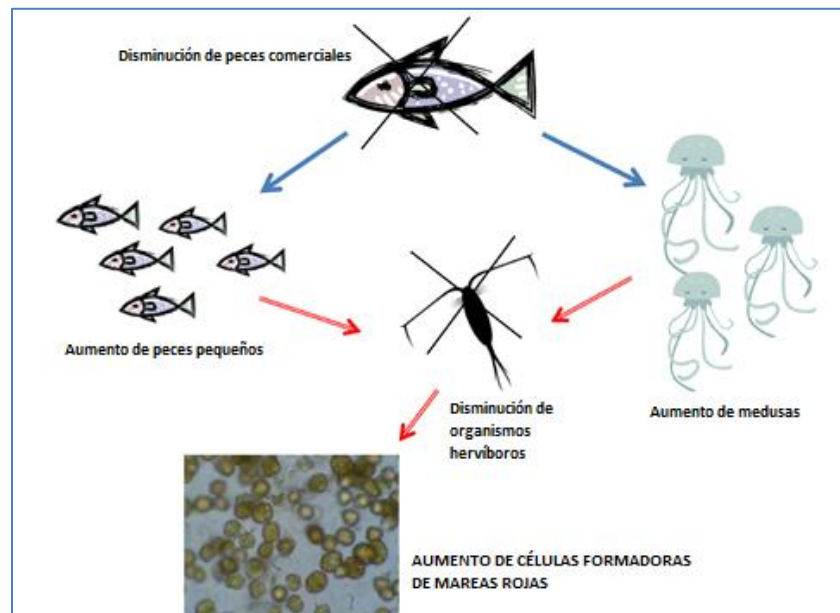


Figura 7. Incremento de mareas rojas por la desestabilización de la cadena trófica con motivo de la pesca indiscriminada. Fuente: Lassus *et al.*, 2016 (traducción propia).

3.2.6. Acuicultura

La pesca indiscriminada ha producido una reducción drástica en la disponibilidad de los peces de consumo habitual, convirtiendo la acuicultura en una actividad indispensable para satisfacer la demanda de la población (Lassus *et al.*, 2016).

La calidad y seguridad del producto acuícola es un factor crítico en cuanto a la venta de dichos productos obligando a la implementación de estrictos métodos para la detección de toxinas. Esta es la razón por la cual se han detectado organismos tóxicos en zonas donde, hasta el momento de la aparición de la granja acuícola, no se habían detectado (Anderson *et al.*, 2017; Lassus *et al.*, 2016). Además de la producción de toxinas, las mareas consumen gran parte del oxígeno existente, dejando sin él a los animales de las granjas marinas (Lassus *et al.*, 2016).

3.2.7. Aguas de lastre

Durante mucho tiempo se sospechó que el agua de lastre de los buques era un importante método de dispersión de especies entre las zonas donde navegaban los buques (Anderson *et al.*, 2017; Lassus *et al.*, 2016).

Aunque existen muchos organismos que pueden ser transportados en las aguas de lastre aguantando las condiciones de oscuridad (Anderson *et al.*, 2017), son aquellas especies que producen esporas o quistes las que tienen una mayor probabilidad de sobrevivir y alcanzar nuevos lugares (Lassus *et al.*, 2016).

Uno de los primeros ejemplos que hicieron estudiar en profundidad la dispersión de especies en las aguas de lastre fue la aparición de toxinas PSP de diferentes especies en los puertos de Melbourne, Hobart y Adelaida (Australia) donde hasta ese momento eran desconocidas (Lassus *et al.*, 2016). Este fenómeno toma una especial importancia cuando los buques descargan el agua de lastre en zonas protegidas o en zonas de acuicultura (Anderson *et al.*, 2017).

Debido al gran número de individuos que se encontraron en lugares donde no habían aparecido hasta el momento, la Organización Marítima Internacional (IMO) tuvo que generar unas guías donde se incluyen los tratamientos obligatorios a los que deben someterse las aguas de lastre (Lassus *et al.*, 2016).

3.2.8. Comercio de marisco vivo

Otro vector de propagación de organismos es el marisco que se transporta vivo para venderlo en regiones diferentes a los lugares donde han sido recolectados. Lassus *et al.* (2016) indica que los moluscos pueden contener esporas, quistes e incluso células completas de organismos en sus conchas, heces y tractos intestinales, como ocurrió con la introducción de ostras japonesas en zonas de Europa donde se introdujeron las especies *Undaria pinnatifida* y *Laminaria japonica*.

3.2.9. Cambio climático

El cambio climático aumenta la temperatura a escala global y los océanos, que actúan como reservorio del calor, generan circulaciones termohalinas provocando

el movimiento de nutrientes hacia capas superiores (Lassus *et al.*, 2016). Además, el cambio climático también provoca variaciones en los patrones de lluvias de manera que se producen más arrastres de nutrientes desde tierra (Hudnell, 2008; Moore *et al.*, 2008). Estos dos fenómenos provocan eutrofización de las aguas, que ya se ha visto que es un factor que incrementa la aparición de las mareas rojas.

Por otro lado, el cambio climático también produce un aumento directo de la temperatura del agua; este incremento de temperatura favorece la reproducción y el crecimiento de los organismos formadores de mareas rojas (Dale *et al.*, 2006). Además, el cambio climático también aumenta la frecuencia de surgencias y estratificación, y producirá cambios en las corrientes marinas (Lassus *et al.*, 2016), fenómenos que influyen en los procesos de generación de mareas rojas.

Lassus *et al.*, (2016) incide en la importancia de realizar análisis de tendencias de las poblaciones de, al menos, 30 años de acuerdo con los estadistas. En la actualidad no se cuenta con registros de tal antigüedad por lo que, aunque parece claro que el cambio climático incrementa la aparición de mareas rojas, es algo que científicamente no se puede certificar.

3.3. Mareas rojas y desalación: impactos en plantas desaladoras

Debido a los impactos que las mareas rojas producen en las desaladoras, se ha aumentado el estudio de estas de manera que los operadores de planta puedan adelantarse a su llegada a las plantas, tomando medidas que disminuyan, e incluso eliminen, los daños que pueden producir (Anderson *et al.*, 2017).

Existen dos tipos de plantas desaladoras: termales y por ósmosis inversa. Las primeras no se ven afectadas por las mareas rojas, a menos que estas contengan macroorganismos que obstruyan las captaciones (Anderson *et al.*, 2017; Boerlage y Nada, 2014). Por otro lado, varios autores (Anderson *et al.*, 2017; Loganathan *et al.*, 2018; Vardon *et al.*, 2011; Villacorte, 2014) resumen los impactos en las plantas desaladoras de ósmosis inversa (SWRO) en dos: dificultades operacionales debido a un aumento en la concentración de sólidos en suspensión y posible toxicidad del agua producto por daños en las membranas que permitan el paso de toxinas.

3.3.1. Aumento de los sólidos en suspensión

Las proliferaciones extremas de fitoplancton generan un aumento desmesurado de los sólidos en suspensión provocando la obstrucción de los filtros granulares (Boerlage y Nada, 2014), así como provocar incrustaciones en las membranas del proceso (Guastalli *et al.*, 2013). El porcentaje de aumento de sólidos depende de la especie, pero puede llegar a un 50% en Carbono Orgánico Total (TOC).

La composición química de la Materia Orgánica Algal (AOM) incluye proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos, lípidos y otro tipo de sustancias orgánicas disueltas (Anderson *et al.*, 2017). Las Partículas de Exopolímeros Transparentes (TEP) son los compuestos más problemáticos, debido a su naturaleza adhesiva y su alta resistencia hidráulica (Boerlage y Nada, 2014).

Se entiende por bioensuciamiento la acumulación de bacterias y materia orgánica en la superficie de las membranas creando biopelículas (Guastalli *et al.*, 2013). Las TEPs favorecen el bioensuciamiento debido a que se pegan a la membrana, facilitando la adherencia de las bacterias; además, su descomposición libera nutrientes que son asimilados por dichas bacterias (Boerlage y Nada, 2014).

Debido al bioensuciamiento se genera una resistencia adicional al paso de agua que se elimina aumentando la presión o con lavados químicos a contracorriente (Anderson *et al.*, 2017; Salinas – Rodríguez *et al.*, 2019; Vardon *et al.*, 2011; Villacorte, 2014).



Figura 8. De izquierda a derecha: membrana virgen, membrana sucia, membrana tras limpieza con NaOCl y membrana tras limpieza con ascorbato. Fuente: Wang *et al.*, 2014.

3.3.2. Toxicidad del agua producto

Las toxinas se liberan al agua mediante lisis celular (Loganathan et al., 2018). Boerlage y Nada (2014) concluyen que el riesgo de aparición de toxinas en el agua producto de una planta de desalación esperado es ínfimo debido a la existencia de estudios que prueban que la eliminación de toxinas en sistemas de destilación es del 99%, llegando a ser superior en sistemas de desalación por osmosis inversa. Sin embargo, es necesario realizar estudios adicionales ya que los estudios realizados han sido a escala piloto y no se tienen evidencias a tamaño real. Este riesgo se minimiza con un buen mantenimiento de las membranas de ósmosis ya que, si estas se encuentran en buen estado, las toxinas no las atraviesan.

3.4. Detección temprana de mareas rojas

La creación de programas de monitorización para detectar los eventos de mareas rojas antes de su llegada a las plantas desaladoras es el método más adecuado ya que otorga ventaja a los operadores para poner en marcha estrategias que reduzcan o eliminen los daños (Reguera *et al.*, 2011; Vardon *et al.*, 2011). Sin embargo, tanto la gran variedad de organismos y su distribución irregular, como la interacción de estos con los factores físicos de su entorno, dificultan el diseño de planes precisos (Du *et al.*, 2017). Para el diseño de los planes, hay que caracterizar:

- Caracterización fisicoquímica: modelos históricos para conocer corrientes, variaciones estacionales, fuentes de nutrientes, aparición de frentes, mareas y condiciones meteorológicas (Anderson *et al.*, 2017; Reguera et al., 2011).
- Caracterización del fitoplancton: alta variedad de especies que fluctúan en tipología y concentración estacionalmente; estudios de observación directa con expertos en identificación (Anderson et al., 2017).

En los siguientes apartados, se analizarán algunos métodos que permiten una caracterización adecuada de las mareas rojas entre los que se encuentran la detección visual directa, la medición de AOM o la teledetección. Estos métodos se combinan para conseguir una caracterización más completa, si bien es cierto que es imposible conseguir una caracterización total (Anderson et al., 2017).

3.4.1. Métodos convencionales

3.4.1.1. Detección visual directa con microscopio

Método más utilizado a lo largo de la historia que permite obtener una confirmación visual de las especies presentes permitiendo cuantificar la concentración de cada especie; requiere un tiempo elevado y un alto grado de experiencia en la identificación de especies de fitoplancton (Sellner *et al.*, 2003).

Consiste en la recogida de muestra para su posterior análisis en laboratorio. La recogida de muestra es un parámetro crítico pues es necesario recoger muestras representativas. A continuación, se recogen las técnicas de muestreo resumidas de la publicación de Reguera *et al.*, 2011:

- Redes de plancton: luz de paso de 10 – 20 μm . Esta técnica no es adecuada para un estudio cuantitativo puesto que es selectiva, recogiendo únicamente organismos cuyo tamaño sea superior a la luz de paso. Generan una muestra representativa de la columna de agua al ser arrastrada a lo largo de la misma.
- Botellas oceanográficas: permite tomar una muestra de agua a una profundidad concreta. Consiste en un cilindro con dos tapas que están abiertas hasta que se alcanza la profundidad deseada y se deja caer un peso metálico denominado “mensajero”, el cual presiona el botón de cierre de las tapas. Permite realizar un análisis cuantitativo y cualitativo muy preciso para una profundidad dada; si se quiere tener una visión global de la columna de agua, es necesario utilizar varias botellas que recojan muestras a diferentes profundidades.
- Tubos y mangueras muestreadoras: alternativa a la utilización de varias botellas oceanográficas. Utilización de una manguera que recoge una muestra completa de la columna de agua. Sin embargo, no permite conocer la distribución vertical de las especies; esto se soluciona dividiendo la manguera en sectores cerrados que recojan muestras a diferentes profundidades.
- Tomamuestras automáticos: ciertas plataformas marinas como boyas, pilotes o plataformas petrolíferas actúan como base de sistemas automatizados de tomamuestras que recogen periódicamente volúmenes de agua

predeterminados. Este sistema no presenta datos a tiempo real, siendo un problema debido a su gran variabilidad. Cuando el presupuesto es alto, se puede añadir un citómetro que realice medidas en continuo y las transfiera a un ordenador en tierra firme (Anderson *et al.*, 2017).

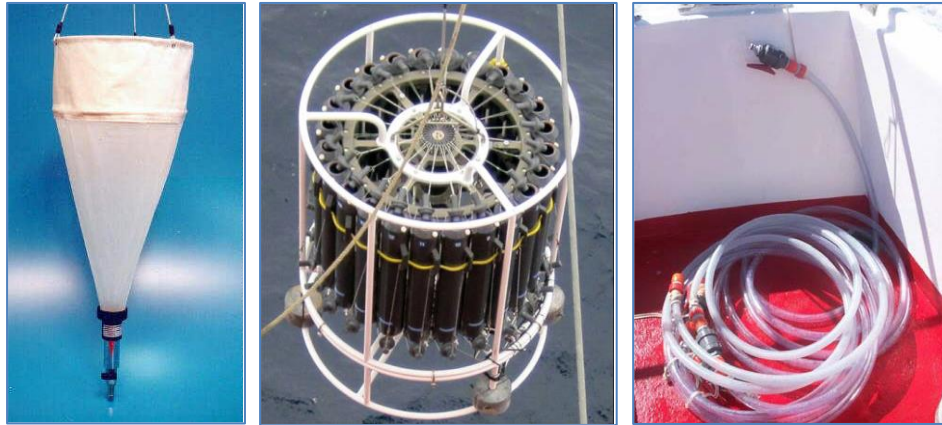


Figura 9. Métodos de muestreo: izquierda, red de plancton con colector; centro, roseta con 24 botellas oceanográficas; derecha, manguera muestreadora.

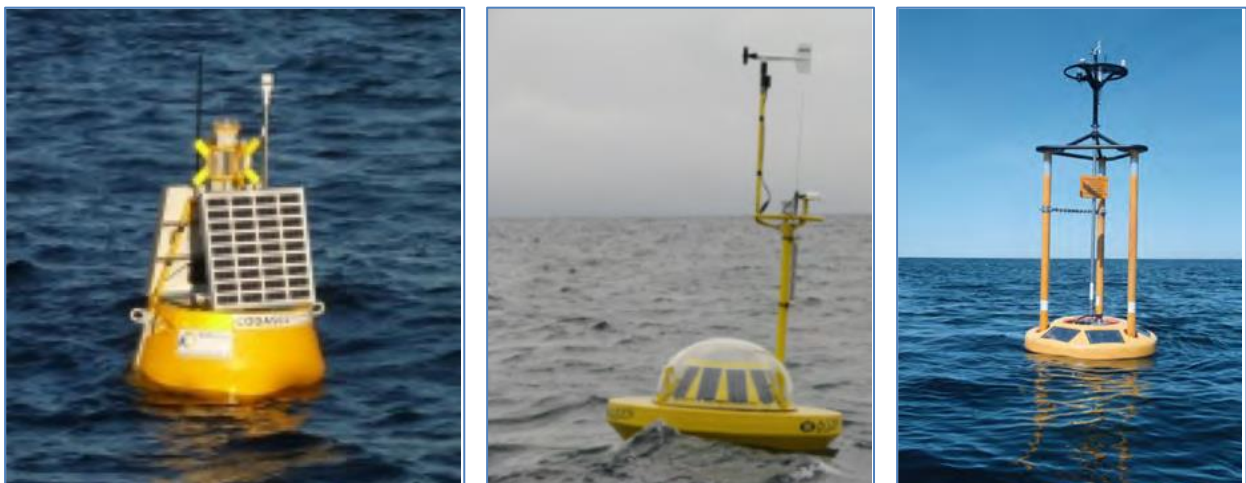


Figura 10. Ejemplos de boyas con sistemas de recogida de muestra y detección de organismos fitoplanctónicos. Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

Cuando el tiempo de residencia de la muestra en un recipiente sea alto, entonces es necesario adicionar un conservante para su transporte. El más utilizado es el Lugol seguido del Formol (Anderson *et al.*, 2017; Reguera *et al.*, 2011). Una vez en el laboratorio, la identificación cualitativa y cuantitativa, se realiza con un microscopio, la primera mediante la observación directa de un experto en identificación y la segunda mediante cámaras de conteo que se instalan en los microscopios.

3.4.1.2. Medición de factores físicos

Los factores físicos como la turbidez, la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto o la conductividad son parámetros que se miden diariamente en las desaladoras y que permiten detectar cambios en la calidad del agua de entrada. Sin embargo, no son específicos de la proliferación de mareas rojas por lo que los cambios que se produzcan pueden deberse a otros motivos (Anderson *et al.*, 2017).

- Termómetros de inmersión: miden la temperatura a una profundidad concreta. Permiten conocer la profundidad de la termoclina.
- Sondas multiparamétricas: permiten medir diferentes factores en función del sensor seleccionado.
- Sondas CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*): permiten conocer el valor de diversos parámetros y la profundidad a la que se ha realizado la medida. Son más precisas que las sondas multiparamétricas.
- Disco de Secchi: disco de 20 – 30 cm de diámetro que se hunde en una masa de agua hasta que deja de verse. En este momento se mide la profundidad a la que se encuentra, denominada profundidad de Secchi. Esta profundidad se relaciona con el coeficiente de atenuación de la luz, por lo que conociendo este valor se puede obtener el valor de turbidez del agua.

3.4.2. Sistemas de monitorización mediante teledetección

La utilización de satélites para la detección de las mareas rojas es una herramienta que ha sido ampliamente estudiada (Anderson *et al.*, 2017) en este campo ya que los sensores confieren un rango de color a la superficie oceánica en función del valor obtenido para un parámetro (Kim *et al.*, 2009).

Esta herramienta permite ampliar el rango de estudio, acceder a zonas inaccesibles para los humanos y tomar muestras continuas con una frecuencia conocida (Anderson *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2009). Estos sistemas también permiten conocer la velocidad y dirección del movimiento de las mareas rojas (Kim *et al.*, 2009) facilitando la anticipación de los operadores de plantas.

Cualquier factor físico de los anteriormente mencionados pueden medirse con teledetección (Kim *et al.*, 2009), sin embargo, el parámetro más utilizado es la clorofila debido a que su aumento o disminución está directamente relacionado con la proliferación de fitoplancton y a se detecta en varias longitudes de onda, lo cual permite la eliminación del ruido ambiental (Anderson *et al.*, 2017).

Los visores gratuitos existentes permiten detectar las mareas rojas, pero no los organismos que las producen; para esto existen modelos no convencionales de pago que han de ser ajustados para cada zona por observación directa (Anderson *et al.*, 2017). La gran limitación de esta técnica es que no se puede caracterizar la marea hasta nivel especie. Los visores más utilizados (Anderson *et al.*, 2017) son:

- Visor *The Worldview*: de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) pone a disposición de los usuarios para consultar imágenes recogidas por diversos satélites. Sin embargo, la resolución está limitada.

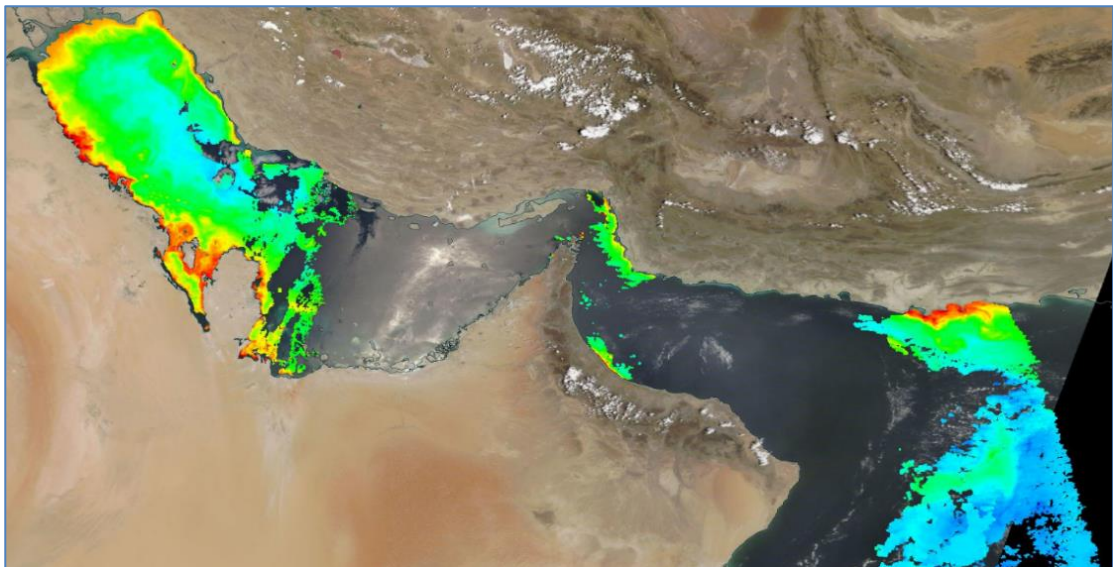


Figura 11. Evolución de la clorofila en el golfo de Arabia y el Golfo de Omán, a partir de los satélites Terra/Modis y Aqua/Modis el 24 de mayo de 2020. Fuente: visor *Worldview*, NASA.

- Visor del *Ocean Biology Processing Group (OBPG)*: puesto a disposición del usuario por la NASA; genera la misma información que el visor anterior, pero con imágenes tomadas de más satélites. Permite la descarga en varias resoluciones.

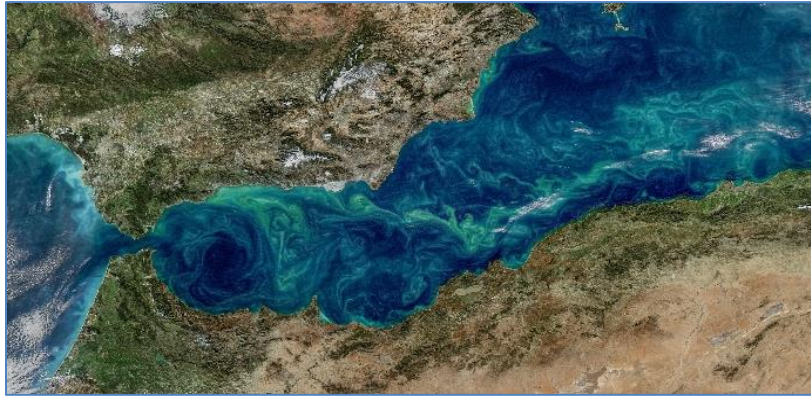


Figura 12. Circulación de fitoplancton en el Mar de Alborán, tomado por el sensor Aqua/MODIS el 17 de enero de 2018. Fuente: Gene C. Feldman, visor OBPG, NASA.

3.4.3. Métodos avanzados para la detección de la AOM

La detección de AOM es un parámetro muy exacto puesto que está directamente relacionado con la presencia de mareas rojas. La AOM se libera al medio marino por lisis celular, en condiciones de estrés y, algunas especies, en condiciones normales (Villacorte, 2014). Existen una gran variedad de métodos analíticos para la medición de AOM; en el presente TFM se analizarán las técnicas contenidas en Anderson *et al.*, 2017 y Villacorte, 2014.

3.4.3.1. Medición de TEPs

Como ya se ha comentado, estas sustancias son las más problemáticas debido a su resistencia hidráulica, propiedades adhesivas y base en la alimentación de bacterias. Para su detección se utiliza la tinción con azul alciano, el cual tiñe los componentes funcionales, pero no reacciona con los ácidos nucleicos o biopolímeros neutrales. La reacción se produce a pH 2,5 de manera que se detecten los TEPs sulfatados y carboxilados. El principal inconveniente de este método es que el azul alciano también reacciona con las sales disueltas, sobreestimando la concentración de TEPs.

3.4.3.2. Tinción con lectinas y conteo por microscopía confocal (CLSM):

Las lectinas son proteínas que se utilizan para la detección de polisacáridos; se las marca con fluorocromo para medir la fluorescencia que genera tras una incubación a temperatura ambiente y en completa oscuridad durante veinte minutos. Es importante retirar el exceso de lectinas para obtener un resultado exacto.

La fluorescencia se mide con un microscopio confocal de barrido láser, el cual utiliza iluminación puntual e identifica únicamente los elementos contenidos en el plano focal, generando imágenes de mayor calidad que los microscopios convencionales.

3.4.3.3. Cromatografía líquida – detección de carbono orgánico (LC – OCD)

Técnica combinada que incluye las propiedades separativas de la cromatografía líquida con los balances de masa de los métodos de detección de carbono orgánico. La unión de estas dos propiedades permite detectar AOM de diferentes pesos moleculares. Una filtración previa de 45 µm se hace necesaria para la eliminación de los compuestos de mayor tamaño molecular que no conforman la AOM.

Un cromatógrafo realiza medidas en función de los tiempos de retención del nitrógeno orgánico, carbono orgánico y ultravioleta en la columna cromatográfica, siendo los compuestos de mayor peso molecular aquellos que tienen un menor tiempo de retención.

En los últimos años se ha estudiado una variante del LC – OCD con dos columnas cromatográficas de manera que en la primera se detecten sustancias húmicas y compuestos orgánicos con bajo peso molecular; y en la segunda se detecten las sustancias de alto peso molecular. Este sistema elimina las interferencias.

3.4.3.4. Medición de fluorescencia con matrices de excitación – emisión

La medición de fluorescencia con matrices de excitación – emisión (FEEM): la espectroscopía a través de una matriz de excitación – emisión permite determinar cuantitativamente el perfil fluorescente de un material dado, mediante la creación de un mapa tridimensional donde se engloban tanto el perfil de emisión como la longitud de onda de excitación. Este mapa permite comprender más precisamente la pureza y composición del material estudiado.

3.4.3.5. Medición de fuerzas mediante microscopía de fuerzas atómicas

El cultivo algas, colocado sobre una membrana, se introduce en un microscopio de fuerzas atómicas para medir las fuerzas de adhesión y cohesión existentes. Esta medida se compara con los valores de estas fuerzas cuando la membrana está libre de algas.

3.4.4. Índices de incrustación

La medición del potencial que un agua tiene de ensuciar las membranas es un parámetro ampliamente utilizado para la elección de las técnicas de pretratamiento necesarias para evitar el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa y todos los inconvenientes que lleva asociado. En este apartado se analizarán tres técnicas diferentes.

3.4.4.1. Índice de Densidad de Sedimentos (SDI)

Este índice de incrustación convencional lleva utilizándose en la industria de la desalación más de cuarenta años. La técnica consiste hacer pasar la muestra de agua por un filtro de 45 μm a una presión de 207 kPa para determinar la velocidad de obstrucción del filtro mediante la siguiente fórmula (Anderson et al., 2017):

$$SDI_T \left(\frac{\%}{\text{min}} \right) = \frac{\%PF}{T} = \frac{\left[1 - \frac{t_i}{t_T} \right] \cdot 100}{T} \quad (1)$$

Donde,

- t_i es el tiempo de filtración de la muestra inicial (habitualmente 500 ml).
- t_T es el tiempo de filtración de una segunda muestra (mismo volumen).
- T es el tiempo total de filtración (5, 10 o 15 minutos).
- %PF es el porcentaje de incrustación del filtro que no debe superar el 75%.

Cuando el valor de SDI es 5 %/min o menor, un pretratamiento con filtros de cartuchos sería suficiente para no dañar las membranas de osmosis inversa; sin embargo, cuando el valor de SDI supera el 5%/min, se hacen necesarios pretratamientos más rigurosos (Salinas – Rodríguez et al., 2019). En ocasiones, el valor del SDI es insuficiente para caracterizar un agua en cuanto a su potencial de incrustación por lo que hay que combinarlo con otros métodos (Villacorte, 2014).

3.4.4.2. Índice de incrustación modificado (MFI) – 0,45

Schippers y Verdouw (1980) desarrollaron el MFI – 0,45 para solucionar las imprecisiones del método SDI (Anderson et al., 2017). Este método considera que la torta de materia que se forma sobre la membrana es el mecanismo dominante

del ensuciamiento de esta (Salinas – Rodríguez et al., 2019). La filtración de la muestra por la torta tiene un comportamiento lineal respecto a la concentración de partículas (Anderson et al., 2017).

Tal y como indica Anderson et al., (2017), el potencial de incrustación neto o permeabilidad de la torta puede deberse a organismos de gran tamaño o a una gran concentración de organismos, y este método permite diferenciar entre ambas causas. El valor del MFI-0,45 aumenta a medida que el tamaño de los organismos disminuye.

3.4.4.3. Índice de incrustación modificado (MFI) – UF

El método MFI – UF permite detectar organismos de menor tamaño puesto que sustituye la membrana de 0,45 μm por membranas de ultrafiltración (UF) que tiene una luz de paso de 0,001 μm obteniéndose valores del índice de incrustación más precisos. Al igual que el MFI-0,45, este índice se basa en la permeabilidad de la torta que se forma sobre la membrana (Anderson et al., 2017)

3.4.5. Otras técnicas de detección

3.4.5.1. Medición de clorofila (Anderson, et al., 2017):

La clorofila es el pigmento mayoritario en las especies fotosintéticas de fitoplancton por lo que su medición proporciona una aproximación bastante precisa de la aparición de mareas rojas. Sin embargo, es necesario complementarlo con otros estudios puesto que la luz y disponibilidad de nutrientes influyen en su generación.

Para su medición, se recoge una muestra de agua que se filtra para separar las células de fitoplancton del agua. Una vez separadas, la muestra de células se introduce en un baño de un disolvente, generalmente acetona, que extraerá la clorofila de las células. La cuantificación se realiza mediante un fluorímetro, que mide la fluorescencia de la clorofila, o un espectrofotómetro que mide la absorbancia de la clorofila.

3.4.5.2. Citometría de flujo

Esta técnica consiste en la medición de las propiedades ópticas de las células contenidas en la muestra de agua, marcadas con fluorocromo, permitiendo una determinación precisa del número de núcleos existentes (Loureiro, 2009).

El principio de esta técnica consiste en hacer pasar a alta velocidad las células por un haz de luz intenso (láser) para analizar la dispersión de la luz y la fluorescencia; el conteo se realiza con programas de procesamiento de datos (Laguado, 2007). La medición se realiza con un flujo a alta velocidad permitiendo la recolecta de un elevado número de datos en poco tiempo (Laguado, 2007; Loureiro, 2009).

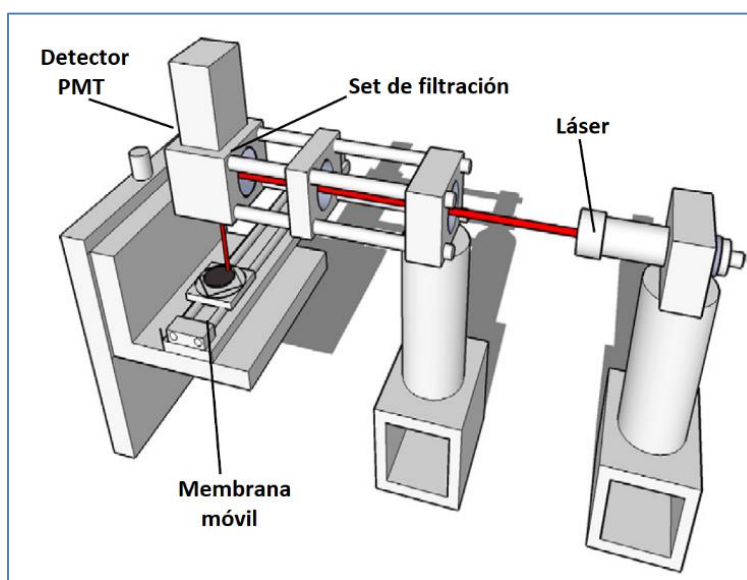


Figura 13. Prototipo LSC donde un láser con longitud de onda 635 nm incide sobre la membrana para provocar la autofluorescencia del cultivo que se medirá con el detector PMT (fotomultiplicador).

Actualmente existen dispositivos portátiles de medición por citometría de flujo, como el sistema Flowcam que proporciona información multiparamétrica y genera imágenes de cada partícula que lo atraviesa permitiendo el reconocimiento de las especies por una persona con experiencia suficiente (Sellner et al., 2003).

Vardon et al. (2011) realizaron un estudio comparativo entre la citometría de flujo y la citometría en fase sólida (LSC). Esta última consiste en hacer pasar el flujo cargado de células por una membrana donde estas quedan recogidas. Posteriormente se realiza una medición por fluorescencia. Los resultados de este estudio recogieron, entre otras conclusiones, que la LSC requiere un minuto para

procesar 12 ml, mientras que la citometría de flujo necesita tres horas y quince minutos. La integración de un sistema LSC en los medidores situados en la entrada de una planta desaladora, permitiría detectar a tiempo real un aumento de células de organismos formadores de mareas rojas.

3.4.5.3. Sistema *Ferrybox* (Anderson *et al.*, 2017)

Sistema compacto que recolecta información de la capa superficial del mar. Este sistema se instala en un barco, preferiblemente uno con rutas periódicas, y consta de diversos sensores que miden turbidez, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia de la clorofila. Una alícuota se guarda para comprobar valores.

El principal problema de este método es la consecución de un barco que se preste a albergar este sistema, ya que es necesario realizar dos aberturas para la entrada y salida del agua. Los datos se transmiten a receptores en tierra firma.

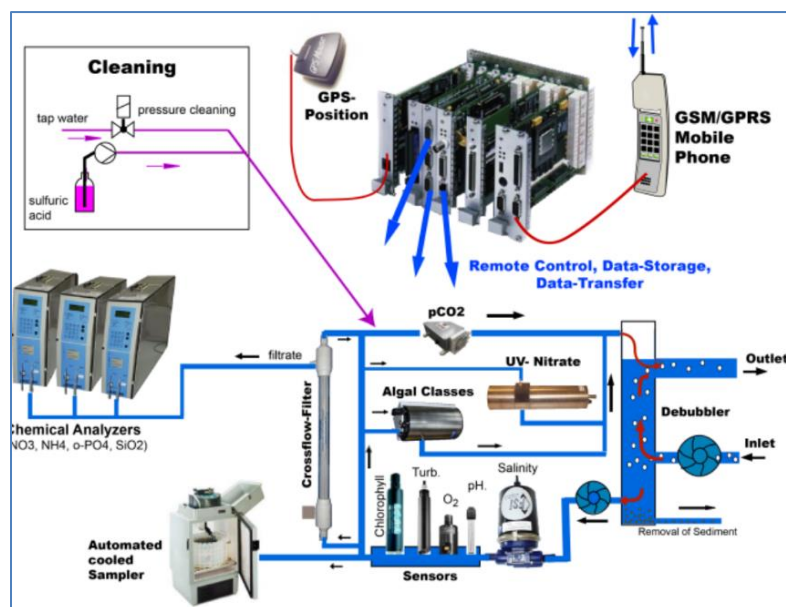


Figura 14. Ejemplo del sistema *Ferrybox* alemán. Fuente: *Ferrybox*, <https://www.ferrybox.com>.

3.4.5.4. Métodos matemáticos:

La mayor parte de los métodos que implican la medición de un único factor (turbidez, clorofila, etc.) no consideran la influencia del resto de factores sobre la aparición de mareas rojas. Para solventar esto, diversos autores han utilizado técnicas matemáticas como regresiones lineales, redes neuronales, redes complejas o programación genética (Du *et al.*, 2017).

3.5. Prevención y control de mareas rojas

Controlar y, si es posible, eliminar las mareas rojas antes de que lleguen a la entrada de las desaladoras es el método más efectivo para evitar los problemas los impactos que se han comentado anteriormente. La prevención y control de las mareas rojas es complicada y genera polémica debido a (Anderson *et al.*, 2017):

- Las mareas rojas son muy variables espacial y temporalmente debido a la gran variedad de factores físico – químicos que las afectan. De esta manera, las técnicas a emplear pueden ser muy complejas y costosas.
- Los organismos que las componen son tan diversos que no existe un método genérico que permita controlar todo tipo de mareas rojas.
- Algunas de las técnicas que se utilizan para la mitigación y/o eliminación de las mareas rojas generan problemas en los entornos acuáticos que, en ocasiones, son más dañinos para los ecosistemas que las propias mareas.
- La mitigación de mareas rojas alejadas de la costa produce beneficios en todas las actividades costeras que se puedan ver afectados. Esta es la razón por la cual los gobiernos deberían tener un departamento que se dedique a la monitorización y control de mareas rojas, pero en la actualidad, muy pocos gobiernos cuentan con esta estructura.

3.5.1. Medidas de prevención

En este apartado se analizarán las medidas de prevención (medidas que impiden la aparición de las mareas rojas) contra la proliferación de las algas desde el punto de vista del operador de una planta desaladora según Anderson *et al.*, 2017:

- Carga de nutrientes: las mareas rojas se ven favorecidas por los aumentos de nutrientes por lo que evitar la introducción de nutrientes con origen antrópico es un factor clave para dificultar la proliferación de los organismos formadores de mareas rojas. Los principales aportes provienen de vertidos de zonas agrícolas, y de industrias con altas cargas de nitrógeno y fósforo. Es complicado que los operadores puedan actuar directamente sobre este factor.

- Modificación de la hidráulica: controlar el tiempo de residencia de las masas de agua es un factor que también impide la generación de mareas puesto que en aguas donde el agua fluye a gran velocidad, la permanencia de las mareas rojas en una zona determinada es menor al ser arrastrada. Este método sería adecuado para zonas fluviales.
- Eliminación de la estratificación de la columna de agua: generar corrientes que eliminen o modifiquen periódicamente la estratificación de la columna de agua complicará la proliferación masiva de microalgas. Existen diversas técnicas para modificar la estratificación como la generación de corrientes artificiales mediante tecnología solar para desplazar el epilimnion (Hudnell *et al.*, 2010) o añadiendo un floculante para facilitar el hundimiento de las células y drenando los sedimentos (Lürling y Faassen, 2012).

Uno de los grandes problemas de las plantas desaladoras es la emisión de salmueras que tiene que realizarse adecuadamente para no influir negativamente en el entorno natural. Sin embargo, el vertido de la salmuera puede ser ventajoso en cantidades controladas y puntualmente alterando la estratificación desplazando la haloclina (Owen, 2016).

3.5.2. Medidas de mitigación – eliminación

En este punto se analizan algunas técnicas que permiten eliminar o, en su defecto reducir, las mareas rojas una vez se han detectado. Estas técnicas producen mejores resultados cuando se combinan entre sí (Anderson *et al.*, 2017).

- Utilización de paja de cebada: se ha estudiado ampliamente que la paja de cebada tiene propiedades que inhiben el crecimiento de algunas especies de cianobacterias y dinoflagelados (Xiao *et al.*, 2013), si bien es cierto que otras especies no se ven afectados por la paja. Además, algunas especies de dinoflagelados utilizan la paja como fuente de nutrientes (Anderson *et al.*, 2017).
- Floculación: la adición de compuestos floculantes es una técnica ampliamente utilizada puesto que permite crear agregados de más tamaño que sedimenten, arrastrando a los organismos formadores de mareas rojas.

Aunque se han estudiado muchos tipos de floculantes, los más utilizados son los minerales de arcilla; estos minerales se transforman en soluciones acuosas arcillosas que se dispersan sobre las proliferaciones de algas obteniéndose eliminaciones superiores al 90 % (Anderson et al., 2017).



Figura 15. Dispersión de solución acuosa de arcilla en Korea. Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

- Adición de químicos: se ha estudiado ampliamente la adición de compuestos químicos que, por diversos motivos, inhiben el crecimiento de ciertos organismos, siendo los más utilizados el sulfato de cobre, ácido sulfúrico, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio y cloro (Anderson *et al.*, 2017).
- Adición de organismos biológicos: esta técnica, muy utilizada en los últimos años, consiste en la introducción de otras especies en el ecosistema de manera que se regule la cadena trófica. También se pueden incluir microbios (virus y bacterias) en cantidades controladas que provocan la lisis de las células o de competidores que consuman parte de los recursos que necesita el fitoplancton para crecer (Anderson *et al.*, 2017).
- Otras técnicas: algunas otras técnicas, como la electrolisis, la adición de ozono o la utilización de ultrasonido se han estudiado puesto que producen radicales libres que inhiben el crecimiento de algunos tipos de fitoplancton, así como imposibilitan la producción de ciertas toxinas (Lüring, 2016).

3.6. Estrategias de operación y mitigación en plantas desaladoras.

El principal impacto que las mareas rojas provocan en una planta desaladora es el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa haciendo que la planta pierda productividad e incluso provocando su cierre. Durante la fase de construcción, es imprescindible estudiar el entorno para diseñar adecuadamente los dos puntos clave en la eliminación de fitoplancton: captación de agua y línea de pretratamiento.

3.6.1. Captación de agua bruta

Anderson *et al.*, 2017 subraya la importancia de los sistemas de captación de agua bruta puesto que son el primer punto de control y eliminación del fitoplancton de las mareas rojas. Son dos los tipos de captaciones existentes: captaciones superficiales y captaciones subsuperficiales.

3.6.1.1. Captaciones superficiales (Anderson *et al.*, 2017)

Se llama captación superficial a aquellas instalaciones que obtienen el agua bruta a cualquier profundidad de la columna de agua. Estas captaciones pueden estar en la costa, cerca de la costa o alejadas de la costa. Algunas captaciones llevan asociada la dosificación de cloro para la eliminación de materia biológica.

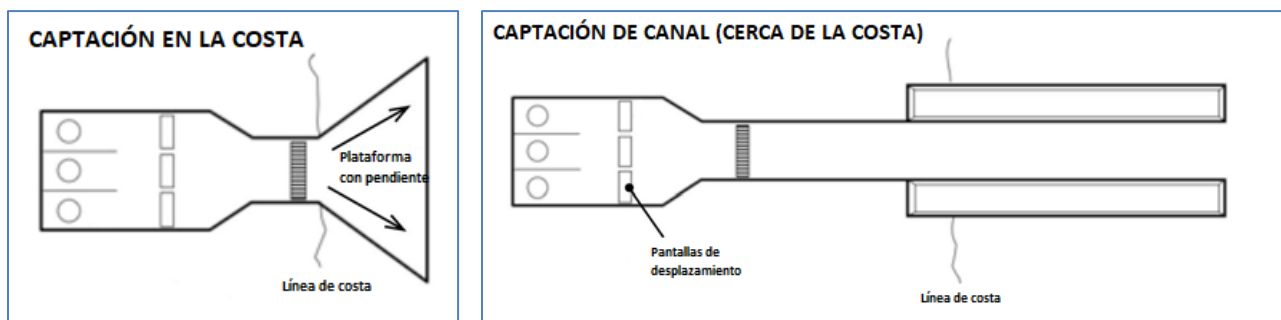


Figura 16. Tipos de sistemas de captación. Fuente: Anderson *et al.* (2017) (traducción propia).

Las instalaciones de captación de agua siempre llevan instaladas unas pantallas con luces de paso distintas para evitar la entrada de sólidos en la planta; la luz de paso mínima suele ser 1mm. Además, para evitar la entrada de organismos marinos, la velocidad de entrada del agua se reduce hasta 0,15 m/s de manera que los peces tengan tiempo suficiente para nadar lejos de la entrada a la planta.



Figura 17. Algas y otros tipos de materia marina bloqueando la pantalla del sistema de captación (izquierda) y la misma pantalla después de realizar una limpieza (derecha) en una planta desaladora del Océano Índico.

Fuente: Domingo Zarzo Martínez, Sacyr Agua S.L.

Uno de los factores estudiados durante la construcción del sistema de captación tiene que ser la ubicación de esta atendiendo a las condiciones hidráulicas de la zona, los organismos presentes y el histórico de mareas rojas de la región. Cuando aparece de un evento de marea roja, las principales estrategias de operación son:

- Captación de agua en discontinuo: la existencia de organismos móviles que se desplazan a lo largo de la columna de agua permite organizar la captación de agua en función del momento del día. Durante las horas de luz los organismos se encuentran en las capas superiores, por lo que una captación situada en dichas capas podría pararse, y viceversa.
- Pantallas con una luz de paso muy pequeña que impidan la entrada de organismos fitoplanctónicos. Estas pantallas, habitualmente, se utilizan de manera discontinua, por lo que la estrategia sería dejarlas de manera continua.
- Suspensión de la dosificación de cloro puesto el cloro puede provocar lisis en las células liberando AOM, entre la que se encuentran los TEPs.

3.6.1.2. Captaciones subsuperficiales

Las captaciones subsuperficiales son aquellas que obtienen el agua por debajo de la arena de la playa o del lecho marino, los cuales actúan como primer filtro (Anderson *et al.*, 2017). Estas captaciones se dividen en dos categorías: pozos y galerías; descritos a continuación (Anderson *et al.*, 2017). Tipos de pozos:

- Pozos verticales convencionales: pozos convencionales situados lo más cerca de la costa posible, por lo que generan un alto impacto visual.
- Pozos Ranney: pozo vertical de donde surgen diversos drenes horizontales que capturan el agua del acuífero; su capacidad de extracción es mucho mayor que los pozos verticales.
- Pozos inclinados: construcción realizada en tal ángulo que la superficie filtrante del pozo quede debajo del lecho marino para la obtención de agua de la interfase agua salada / agua dulce.
- Pozos horizontales: construcciones horizontales que emergen en el lecho marino. Este tipo de captaciones han sido ampliamente utilizados en la extracción de petróleo.

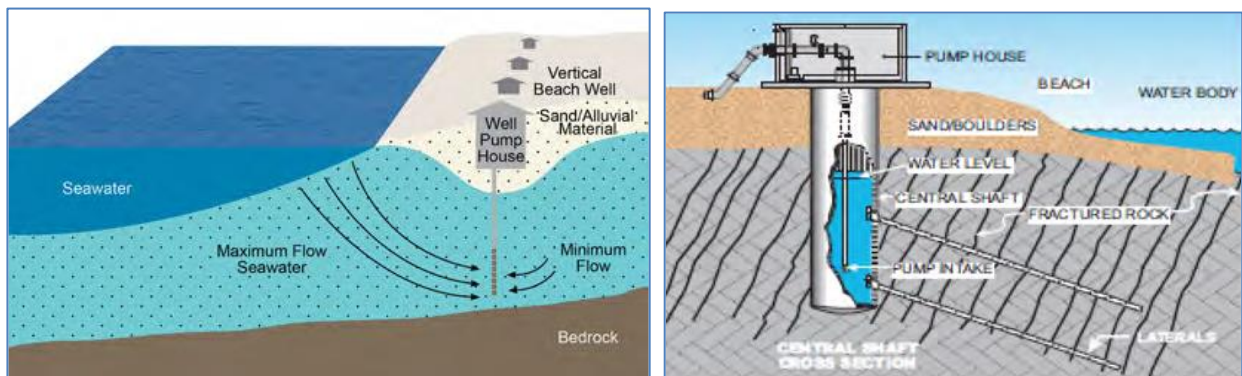


Figura 18. Pozo convencional vertical (izquierda) y pozo Ranney (derecha). Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

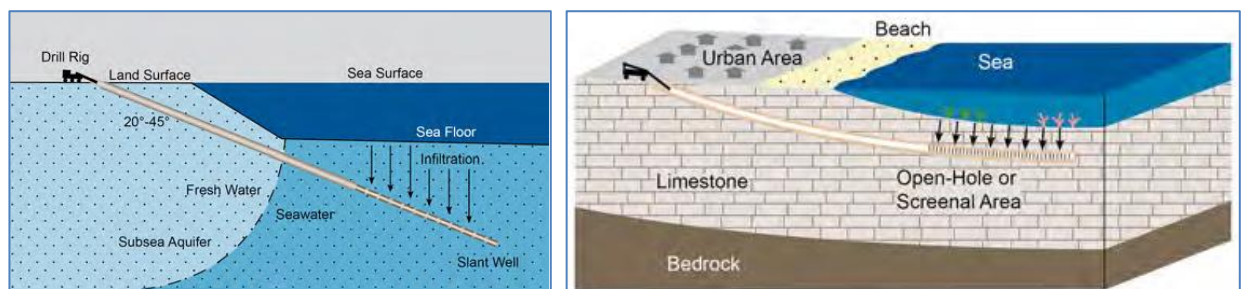


Figura 19. Pozo inclinado (izquierda) y pozo horizontal (derecha). Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

Las galerías son construcciones que utilizan los principios de la filtración en lechos de arena, donde una velocidad de filtración adecuada permite la remoción de gran cantidad de los sólidos presentes en el agua (Anderson *et al.*, 2017). Existen dos tipos de galerías para captaciones de agua de mar:

- Galerías costeras: situadas bajo la zona litoral, el agua se empuja por medio de bombas para que descienda por la arena eliminando materia particulada por fuerzas de tensión y materia orgánica mediante procesos biológicos. La principal ventaja de este tipo de galerías es el movimiento de las olas que producen el arrastre de los sólidos más gruesos situados sobre el lecho.
- Galerías lejanas a la costa: al igual que las galerías costeras, este tipo de galerías generan un filtro donde el medio filtrante es el lecho marino. Tiene la desventaja de que, al estar lejos de la costa, necesita bombas que impulsen el agua hasta la planta desaladora.

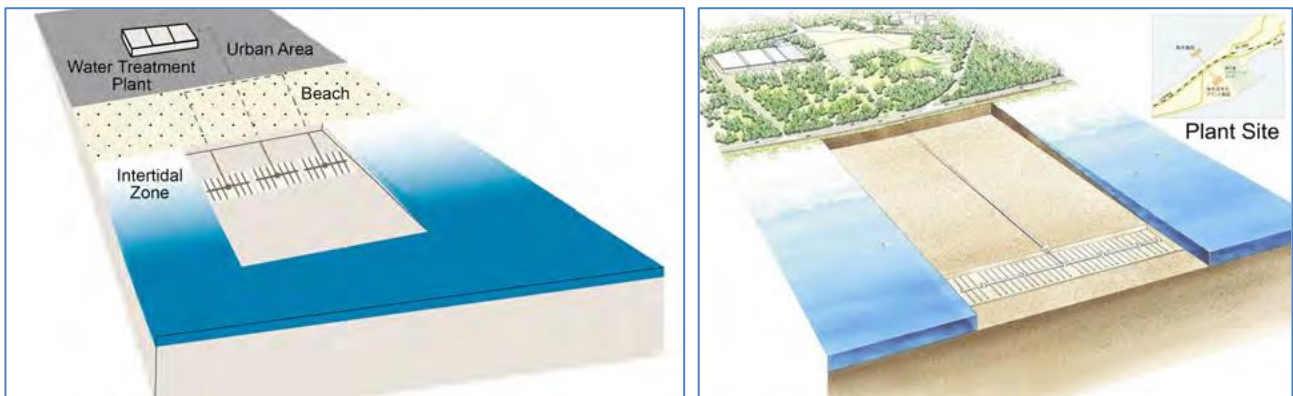


Figura 20. Galería bajo la playa (izquierda) y bajo el lecho marino (derecha). Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

Otros sistemas de captación subsuperficial: actualmente existen dos métodos híbridos para captación de agua subsuperficial (Anderson *et al.*, 2017):

- Túnel de agua: pozos verticales sin salida al exterior donde el agua captada se recoge en un tubo horizontal de diámetro 2 – 4 metros que finaliza en la entrada de la planta desaladora. La remoción de sólidos en suspensión, incluyendo materia orgánica, se asemeja a la eliminación de estos compuestos en los pozos verticales convencionales.
- Foso kárstico: construcción realizada alejada de la costa hacia el interior en la cual se hace pasar el agua por un lecho calizo cuyas paredes son de hormigón con orificios por los cuales sale el agua filtrada que se recoge y se impulsa hasta la planta desaladora.

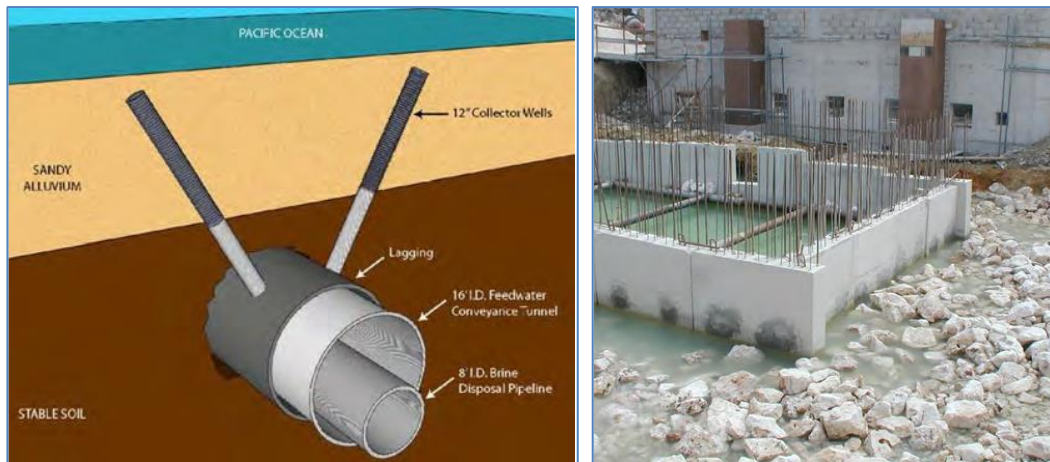


Figura 21. Túnel de agua (izquierda) y foso kárstico (derecha). Fuente: Anderson et al., 2017.

3.6.1.3. Comparación de tipos de captaciones

En la actualidad, las captaciones superficiales son las más utilizadas; sin embargo, las pantallas de este tipo de captaciones no reducen la concentración de materia orgánica proveniente de las mareas rojas puesto que la luz de paso es mayor al tamaño de los organismos fitoplanctónicos. Debido a esto, se hace necesario un pretratamiento extensivo, que aumenta los costes (Villacorte, 2014).

De acuerdo con Anderson *et al.*, 2017, la utilización de sistemas de captación subsuperficiales disminuye los costes operacionales entre un 5% y un 35%. Entre las razones por las cuales se produce esta disminución, se encuentran:

- Reducción de capital de inversión para sistemas de tratamiento.
- Reducción de los costes de investigación y prevención de mareas rojas.
- Reducción de los químicos utilizados (floculantes y biocidas).
- Eliminación de los costes derivados del mantenimiento de las captaciones superficiales, especialmente de la limpieza de las pantallas de entrada.

En las regiones donde la frecuencia de aparición de mareas rojas es alta, la mejor opción es la instalación de captaciones subsuperficiales que actúen como primer filtro (Villacorte, 2014). Sin embargo, estos sistemas no pueden instalarse en cualquier región ya que tienen que darse las condiciones hidrogeológicas, marinas y de infraestructuras adecuadas para su instalación (Anderson *et al.*, 2017; Villacorte, 2014).

Está ampliamente estudiado y demostrado que el agua de entrada recogida mediante captaciones subsuperficiales tiene una mejor calidad que el agua obtenida con captaciones superficiales. Rachman *et al.* (2014) realizaron un estudio en cuatro plantas desaladoras donde se obtuvo, para pozos verticales, una gran reducción de materia orgánica, consiguiéndose reducciones del 82,77% en Carbono Orgánico Total (TOC) y de 78,06% en Carbono Orgánico Disuelto (DOC).

El mismo estudio realizó un análisis de los pozos horizontales de una desaladora de Alicante y determinó que no se reducía el contenido de sólidos de la manera esperada. De esta manera se descubrió que la existencia de galerías kársticas hacía llegar directamente el agua al colector de entrada de la planta, sin pasar por el lecho filtrante.

Por otro lado, la tesis doctoral de Salinas – Rodríguez (2011) concluyó que la eliminación de materia orgánica en galerías, medida en forma de TOC, se reducía mientras que la turbidez no variaba. La reducción de biopolímeros era un 75% y de ácidos húmicos en un 19%.

3.6.2. Pretratamiento

Una línea de pretratamiento cuenta con procesos primarios (pantallas de filtración grosera con cloración seguida de procesos de coagulación – floculación y sistemas de flotación con aire disuelto (DAF)) y procesos secundarios (filtros granulares (GMF) y sistemas de filtración con membranas a baja presión que son la ultrafiltración (UF) y la microfiltración (MF)) (Villacorte, 2014).

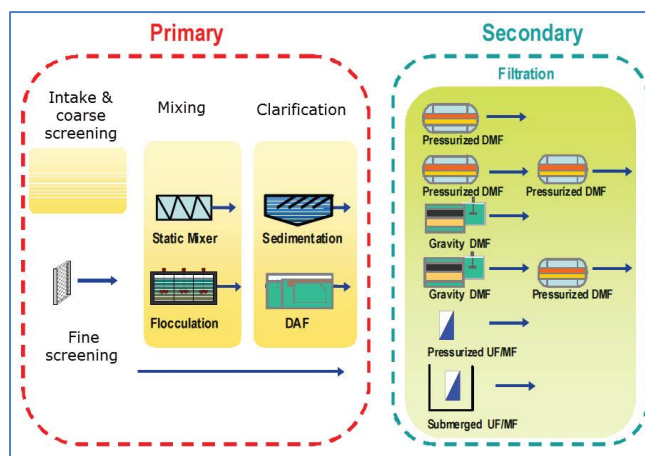


Figura 22. Alternativas de pretratamiento. Fuente: Abdulrahim *et al.*, 2017.

La configuración del pretratamiento dependerá de la salinidad y la materia orgánica presente en el agua bruta (Abdulrahim *et al.*, 2017). Las distintas técnicas que se explican a continuación tienen como objetivo final la remoción de sólidos en suspensión que pueden provocar la obstrucción de las membranas de RO y las toxinas que pueden producir el envenenamiento del agua producto.

3.6.2.1. Cloración – dechloración

Los biocidas se aplican en las tomas de agua bruta de aquellas plantas desaladoras que cuentan con instalaciones de captación abiertas y se sitúan en regiones donde la frecuencia de aparición de mareas rojas es alta (Abdulrahim *et al.*, 2017).

La cloración es el método más utilizado puesto que tiene un alto poder desinfectante, sin embargo, un gran problema es que estos compuestos también producen la degradación de las membranas de RO, UF y MF; por lo que es necesaria una dechloración (Abdulrahim *et al.*, 2017). Son tres los compuestos que se utilizan: cloro gas, hipoclorito cálcico e hipoclorito sódico; su adición en la toma de agua bruta puede ser continua o discontinua (Anderson *et al.*, 2017).

Un exceso de cloración puede provocar la lisis de las células liberando la AOM, que tiene tamaños menores y es más complicado de eliminar que las células completas (Abdulrahim *et al.*, 2017; Anderson *et al.*, 2017). También es muy importante tener en cuenta que la cantidad de cloro que produce lisis en las células depende del tipo de organismos y sus propiedades.

De esta manera, durante un evento de marea roja, la estrategia de operación sería eliminar la cloración o añadir una dosis muy pequeña (0,1 – 0,5 mg/l) de manera continua para que se favorezca la floculación de células y AOM, y decanten (Anderson *et al.*, 2017).

3.6.2.2. Floculación – coagulación

Los procesos de floculación – coagulación tienen como objetivo aumentar la eficacia de eliminación de materia orgánica fina en los procesos DAF, GMF y filtración con membranas a baja presión. El proceso consiste en la adición de un

coagulante de carga contraria a la materia suspendida para desestabilizarla químicamente favoreciendo la formación de agregados que sedimentan más fácilmente (Abdulrahim *et al.*, 2017; Anderson *et al.*, 2017).

Los coagulantes más utilizados son las sales ferrosas, especialmente cloruro y sulfato férricos, consiguiéndose reducciones de 80% en TEPs (Edzwald y Haarhoff, 2011). La dosis de coagulante depende de muchos factores como la tipología de los sólidos disueltos, las cargas de estos y factores físicos, de manera que la dosis tiene que ser evaluada en laboratorio mediante Jar-test (Anderson *et al.*, 2017).

3.6.2.3. Sistemas de flotación con aire disuelto (DAF)

Los sistemas de flotación con aire disuelto (DAF) se utilizan para la clarificación de los afluentes que han pasado previamente por una etapa de coagulación – floculación. El DAF consiste en la introducción de aire a presión en el afluente produciendo un gran número de burbujas, con tamaños comprendidos entre 10 y 100 μm , a las cuales se adhieren las partículas coaguladas ascendiendo hacia la superficie donde son retiradas con medios mecánicos (Anderson *et al.*, 2017; Petry *et al.*, 2006). Siempre tiene que haber exceso de aire, puesto que las burbujas libres son las que confieren la flotabilidad a la mezcla aire-sólidos (Anderson *et al.*, 2017).

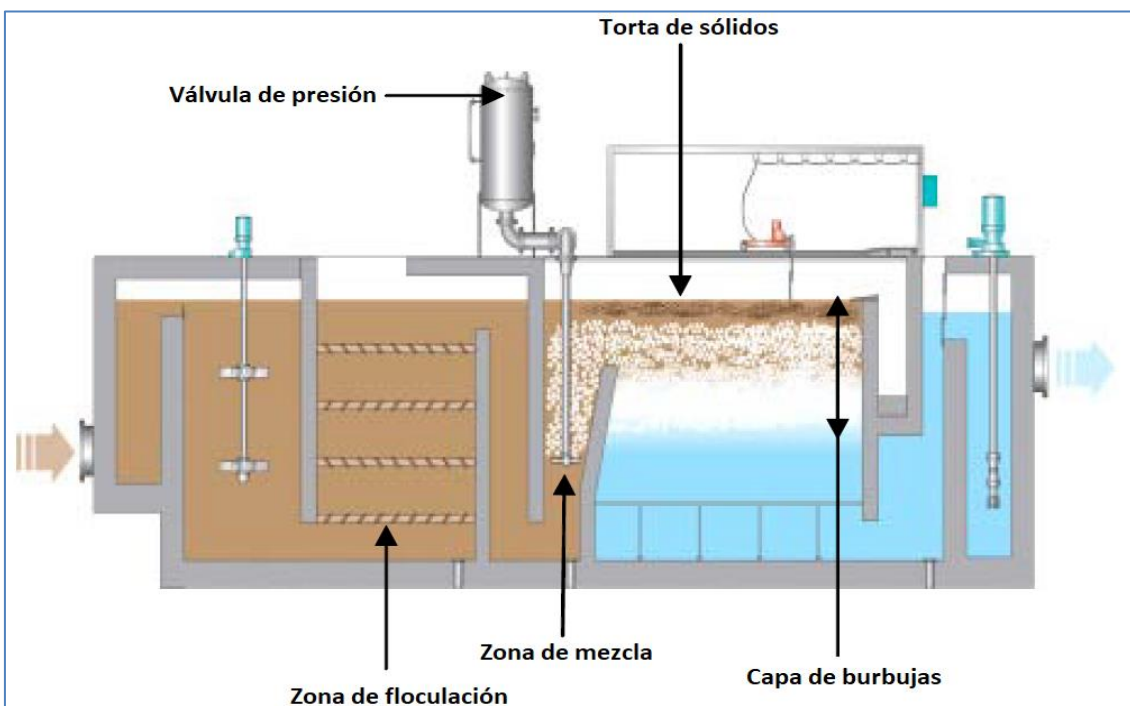


Figura 23. Esquema de un sistema DAF. Fuente: Petry *et al.*, 2006 (traducción propia).

La eficacia en la remoción de algas depende de la tipología de estas siendo las especies redondeadas y con diámetros menores a 5 μm junto con los organismos móviles las especies que tienen menores porcentajes de eliminación; sin embargo, la adición de pequeñas cantidades de químicos oxidante, inhiben la movilidad de los organismos (Henderson *et al.*, 2008).

En este proceso se alcanzan porcentajes de eliminación de alga cercanos al 90% (Abdulrahim *et al.*, 2017). Además de células completas, el agua contiene AOM libre; la adición de un coagulante ayuda a las burbujas a elevar los diferentes compuestos que forman la AOM, siendo de especial importancia la eliminación de TEPs y toxinas (Abdulrahim *et al.*, 2017; Shutova *et al.*, 2016).

3.6.2.4. Filtración con medios granulares (GMF)

Los filtros de medios granulares (GMF) son grandes tanques rellenos de diversos materiales filtrantes que deben ser permeables, insolubles en agua, no reactivos con el agua y duros (Abdulrahim *et al.*, 2017), siendo los más utilizados grava, arena, antracita y granate.

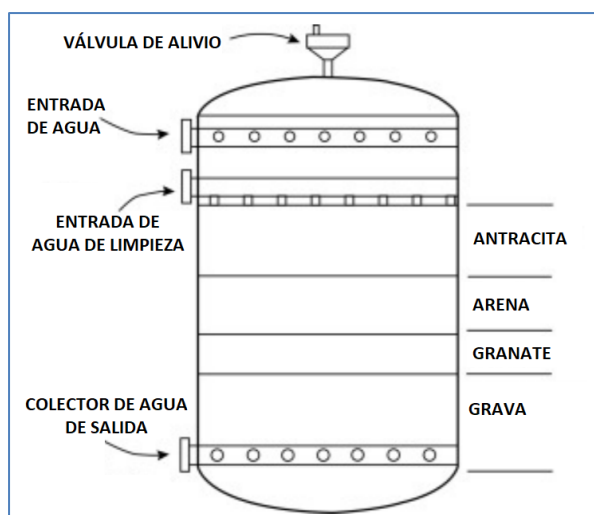


Figura 24. Filtración media granular (GMF) en filtro presurizado. Fuente: Singh, 2015.

El agua se introduce por la parte superior del filtro y desciende atravesando los diferentes materiales filtrantes. Existen dos tipos de filtros: a presión, donde el agua avanza a velocidades entre 14–20 m/h; y filtros de gravedad, donde la velocidad es 7–12 m/h; la remoción de partículas se produce por la unión de estas con los granos o por su captura en la torta de filtración (Anderson *et al.*, 2017; Singh, 2015).

La acumulación de las partículas coloidales presentes en el agua provoca la saturación del filtro provocando pérdidas de carga que se suplen con aumentos energéticos hasta que el aumento de presión es inviable y el lavado a contracorriente se hace imprescindible (Anderson *et al.*, 2017). Cuando aparecen eventos de mareas rojas, el tiempo que transcurre entre dos limpiezas se reduce drásticamente (Villacorte, 2014).

Otra ventaja de estos filtros es la eliminación de microorganismos ya que estos forman biopelículas alrededor de los granos y se alimentan de la AOM libre del agua. Cuando se produce un lavado en el filtro, la calidad del agua de salida empeora puesto que la AOM no queda retenida hasta que la biopelícula vuelve a formarse (Anderson *et al.*, 2017).

3.6.2.5. Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF)

La microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) son las denominadas tecnologías de membrana de baja presión. Estas tecnologías se basan en la eliminación de sólidos por superficie, es decir, las membranas tienen un tamaño de poro muy fino por lo que todos los sólidos superiores a ese tamaño son rechazados permaneciendo en el lado de la alimentación, formado el concentrado (Pearce, 2007).

La principal diferencia entre MF y UF es el tamaño de poro: para MF los poros toman tamaños de 0,1–0,4 μm , mientras que para UF, es de 0,001–0,02 μm (Abdulrahim *et al.*, 2017; Pearce, 2007). Previo a este tratamiento, se suelen instalar pantallas con microporos (50 – 500 μm) para la eliminación de partículas afiladas que puedan dañar las membranas (Anderson *et al.*, 2017).

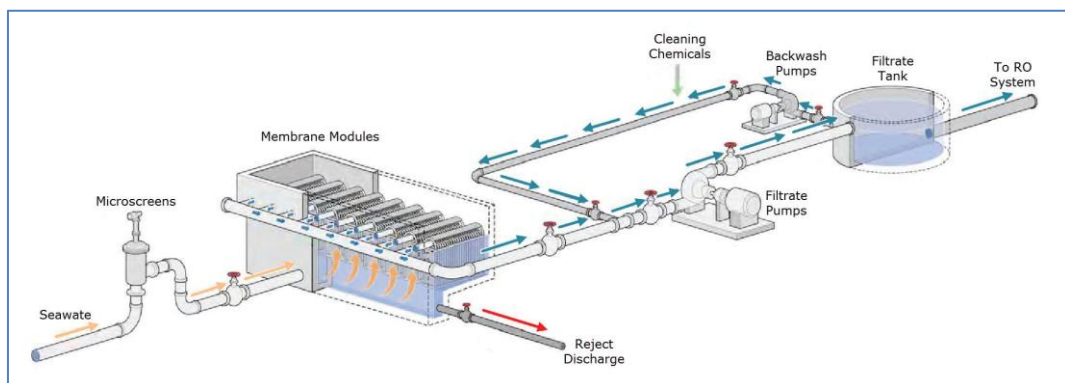


Figura 25. Esquema de un sistema UF/MF. Fuente: Abdulrahim *et al.*, 2017.

Durante la última década, la instalación de sistemas MF/UF se ha convertido en una alternativa más fiable que los filtros granulares debido a varios factores entre los que se encuentran una mayor eficacia en la remoción de sólidos, menor superficie (reducción de un 33%) y menor número de limpiezas químicas, todo lo cual produce una disminución en los costes operacionales (Abdulrahim *et al.*, 2017; Villacorte, 2014; Pearce, 2007). Sin embargo, los costes de inversión son superiores a los filtros granulares, llegando a incrementarse entre un 20 – 50% en función de las condiciones de operación (Pearce, 2007).

Durante los eventos de mareas rojas, las instalaciones MF/UF consiguen reducciones de células completas cercanas al 99%, siempre y cuando no existan roturas en la membrana; sin embargo, el estrés al que están sometidas las células provoca la emisión de AOM en cantidades incluso mayores que la emisión de AOM provocada por la lisis de la célula (Abdulrahim *et al.*, 2017; Anderson *et al.*, 2017).

La emisión de AOM por estrés evita adicionando un coagulante en línea que estabilice las células; no obstante, la adición de coagulante en exceso puede provocar la obstrucción de los poros de las membranas debido al tamaño de los iones (Abdulrahim *et al.*, 2017; Anderson *et al.*, 2017; Villacorte, 2014).

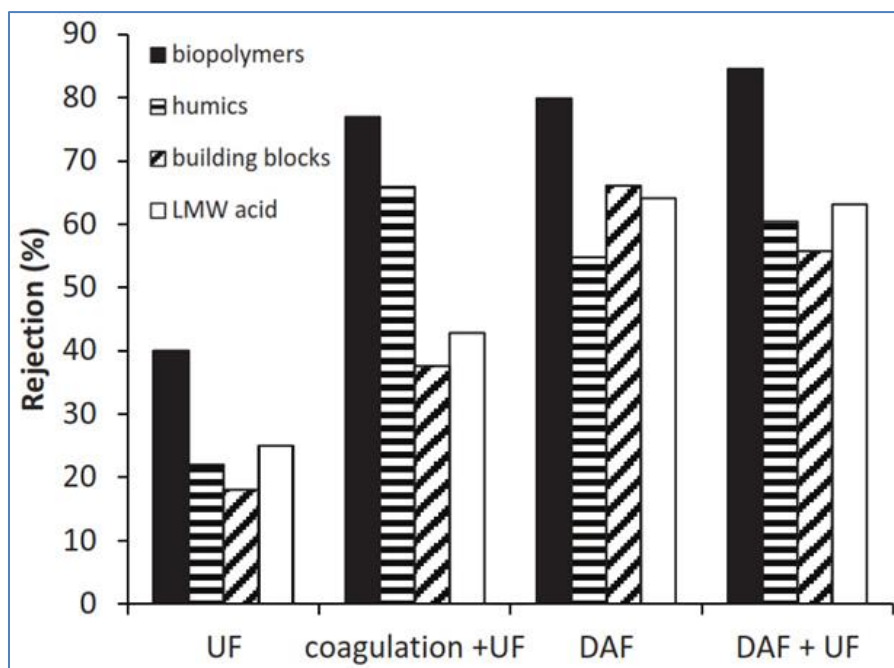


Figura 26. Rechazo de la AOM con sistemas UF, coagulación y DAF. Fuente: Abdulrahim *et al.*, 2017.

El principal problema de estos sistemas radica en esta AOM. En numerosos estudios se ha detectado que estas membranas permiten el paso de materia orgánica disuelta ya que las membranas no permiten la creación de biopelículas que eliminan estos compuestos como sucede en los filtros granulares (Villacorte, *et al.*, 2014). La solución a este problema sería añadir un medio que actúe como soporte para la creación de biopelículas.

3.6.2.6. Filtros de cartucho

El último sistema previo a la ósmosis inversa son los filtros de cartucho. Anderson *et al.* (2017) describe los cartuchos como microfiltros, con poros de 1 a 25 μm , donde quedan retenidos, principalmente, arena e iones de hierro que han sobrepasado los anteriores tratamientos. Estos filtros actúan bajo presión y son una confirmación de la efectividad de la línea de pretratamiento ya que los valores de SDI tienen que ser prácticamente iguales en la entrada y la salida.

Durante los eventos de mareas rojas, estos cartuchos sufren un gran ensuciamiento debido a la AOM. En los últimos años, se está desarrollando un sistema de filtración con cartuchos añadiendo el proceso de electro-adsorción para la generación de cargas positivas que consigan la eliminación de TEPs (Anderson *et al.*, 2017).



Figura 27. Cartuchos instalados en un filtro horizontal (izquierda); ensuciamiento de un cartucho durante un evento severo de marea roja (derecha). Fuente: Anderson *et al.*, 2017.

4. CONCLUSIONES

Las plantas desaladoras abastecen a una gran parte de la población mundial por lo que deben pararse lo menos posible. Los eventos de mareas rojas producen impactos graves en las plantas desaladoras cuando estas no están preparadas, por lo que un control y monitorización del entorno marino de cara a anticiparse a estos eventos, se hace imprescindible.

Sin embargo, debido al alto coste de los sistemas de monitorización debido, en gran parte, a la complejidad de los eventos de mareas rojas por su gran variabilidad espacio – temporal, los operadores tienden a controlar únicamente la calidad de las aguas que rodean las plantas desaladoras.

Las actuaciones que se pueden llevar a cabo directamente en las plantas desaladoras se hacen sobre la captación de agua y sobre la línea de pretratamiento.

- Con el presente estudio se concluye que los métodos de captación subsuperficial son mucho mejores puesto que la calidad de agua de entrada es superior debido a su actuación como filtro. Sin embargo, este tipo de sistemas no pueden instalarse en cualquier región, sino que dependen de la hidrogeología de la zona, las condiciones marinas y las infraestructuras existentes.
- Respecto al pretratamiento, se conviene que, para zonas donde los eventos de mareas rojas tienen una alta frecuencia, una combinación de sistemas de coagulación – floculación, filtración con aire disuelto (DAF), filtración granular y filtración con membranas MF/UF sería el tratamiento más adecuado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abdulrahim, H.K., Al-Rasheed, A.M., Hassan, A.S., Mabrouk, A.A., Shomar, B., Darwish, M.A., 2017. Reverse osmosis desalination system and algal blooms Part III: SWRO pre-treatment. *Desalination and Water Treatment*, pp. 1-28.
- Anderson D. M., S. F. E. Boerlage, M. B. Dixon (Eds), Harmful Algal Blooms (HABs) and Desalination: A Guide to Impacts, Monitoring and Management. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 2017. 539 pp. (IOC Manuals and Guides No.78.) (English) (IOC/2017/MG/78)
- Anderson D.M. y Keafer, B.A., 1985. Dinoflagellate cyst dynamics in coastal and estuarine waters. *Toxic dinoflagellates*, pp. 219-224.
- Boerlage, S. y Nada, N., 2015. Algal toxin removal in seawater desalination processes. *Desalination and Water Treatment*, pp 2575-2593
- Dale, B, Edwards, M., Reid, P., 2006, Climate Change and Harmful Algal Blooms. *Ecology of Harmful Algae*, pp. 367-378.
- Dehwah, A.H.A. y Missimer, T.M., 2016. Subsurface intake systems: Green choice for improving feed water quality at SWRO plants, Jeddah, Saudi Arabia. *Desalination* 88, pp. 216-224.
- Du, X., Shao, F., Wu, S., Sun, R., Wang, C., 2017. Complex network modelling for mechanisms of red tide occurrence: A case study in Bohai Sea and North Yellow Sea of China. *Ecological Modelling* 361, pp. 41-48.
- Edzwald, J.K., y Haarhoff, J., 2011. Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation. *Water research* 45, pp. 5428-5440.
- Eppley, R.W., Coatsworth, J.L., 1968. Uptake of nitrate and nitrite by *Ditylum brightwellii* – kinetics and mechanisms. *Journal of Phycology* 4, pp. 151-156.
- Franks P. J. S., 1997 Spatial patterns in dense algal blooms. *Limnol Oceanogr* 42, pp. 1297-1305.
- Gobler, C.J., Doherty, O., Hattehrath – Lehmann, T., Davis, T., Griffith, A., Kang, Y., 2018. The role of decadal surface water warming in the intensification of marine and freshwater harmful algal blooms. *18th International Conference on Harmful Algae “From ecosystems to socio – ecosystems”, France.*
- Gómez, F., 2012. A checklist and classification of living dinoflagellates (*Dinoflagellata alveolate*). *CICIMAR Océanides* 27, pp. 65-140.
- Guastalli, A. R., Simon, F. X., Penru, Y., de Kerchove, A., Llorens, J., Baig, S., 2013. *Desalination* 322, pp. 144-150.
- Hasle, G.R., 1950. Phototactic vertical migration in marine dinoflagellates. *Oikos* 2, pp. 162-175.
- Henderson, R. K., Parsons, S. A., Jefferson, B. 2008. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae. *Water Research* 42, pp. 1827-1845.
- Hudnell, H.K. (Ed), Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs.

- New York, Springer-Verlag, 2008. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 619.
- Hudnell, H. K., Jones, C., Labisi, B., Lucero, V., Hill, D. R., Eilers, J. 2010. Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPC). *Harmful Algae* 9, pp. 208–217.
- Jeong, H.J., Yoo, Y.D., Kim, J.S., Seong, K.A., Kang, N.S., Kim, T.H., 2010. Growth feeding and ecological roles of the mixotrophic and heterotrophic dinoflagellates in marine planktonic food webs. *Ocean Science Journal* 45, pp. 65-91.
- Jeong, H.J., Lim, A.S., Franks, P.J.S., Lee, K.H., Kim, J.H., Kang, N.S., Lee, M.J., Jang, S.H., Lee, S.Y., Yoo, E.Y., Park, J.Y., Yoo, Y.D., Seong, K.A., Kwon, J.E., Jang, T.Y. 2015, A hierarchy of conceptual models of red tide generation: Nutrition, behaviour and biological interactions. *Harmful Algae* 47, pp. 97-115.
- Kim, S. y Yoon, J., 2005. Optimization of microfiltration for seawater suffering from red-tide contamination. *Desalination* 182, pp. 315-321.
- Kim, Y., Byun, Y., Kim, Y., Eo, Y., 2009. Detection of *Cochlodinium polykrikoides* red tide based on two-stage filtering using MODIS data. *Desalination* 249, pp. 1171-1179.
- Laguado, J., 2007. Aplicaciones de la citometría de flujo en microbiología, veterinaria y agricultura. *Revista MVZ Córdoba* 12(2), pp. 1077 – 1095.
- Lassus P.; Chomérat, N.; Hess, P.; Nézan, E. 2016. Toxic and Harmful Micro algae of the World Ocean / Micro algues toxiques et nuisibles de l'océan mondial. Denmark, International Society for the Study of Harmful Algae / Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. IOC Manuals and Guides, 68. (Bilingual English/French).
- Loganathan K., Sathhasivam, J., Sarp, S., 2018. Removal of microalgae from seawater using chitosan-alum/ferric chloride dual coagulations. *Desalination* 433, pp. 25-32.
- Loureiro, J., 2009. Aplicación de la citometría de flujo en el estudio del genoma vegetal. *Revista Ecosistemas* 18(2); pp. 103-108
- Lürling, M. y Faassen, E.J., 2012. Controlling toxic cyanobacteria: Effects of dredging and phosphorus-binding clay on cyanobacteria and microcystins. *Water Research* 46, pp. 1447–1459.
- Lürling, M., Waajen, G., de Senerpont Domis, L. N., 2016. Evaluation of several end-of-pipe measures proposed to control cyanobacteria. *Aquatic Ecology* 50, pp. 499-519.
- Martínez, R., Guzmán, L., Calderón, M. J., Cáceres, J., Labra, G., Iriarte, L., Muñoz, V., Alarcón, C., Pacheco, H., 2018. Large – scale climatic patterns and relationship with Harmful Algal Blooms (HABs) in fjords and canals of Southern Chile. *18th International Conference on Harmful Algae “From ecosystems to socio – ecosystems”*, France.
- Owen, K.C., 2016. The Beneficial Reuse of Hypersaline Wastewater from Desalination Plants to Treat Harmful Algal Blooms. *Fisheries and Aquaculture Journal* 7.
- Pan, G., Dai, L., Li, L., Linchen, H., Li, H., Bi L., Gulati, R.D., 2012. Reducing the Recruitment of

- Sedimented Algae and Nutrient Release into the Overlying Water Using Modified Soil/Sand Flocculation-Capping in Eutrophic Lakes. *Environmental Science and Technology* 46, pp. 5077-5084.
- Paul, R. y Genescà, E., 2013. The use of enzymatic techniques in the finishing of technical textiles. *Woodhead Publishing Series in Textiles*, pp. 177-198.
- Pearce, G.K., 2007. The case for UF/MF pretreatment to RO in seawater applications. *Desalination* 203, pp. 286-295.
- Petry, M., Sanz, M.A., Langlais, C., Bonnelye, V., Duran, J.P., Guevara, D., Mantovani-Nardes, W., Saemi, C.H., 2006. The El Coloso (Chile) reverse osmosis plant. *Desalination* 203, 141-152.
- Proença, L. A. O. y Hallegraeff, G. (eds). Marine and Fresh-Water Harmful Algae. Proceedings of the 17th International Conference on Harmful Algae. International Society for the Study of Harmful Algae, 2017.
- Rachman, M.R., Li, S., Missimer, T.M., 2014. SWRO feed water quality improvement using subsurface intakes in Oman, Spain, Turks and Caicos Islands, and Saudi Arabia. *Desalination* 351, pp. 88-100.
- Rajindar S., 2015. Granular media filtration. *Membrane Technology and Engineering for Water Purification (Second Edition)*.
- Ramsay, H., Simon, D., Steele, E., Hebert A., Oleschuk, R.D., Stamplecoskie, K.G., 2018. The power of fluorescence excitation–emission matrix (EEM) spectroscopy in the identification and characterization of complex mixtures of fluorescent silver clusters. *RSC Advances* 2018, 8, pp. 42080-42086.
- Reguera, B., Alonso, R., Moreira, A., Méndez, S. 2011. Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas. *COI de la UNESCO y OIEA, París y Viena 2011. Manuales y Guías de la COI*, 59.
- Salinas - Rodríguez, S.G., (2011). Particulate and organic matter fouling of seawater reverse osmosis systems: characterization, modelling, and applications (tesis doctoral). Universidad Técnica de Delft, Alemania.
- Salinas – Rodríguez S. G., Sithole, N., Dhakal, N., Olive, M., Schippers, J. C., Kennedy, M. D., 2019. Monitoring particulate fouling of the North Sea with SDI and new ASTM MFI_{0.45} test. *Desalination* 454, pp. 10-19.
- Schippers, J. C., y Verdouw, J., 1980. The Modified Fouling Index, a method of determining the fouling characteristics of water. *Desalination* 32, pp. 137-148.
- Sellner, K.G., Doucette, G.J., Kirkpatrick, G.J. 2003, Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 30, pp. 383-406.
- Shanmugam, P. (2011), A new bio-optical algorithm for the remote sensing of algal blooms in complex ocean waters, *Journal of Geophysical Research*, 116, C04016.
- Shutova, Y., Karna, B., Hambly, A. C., Lau, B., Henderson, R. K., Le-Clech, P., 2016. Enhancing

- organic matter removal in desalination pretreatment systems by application of dissolved air flotation. *Desalination* 318, pp. 12-21.
- Siano, R., Mondeguer, F., Latimier, M., Quéré, J., Sibat, M., Le Gac, M., Hess, P., 2018. Dinoflagellate adaptation to coastal ecosystem variations revealed through metabolomic analyses of revived strains. *18th International Conference on Harmful Algae "From ecosystems to socio – ecosystems"*, France.
- Vardon, D. R., Clark, M. M., Ladner, D. A., 2011. *Desalination* 277, pp. 193-200.
- Villacorte, L. O. (2014). Algal blooms and membrane-based desalination technology (tesis doctoral). Universidad Técnica de Delft, Alemania.
- Villacorte, L.O., Tabatabai, A., Sousi, M., Abusaban, A., Schurer, R., Amy, G., Schippers, J.C., Kennedy, M.D., 2014. *Harmful Algal Blooms and Desalination Conference, 16-17 April, Muscat, Oman*.
- Virgili, F. 2015. GWI Q4 desalination market review and forecast points to some improvement in contracted capacity. pp. 12, 13: *IDA News Nov./Dec. 2015*. International Desalination Association.
- Wang, Y., Tng, K.H., Wu, H., Leslie, G.; Waite, T.D., 2014. 'Removal of phosphorus from wastewater using a ferrous salt – a pilot scale MBR study'. *Water Research*, vol. 57, pp. 140–150.
- Xiao, X., Huang, H., Ge, Z., Rounge, T. B., Shi, J., Xu, X., Li, R., Chen, Y., 2013. A pair of chiral flavonolignans as novel anti-cyanobacterial allelochemicals derived from barley straw (*Hordeum vulgare*): Characterization and comparison of their anti-cyanobacterial activities. *Environmental Microbiology*, pp.1238-1251.
- Zhao, J., Ghedira, H., 2014. Monitoring red tide with satellite imagery and numerical models: A case study in the Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* 79, pp. 305-313.

6. ANEXOS

6.1. ANEXO I. Toxinas: enfermedades, productores y zonas afectadas.

Tabla 1. Toxinas: enfermedades, productores y zonas afectadas. Fuente: traducido de Villacorte, 2014.

Enfermedad	Toxina	Microalga productora	Zonas afectadas
Intoxicación paralizante por moluscos (PSP)	Saxitoxina Gonyautoxina	<i>Alexandrium spp.</i> <i>Gymnodinium spp.</i> <i>Pyrodinium spp.</i>	Costa Oeste EE. UU., Alaska, Canadá, Chile, Europa, Sudáfrica, Asia, Australia, Nueva Zelanda.
Intoxicación neurológica por moluscos (NSP)	Brevetoxinas	<i>Karenia brevis</i> <i>Karenia brevisulcatum</i> <i>Chatonella spp.</i> <i>Fibrocapsa japónica</i> <i>Heterosigma akashiwo</i>	Golfo de México, Nueva Zelanda, Japón, Australia
Intoxicación diarreica por moluscos (DSP)	Ácido okadaico	<i>Dinophysis spp.</i> <i>Prorocentrum lima</i>	Europa, Japón, costa atlántica de Canadá, Sudáfrica, Chile, Tailandia, Nueva Zelanda, Australia
Intoxicación amnésica por moluscos (ASP)	Ácido domoico	<i>Pseudo-nitzchia spp.</i>	Costa Oeste EE. UU., costa atlántica de Candá, Alaska, Chile, Australia, Nueva Zelanda, Reino Unido
Intoxicación por moluscos con azaspirácidos (AZP)	Azaspirácidos	<i>Protoperdinium crassipes</i>	Inglaterra, Escocia, Irlanda, Francia, España, Noruega, Marruecos
Intoxicación por ciguatera de peces (CFP)	Ciguatoxina Maitotoxina	<i>Gambieridiscus toxicus</i>	Hawái, Golfo de México, Puerto Rico, Mar Caribe, Australia, Islas del Pacífico

6.2. ANEXO II: Microalgas formadoras de mareas rojas.

En el presenta anexo se enumeran las especies más comunes formadoras de mareas rojas, así como la concentración de células que se puede llegar a alcanzar y los efectos adversos que producen en el entorno donde viven. La t se ha obtenido de la tesis doctoral de Loreen Ople Villacorte, 2014.

Tabla 2. Características de los grupos de microalgas que forman mayoritariamente las mareas rojas. Fuente: traducido de Villacorte, 2014.

Microalgas	Concentración en marea roja (célula/ml)	Efectos adversos
Dinoflagelados		
<i>Alexandrium tamarense</i>	10.000	Mareas rojas; toxinas; hipoxia
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	48.000	Mareas rojas; toxinas; hipoxia
<i>Karenia brevis</i>	37.000	Mareas rojas; toxinas; hipoxia
<i>Noctiluca scintillans</i>	1.900	Mareas rojas/rosas/verdes; hipoxia
<i>Prorocentrum micans</i>	50.000	Mareas rojas/marrones; hipoxia
Diatomeas		
<i>Chaetoceros affinis</i>	900.000	Hipoxia; irritación branquias
<i>Pseudo-nitzschia spp.</i>	19.000	Afloramientos tóxicos, hipoxia
<i>Skeletonema costatum</i>	88.000	Hipoxia
<i>Thalassiosira spp.</i>	100.000	Hipoxia
Cianobacterias		
<i>Anabaena spp.</i>	10.000.000	Afloramientos tóxicos, hipoxia
<i>Microcystis spp.</i>	14.800.000	Afloramientos tóxicos, hipoxia
<i>Nodularia spp.</i>	605.200	Afloramientos tóxicos, hipoxia
Haptofitas		
<i>Emiliania huxleyi</i>	115.000	Hipoxia
<i>Phaeocystis spp.</i>	52.000	Niebla marina, hypoxia
Rapidofitas		
<i>Chattonella spp.</i>	10.000	Mareas rojas; toxinas; hipoxia
<i>Heterosigma akashiwo</i>	32.000	Mareas rojas; toxinas; hipoxia
Clorofitas		
<i>Chlorella vulgaris</i>	145.000	Mareas verdes, hipoxia.
<i>Scenedesmus spp.</i>	820.000	Mareas verdes, hipoxia.

6.3. Configuración de pretratamientos en función de la calidad de agua bruta

En la siguiente tabla se muestra la línea de pretratamiento más adecuada en función de la calidad del agua de entrada, tal y como se recoge en la publicación de Anderson *et al*, 2017.

Tabla 3. Pretratamientos más eficaces en función de la calidad de agua bruta.

Tipo de captación	Calidad del agua	Configuración de pretratamiento	Comentarios
Pozo costero	Turbidez < 0,2 NTU TSS < 2 mg/l SDI ₁₅ < 1	Filtración cartuchos	Agua salobre: necesidad de acidificación e inhibición
Pozo costero	Turbidez > 0,2 NTU TSS > 2 mg/l SDI ₁₅ > 1	Filtración arena Filtración cartuchos	Agua salobre: necesidad de acidificación e inhibición
Captación abierta	Turbidez < 5 NTU TSS < 5 mg/l SDI ₁₅ < 2	Acidificación Coagulación – floculación GMF una etapa	Posibilidad de concentraciones > 20 NTU algunos días
Captación abierta	Turbidez < 5 NTU TSS < 5 mg/l SDI ₁₅ < 2	Filtración de membrana	Posibilidad de concentraciones > 20 NTU algunos días
Captación abierta	Turbidez 5-20 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	Acidificación Coagulación – floculación GMF dos etapas	Posibilidad de concentraciones > 30 NTU algunos días
Captación abierta	Turbidez 5-20 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	Acidificación Coagulación – floculación Filtración de membrana	Posibilidad de concentraciones > 20 NTU algunos días
Captación abierta	Turbidez > 20-30 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	Clarificación Coagulación – floculación GMF una etapa	Sólidos en suspensión: mayoritariamente inorgánicos
Captación abierta	Turbidez > 20-30 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	Acidificación Coagulación – floculación Filtración de membrana	Sólidos en suspensión: mayoritariamente inorgánicos
Captación abierta	Turbidez > 20-30 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	DAF Coagulación – floculación GMF una etapa	Sólidos en suspensión: mayoritariamente orgánico (algas)
Captación abierta	Turbidez > 20-30 NTU TSS > 5 mg/l SDI ₁₅ > 2	DAF Coagulación – floculación Filtración de membrana	Sólidos en suspensión: mayoritariamente orgánico (algas)