

Ponce-Vélez, G., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M.R., Marcovecchio, J., Lizárraga-Partida, M.L., Vázquez-Botello, A., Arias, A., Horta-Puga, G., Briones-Venegas, A., Rendón-Lugo, A.N. 2023. Acciones de prevención y reducción de la contaminación marina. p. 29-58. En; Rivera-Arriaga E., Azuz-Adeth, I. (eds). La Década del Océano en México 2021-2030: La Ciencia que Necesitamos. ricomar, Universidad Autónoma de Campeche. 472 p. ISBN 978-607-8907-12-0. doi 10.26359/EPOMEX01202301

La Década del Océano en México 2021-2030:
La Ciencia que Necesitamos

1

Acciones de prevención y reducción de la contaminación marina

*G. Ponce-Vélez, F. Lango-Reynoso, M.R. Castañeda-Chávez,
J. Marcovecchio, M.L. Lizárraga-Partida, A. Vázquez-Botello,
A. Arias, G. Horta-Puga, A. Briones-Venegas, A.N. Rendón-Lugo*

Resumen

En el milenio, el acelerado e impresionante desarrollo tecnológico aunado al incremento descontrolado de la población humana así como la presión de los grandes problemas planetarios principalmente, el cambio climático y las pandemias como la COVID-19, han contribuido al deterioro de los ecosistemas costeros y marinos de forma abrumadora dando como resultado que se continúe con el impacto ambiental y sobre la salud humana sin una estrategia internacional articulada encaminada a mitigar y resolver los problemas de contaminación marina locales, regionales y mundiales. En este capítulo se aborda este escenario, integrando de forma resumida los aspectos más importantes como son, el efecto de las descargas fluviales continentales sobre la costa y el océano debido a que representan uno de los principales mecanismos de transporte de residuos antrópicos. Dentro de estos residuos contaminantes, desde hace varias décadas los de mayor número de estudios, han sido los microorganismos patógenos, particularmente aquellos metabolismos microbianos capaces de degradar sustancias relacionadas con el petróleo. De igual manera, la investigación sobre la contaminación asociada a derrames de petróleo, la presencia de metales y metaloides

como elementos potencialmente tóxicos; en orden cronológico están los plaguicidas debido al incremento exponencial de su uso asociado directamente a la producción masiva de alimentos. En los últimos años ha cobrado interés en el mundo científico ambiental el tema de la basura, preponderantemente los plásticos así como otros contaminantes emergentes derivados en cantidades apabullantes por las sociedades modernas como son productos de higiene personal y fármacos. Este abordaje se hace en tres niveles, internacional, regional y nacional, mediante la inclusión de estrategias mundiales y locales para brindar elementos retrospectivos y actuales de la situación general de costas y mares mexicanos, de la participación de nuestro país en los compromisos internacionales, de la existencia y funcionalidad de programas nacionales encaminados a tener diagnósticos actualizados y apegados a la realidad. Finalmente se contribuye con la inclusión de una serie de acciones vinculadas hacia la vigilancia, prevención y reducción de contaminantes de alto riesgo en el medio marino.

Palabras clave: Contaminación marina, petróleo y metales, contaminantes emergentes.

Abstract

In the millennium, the rapid and impressive technological development coupled with the uncontrolled growth of the human population and the pressure of major global problems, notably climate change and pandemics such as COVID-19, have contributed overwhelmingly to the deterioration of coastal and marine ecosystems, resulting in continued environmental and human health impacts without an international strategy to mitigate and solve local, regional, and global marine pollution problems. This chapter deals with this scenario, summarizing the most important aspects, such as the effect of continental river discharges on the coast and the ocean because they represent one of the main transport mechanisms of anthropogenic waste. Among these polluting wastes, for several decades the most studies have been carried out, pathogenic microorganisms, particularly micro metabolisms. Similarly, research into pollution associated with oil spills, the presence of metals and metalloids as potentially toxic elements; in chronological order there are pesticides due to the exponential increase in their use directly associated with the mass production of food. In recent years there has been a growing interest in environmental science. waste, mainly plastics as well as other emerging pollutants derived in overwhelming quantities by modern societies such as personal hygiene products and pharmaceuticals. This approach is being taken at three levels: international, regional, and national, through the inclusion of global and local strategies to provide retrospective and current information on the general situation of Mexico's coasts and seas, our country's participation in international commitments and the existence and functionality of national programmes aimed at providing up-to-date and realistic assessments. Finally, it contributes to the inclusion of a series of actions linked to the monitoring, prevention, and reduction of high-risk pollutants in the marine environment.

Keywords: Marine pollution, oil, metals, pesticides, emerging pollutants.

Introducción

La diversidad de contaminantes introducidos en las costas y en los mares mexicanos, es extensa y dificulta el diagnóstico adecuado de la calidad ambiental de estos ecosistemas de alta relevancia para nuestro país y para el planeta dada su participación en la regulación del clima, en la producción de alimento, en el reciclaje de carbono, así como en actividades culturales, de esparcimiento y sobre todo económicas. Constituye todo un reto definir y priorizar los grupos de agentes contaminantes que deben formar parte de programas de vigilancia nacionales en concordancia con los acuerdos internacionales referentes a la regulación y en su caso eliminación de estos agentes antrópicos y también acorde a situaciones o problemáticas locales mexicanas que requieran atención y manejo a corto plazo por el riesgo que representan para los recursos naturales costeros y marinos y para las poblaciones humanas vulnerables que interactúan y dependen de ellos.

De esta complejidad de contaminantes, se debe continuar incluyendo el estudio de la incidencia de las cuencas sobre la zona costera y marina como uno de los principales mecanismos de transporte e ingreso de los desechos generados en continente; también, el registro de microorganismos patógenos ya que continúa siendo una de las principales causas de morbilidad y mortalidad infantil así como de impacto económico sobre las exportaciones de recursos pesqueros.

Además, para México como país productor de petróleo, se requiere de la vigilancia ambiental del impacto de los derrames petroleros tanto los de gran magnitud como los crónicos. De igual manera registrar la presencia de metales y metaloides tóxicos

relacionados con actividades industriales extractivas y manufactureras, muchas de ellas sin regulación, así como elementos potencialmente peligrosos provenientes de la sobreexplotación de los acuíferos. Además, es relevante y necesario continuar evaluando a los plaguicidas en el medio marino ya que es un gran componente tóxico que sigue en aumento ante la alta demanda de producción de alimentos y la falta de programas que apoyen alternativas mucho menos peligrosas.

Finalmente se debe incorporar a los contaminantes emergentes en los estudios ambientales ya que este enorme grupo de sustancias son el resultado de la modernidad de la sociedad humana provocando el uso indiscriminado de una gama amplia de compuestos que alteran el funcionamiento hormonal natural, no solo humano sino de una lista cada vez mayor de organismos, siendo los peces uno de los grupos con mayor registro de afectaciones.

De esta forma, el presente capítulo aborda de forma sucinta la visión internacional, nacional y local de estos grupos de contaminantes que han sido estudiados desde hace varias décadas por los autores de este documento, especialistas en estos tópicos con una amplia experiencia en sus campos de investigación y con reconocimiento a nivel nacional e internacional de su trabajo realizado, por lo que la visión aportada en este capítulo sobre los aspectos y acciones recomendadas para lograr un mejor estado de salud de los océanos, en el escenario conjunto de construir el futuro que todos deseamos, conlleva sustento y conocimiento profundo de este tema toral para México y el planeta.

Los ríos, contribuyentes de contaminantes hacia las costas y mares

Los ríos son una importante fuente de contaminación de los ecosistemas marinos debido a que funcionan como medio de transporte de numerosas sustancias residuales antrópicas originadas de las diversas aportaciones o descargan de las actividades humanas tanto productivas como domésticas. De acuerdo con la CEPAL (2002), el 90 % de los contaminantes del mar son introducidos a través de los ríos, y son usados como receptores de cientos de desechos producidos en el medio terrestre por fuentes puntuales y difusas que liberan nutrientes, plaguicidas, metales, fármacos, productos de uso doméstico, entre otros, mezclando sustancias de origen industrial, agrícola y urbano. Por esta razón, los ríos como fuente de contaminación marina necesitan ser considerados con urgencia en las agendas ambientales a nivel mundial.

La descarga de nutrientes sobre los sistemas marinos costeros es claramente reconocida como uno de los principales impactos antrópicos sobre ese tipo de ambientes (Macías *et al.*, 2017; Lemley *et al.*, 2019). El origen biogeoquímico de los nutrientes inorgánicos básicamente de nitrógeno y fósforo en los sistemas acuáticos puede ser de tipo natural o antrópico. Los procesos naturales que los generan son fundamentalmente la mineralización de la materia orgánica producida en la fotosíntesis (Cory y Kling, 2018) y la degradación de los organismos que mueren en cada ambiente (Christie-Oleza *et al.*, 2017; Middelburg, 2018). Por su parte, los principales procesos antrópicos que liberan estos compuestos hacia los sistemas acuáticos son el drenaje continental que transporta los residuos de la agricultura y la ganadería,

movimiento de suelos, deforestación, entre otros (Van Cappellen y Maavara, 2016; Castañeda-Chávez y Lango-Reynoso, 2021), descargas de efluentes domésticos e industriales, disposición inadecuada de residuos sólidos urbanos, contaminación atmosférica y actividad forestal (Williams *et al.*, 2016). Una de las condiciones que pueden ocurrir como consecuencia de las descargas a gran escala de nutrientes en ambientes acuáticos y con circulación limitada es la eutrofización (Le Moal *et al.*, 2019), que puede generar consecuencias ambientales graves. La eutrofización es un proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas (van Beusekom, 2018). Se han registrado numerosos eventos de eutrofización en distintos ambientes del mundo, cada uno de ellos con diferentes intensidades, características y consecuencias. Por ejemplo, se puede mencionar los registrados en China (Zhao *et al.*, 2019); en el lago Baikal, Siberia (Panizzo *et al.*, 2018); en lagunas de Florida, EUA (Lapointe *et al.*, 2015); en sistemas acuáticos de Sud África (Matthews y Bernard, 2015); en el río Jaguaribe, noreste de Brasil (da Silva *et al.*, 2017); o, en la zona norte de la costa del Río de La Plata, en Argentina (Brugnoli *et al.*, 2021).

Esta situación obliga a la búsqueda de soluciones en todo el mundo, para lo cual se han realizado diferentes estudios en numerosos países y/o regiones que ayuden a interpretar estos procesos deletéreos, y así

buscar soluciones duraderas que minimicen sus impactos. Un fenómeno claramente identificado es que el mayor desarrollo y los cambios en los patrones de uso de la tierra en la zona costera han aumentado la carga de nutrientes provenientes de fuentes difusas o no puntuales. Además, en áreas sujetas a escorrentía y erosión del suelo la mayor parte de la carga de nutrientes se transporta mediante partículas, y en tales casos, las cargas de nutrientes que se descargan de las tierras de cultivo son típicamente de un orden de magnitud mayor que las que se descargan de las áreas boscosas vírgenes. La exportación de nutrientes de las tierras de pastoreo ya sea que estén fertilizadas o no, también es significativamente mayor que la de las áreas vírgenes y, en muchos casos, las cargas totales de dichas áreas son mucho más altas que las de las áreas de cultivo intensivo (Tromboni y Dodds, 2017).

En Europa, se han implementado varias leyes para prevenir los efectos negativos de la eutrofización, ya sea directamente con el tratamiento de aguas residuales urbanas particularmente para los nitratos, mediante el Water Framework (WFD 2000/60 / EC), o dentro de un contexto ecosistémico con la Directiva Marco de Estrategia Marina (MSFD 2008/56 / EC). La eutrofización es uno de los once descriptores cualitativos de la DME establecidos por la Comisión Europea (CE) para evaluar el estado medioambiental de las aguas marinas de la UE (Cardoso *et al.*, 2010). A pesar de la legislación para mitigar los impactos negativos de la descarga de nutrientes en las aguas europeas, los países no han cumplido y las medidas no han sido lo suficientemente efectivas para lograr los objetivos finales de las regulaciones (Piroddi *et al.*, 2021).

En numerosos ambientes se han desarrollado estudios de este tipo, pero son escasas

aquellas investigaciones científicas y desarrollos tecnológicos cuyo objetivo principal sea contribuir a mitigar y resolver escenarios eutrofizados y sus consecuencias en la calidad del agua. A continuación –y a manera de ejemplo– se presentan sintéticamente los resultados obtenidos en un trabajo de esta naturaleza realizado en México:

Humedal artificial del Instituto Tecnológico de Boca del Río (Caso de éxito mexicano)

El Instituto Tecnológico del Mar 01 (ITMAR 01) dependiente de la Dirección General de Educación en Ciencia y Tecnología del Mar (DGECYT), se estableció en 1982 en el margen derecho a dos kilómetros de la desembocadura del río Jamapa, Veracruz. Dentro de la infraestructura de esta nueva institución no consideró un sistema para el tratamiento de aguas residuales. En el año 2019, el Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA antes ITMAR 01), después de 38 años de verter directamente su agua residual al río Jamapa, de acuerdo a estudios básicos de la eficiencia de diferentes sustratos de la región, se realizó el diseño y escalamiento real del humedal artificial de flujo sub-superficial. Se incorporó de acuerdo con técnicas arquitectónicas el diseño, con la finalidad de embellecer el espacio, lograr su incorporación al paisaje, con el uso de sustratos alternativos como tereftalato de polietileno (PET) y material calcáreo que fueron recolectados como producto de desechos que abundan en la región. Se integraron 13 especies de plantas ornamentales tropicales, con la finalidad de tener un sistema de tratamiento de aguas residuales que cumpla con la normatividad vigente, de bajo costo y que ofrezca beneficios adicionales como son: embellecimiento,

espacios de experimentación, donación de plantas, capacitación a internos y externos y vinculación con la sociedad. El uso de plantas ornamentales tropicales generó un paisaje armónico, además de representar un hábitat de aves e insectos; destacan las especies *Ruellia brittoniana* y *Pennisetum setaceum*, plantas que nunca se habían utilizado en humedales artificiales, las cuales se adaptaron a las condiciones de este sistema y fue evidente su crecimiento y reproducción. Los resultados de la fitorremediación mostraron una remoción importante de turbidez (63 %), DBO₅ (15 %), DQO (15 %) y nutrientes como fósforo y nitrógeno inorgánico, por encima del 70 %. Los parámetros monitoreados demostraron que el humedal artificial cumplió con los requerimientos que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 en relación a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y la NOM-003-SEMARNAT-1997, respecto de los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, contribuyendo a eliminar exceso de nutrientes al río y por ende al océano.

Hacia el 2030

Los nutrientes inorgánicos son una parte esencial e imprescindible de los ciclos biológicos y biogeoquímicos del ambiente marino, y por lo tanto sus niveles deben ser garantizados de tal manera que la productividad de los océanos también tenga sustento. Cuando se hace la consideración de la cantidad extra (*sobre-stock*) de estos compuestos que cotidianamente circula por los sistemas acuáticos y sus ambientes terrestres asociados se facilita la comprensión de la verdadera dimensión del problema: una alta cantidad de actividades humanas cotidianas y de escala elevada generan nu-

trientes o materia orgánica como residuos, y terminan descargados en los cuerpos de agua y finalizan su trayecto en la zona costera marina.

Estas actividades son de tal envergadura e importancia relativa en nuestra vida cotidiana que nos es posible considerar la posibilidad de su eliminación. Por lo tanto, las eventuales soluciones que se propongan deberán ser transformadoras de esos procesos de tal manera que sus residuos potencialmente nocivos sean minimizados, inmovilizados o atrapados, y de esta manera no afecten al sistema marino. Entre ellas debemos considerar a la agricultura, la ganadería, los emprendimientos forestales que requieran deforestación previa de sistemas naturales, las descargas de efluentes urbanos e industriales, la destrucción de humedales (particularmente los costeros), así como la existencia de sitios de disposición final de residuos urbanos que no cumplen con la mínima normatividad, entre otras. De tal manera, las políticas ambientales que deberán generar los países con miras al 2030 deberán incluir acciones concretas que ayuden a disminuir significativamente los niveles de materia orgánica y de nutrientes arrojados cotidianamente a los sistemas acuáticos naturales, y que terminan generando un impacto enorme sobre la zona costera marina (Breitburg *et al.*, 2018).

De esta manera, las acciones y objetivos que se lleven a cabo deberían apuntar a:

- Definir estándares internacionales apropiados para las realidades de cada región, de tal manera que las actividades tengan un patrón de control común, y se pueda evitar o minimizar la generación de impactos negativos sobre el sistema marino.
- Optimizar los medios de producción agropecuarios, evitar aquellos que ge-

neran erosión de suelos, o aumento de escorrentías, y por lo tanto mayor transporte hacia los cursos de agua.

- Generar sistemas de control y tratamiento sobre los efluentes urbanos e industriales, de tal manera que minimicen sus contenidos de materia orgánica y nutrientes, evitando así afectar los sistemas acuáticos.
- Buscar mecanismos de actualización de las legislaciones de diferentes escalas (nacionales, provinciales, municipales) para evitar vacíos legales que impidan el control adecuado de las actividades.
- El sector académico debería tener un papel trascendente en estos temas, aportar experiencia y conocimiento que sirvan como fundamento para conseguir que esta información lleve a la sociedad y logremos trabajar por un océano con mejor futuro.

Una de las problemáticas ambientales en las zonas costeras mexicanas asociadas principalmente a los asentamientos urbanos y a los desarrollos turísticos, que cada vez son de mayor dimensión y complejidad, la constituye las descargas de aguas residuales no tratadas (ARNT) hacia el mar por el aporte de microorganismos de desecho humano con la presencia de especies patógenas responsables de padecimientos gastrointestinales que, en países como México, han sido causantes de un componente importante de mortalidad sobre todo infantil. En este sentido, es necesario aportar una visión concreta de los estudios realizados sobre el grupo de las bacterias patógenas, preponderantemente las del grupo del género *Vibrio* ya que han sido las más investigadas en nuestro país por las afectaciones que han provocado sobre los recursos pesqueros, impactando la economía de ese sector así como la salud humana.

Bacterias patógenas

La mayoría de los esteros o lagunas costeras de las costas mexicanas, están expuestas a los aportes de contaminantes acarreados por los ríos que desembocan en estos cuerpos de agua antes de llegar al ecosistema marino, en donde también se refleja la influencia de los contaminantes presentes en los aportes fluviales sobre las poblaciones de bacterias pertenecientes a diferentes grupos, como coliformes y diversos tipos de patógenos como *Shigella*, *Salmonella*, *Escherichia*, sobresaliendo los integrantes del género *Vibrio*.

Los estudios de bacterias patógenas en ambientes estuarinos o costeros se han enfocado en la detección y cuantificación de coliformes totales y fecales, tanto a ni-

vel nacional como internacional, lo que ha conducido al establecimiento de normas sanitarias tanto para los cuerpos de agua como para los organismos capturados o cultivados para el consumo humano. La literatura en estos temas es muy abundante como lo hace notar los trabajos de Barrera-Escorcia y Wong-Chang (2014), y la normatividad de la Secretaría de Salud (NOM-242-SSA1-2009).

En México, la mayoría de los estudios de bacteriología sanitaria se han desarrollado en el golfo de México, en donde la incidencia de bacterias patógenas muestra una elevada correlación con la estacionalidad climática de esta región, siendo en la época de lluvias (julio a diciembre), en donde

se presentan las máximas concentraciones, en especial entre julio y septiembre (Romeo-Jarero *et al.*, 1986).

En el Pacífico subtropical mexicano, particularmente en los esteros de la península de Baja California, por la relevancia del cultivo extensivo del ostión japonés (*Crassostrea gigas*) destinado en gran medida a exportación, se ha implementado un monitoreo sanitario sistemático de cuerpos de agua y de organismos, para certificar su inocuidad sanitaria. Esta certificación se basa en la incidencia de bacterias coliformes totales y fecales, así como en la concentración de toxinas marinas. Esta regulación permite a los acuicultores de ostión poder exportar sus productos al mercado de Estados Unidos, dentro de un programa bilateral SSA/FDA denominado “Sanidad de moluscos bivalvos”.

Derivado de un estudio enfocado a la detección de vibrios patógenos en moluscos bivalvos en granjas certificadas por SSA/FDA en esta misma región de Baja California (Guerrero *et al.*, 2014), se pudo registrar la presencia de *Vibrio parahaemolyticus* no toxigénico de manera continua y de *V. cholerae* no-O1 no-O139, en un número muy reducido de muestras; un resultado muy interesante, lo representa la NO detección de *V. vulnificus* en ninguna de las muestras de ostión, aspecto que puede ser debido a la alta salinidad que se registra en todos los esteros de la península, como resultado de la escasez de ríos y de escurrimientos pluviales, ya que en la literatura se ha informado que *V. vulnificus* no prolifera en salinidades mayores a 30 ups.

En contraste, en los últimos años en el sur del golfo de México, hay reportes de registros sobre la presencia de *V. parahaemolyticus* toxigénico y *V. cholerae* no-O1 no-O139 en ostiones colectados en la lagu-

na de Mandinga en Veracruz, demostrando la existencia de una estacionalidad para vibrios patógenos, relacionada con las fluctuaciones de salinidad y temperatura (Flores-Primo *et al.*, 2014; López-Hernández *et al.*, 2015).

Los numerosos estudios sobre bacterias coliformes y bacterias patógenas del género *Vibrio* spp., han demostrado la existencia de altas concentraciones de estos grupos, generalmente por encima de la normatividad mexicana, por lo que es recomendable implementar programas de vigilancia bacteriológica en las lagunas costeras del golfo de México, ya que de ahí proviene la mayor cantidad de moluscos bivalvos consumidos en el sur y centro del país. También se recomienda implementar un programa de registro sobre casos clínicos de septicemia y gangrena, causadas por *V. vulnificus*, que en otros países como Estados Unidos, presentan una tasa de mortalidad superior al 50 %.

Los casos mencionados para ambos litorales son un claro ejemplo de la vigilancia sanitaria que debe continuar formando parte de los programas de salud tanto para el cuidado de los consumidores de productos pesqueros a nivel nacional como para satisfacer los requisitos de exportación y no arriesgar la salud de los mexicanos y los ingresos de divisas por el comercio al exterior de productos obtenidos de las costas mexicanas.

Si bien las actividades humanas derivadas directamente de los asentamiento poblacionales y el sector turístico contribuyen de forma constante con desechos domésticos urbanos, donde el deterioro y riesgo sanitario es una de las afectaciones comunes que no ha podido regularse adecuadamente, es inevitable ir incorporando en el rompecabezas de la contaminación de las costas y

mares mexicanos, otra serie de actividades importantes para nuestro país, económicamente relevantes en nuestra historia de desarrollo, como lo ha sido la industria

petrolera y en forma creciente en las últimas décadas, el sector minero-metalúrgico, ambas formando parte de las actividades antropogénicas extractivas.

Contaminación marina generada por la industria extractiva

Petróleo

El uso y el aprovechamiento de las zonas costeras, representa una ganancia mundial de muchos billones de dólares anualmente (Costanza *et al.*, 1997), debido a la exploración, extracción y transportación marítima de petróleo y diversas manufacturas y alimentos, el uso habitacional y recreacional y la pesca deportiva y comercial; ya que en ellas se asienta cerca del 40 % de la población mundial (Field *et al.*, 2020). Así, con el incremento de las actividades humanas en estas zonas se han originado singulares problemas de contaminación de diversos tipos que producen efectos nocivos sobre especies comerciales, desencadenan procesos de toxicidad y crean riesgos para la población que vive y se alimenta de estas áreas (Tolba, 1992).

Programas internacionales

Debido a que la principal fuente de energía en el planeta son los hidrocarburos fósiles (petróleo y sus derivados) todos los países incluyendo México, han usado y abusado de estos recursos con los consecuentes accidentes (derrames, explosiones y rupturas de oleoductos, fugas en tuberías, descargas ilegales en su transporte y almacenamiento, accidentes en costas y derrames en altamar) y sus enormes consecuencias ambientales y para las pesquerías, los ecosistemas costeros, la sociedad y las zonas ribereñas. Durante la década de 1980 se concluyó que

cerca del 20 % del petróleo introducido en el mar provenía de las filtraciones naturales, el 27 % de la transportación marítima, de la producción y la refinación y el restante 63 se introducía por emisiones atmosféricas, fuentes municipales e industriales y descargas de ríos (Quigley *et al.*, 1999).

Debido a esto, la Organización de las Naciones Unidas implementó Programas Internacionales relacionados con la contaminación marina por el petróleo y sus derivados como el Proyecto de la contaminación marina mundial (MARPOLMON), el de Mares Regionales del Programa Ambiental de Naciones Unidas (PNUMA), el Programa Internacional de Vigilancia para Petróleo (Mussel Watch) y el Programa Regional para la contaminación por petróleo en el Caribe (IOCARIBE-CARIPOL), a fin de valorar los niveles de hidrocarburos en los mares y hacer frente a emergencias (derrames, ruptura de oleoductos y colisión de buques) y estudiar los efectos e impactos por la presencia de petróleo y sus componentes en aguas costeras, sedimentos y organismos de importancia pesquera y comercial. Algunos de estos proyectos, aún están vigentes y continúan produciendo información especializada en esta temática. En el Caribe insular, fueron y son de vital importancia estos Programas, ya que la región a pesar de no ser productora de petróleo, en sus aguas se movilizan aproximadamente 6.5 millones de barriles de petróleo crudo diaria-

mente, haciendo de esta área una de las más vulnerables por la presencia de hidrocarburos; pero sobre todo por la fragilidad de sus ecosistemas que son altamente productivos (corales, pastos marinos y manglares).

Programas nacionales

México dio inicio a su crecimiento de la Industria petrolera hace más de 40 años con un crecimiento sostenido y llegó a ser uno de los 10 principales países productores de petróleo crudo con alrededor de 3 millones de barriles diarios. Sin embargo, han ocurrido accidentes masivos (derrames) en las aguas del golfo de México, siendo los más importantes el del Pozo Ixtoc I (1979) en la bahía de Campeche; y el de la Deep Water Horizon en las Costas de Louisiana, EUA (2010). En junio de 1979 explotó el Pozo-Ixtoc I en la sonda de Campeche y derramó más de 4 millones toneladas métricas a las aguas del golfo de México durante 9 meses que duró el derrame. A pesar de estos acontecimientos, el país no se preocupó por formar investigadores y cuadros técnicos especializados en estos aspectos y durante la contingencia solamente implementó un Programa Intersecretarial con diversos órganos gubernamentales y de Universidades e Institutos nacionales, pero que lamentablemente después de 2 años del derrame este Programa se discontinuó. Actualmente, existe una Comisión Intersecretarial de Mares y Costas compuesta por las principales Secretarías de Estado, la cual tiene entre sus funciones valorar los diversos aspectos de la contaminación marina.

Sin embargo, el país sigue adoleciendo de un verdadero Plan Nacional para enfrentar la contaminación por petróleo y sus derivados, con la excepción de los estudios realizados y que actualmente realizan diversas Universidades y Centros de Estudio al respecto. Son dignos de mencionarse los pro-

grama para la contaminación por petróleo realizados por más de 25 años por la UNAM, el Programa Intersecretarial del Consorcio de Universidades Mexicanas (CIGOM), el cual dio origen al actual y vigente Programa Bilateral de Cooperación México/EUA en funciones desde hace más de 5 años para obtener información de base sobre la presencia de hidrocarburos del petróleo en aguas profundas del golfo de México.

Acciones regionales y locales

Entre las acciones regionales y locales para enfrentar este problema, están los esfuerzos sostenidos de universidades e institutos que actualmente estudian y evalúan los efectos e impactos de la contaminación por petróleo como: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana, la Universidad Veracruzana, la Universidad Autónoma de Tabasco, el Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV Mérida), el Centro de Estudios Superiores de Ensenada, Baja California; el Instituto Mexicano del Petróleo, entre otros.

Regionalmente, están la Universidad de Texas, la Universidad de Texas AM, la Universidad de Florida, que han conformado un consorcio con universidades e institutos mexicanos para la investigación sobre la presencia y efectos del petróleo en las costas y mares de la región.

En foros internacionales recientes y recientemente el foro de las Naciones Unidas, se acordó por la mayoría de los participantes hacer una reducción gradual de las concentraciones de CO₂ para el año 2030 y dejar de emitir este gas para el 2050, lo que implica que los países productores y los consumidores reduzcan la producción y dependencia del petróleo como principal fuente de energía en el planeta y que desarrollen e incentiven energías alternas (solar, eólica, mareal, hidroeléctrica, nuclear, en-

tre otras). Actualmente, ya algunos de los países europeos y escandinavos han comenzado esta transición energética, lo cual es motivante; pero es demasiado costosa para las economías de muchos otros países, los cuales no podrán alcanzar estos objetivos debido a sus limitaciones financieras.

Esto sin duda creará problemas económicos y sociales muy serios entre los países dependientes del petróleo y aquellos que si vayan a lograr la transición energética. El gobierno federal afirmó que aún con el impulso de energías limpias, en el año 2050 el consumo mundial de petróleo será de 86 millones de barriles al día; es decir, 14 millones más de la cifra actual.

Proyecciones futuras

Aunque hoy el mundo se esfuerza por desarrollar una transición energética hacia tecnologías limpias que disminuyan el calentamiento global, se ha demostrado que apostar todo a un solo método de generación de energía puede traducirse en una crisis de dimensiones catastróficas, como la que se experimentó en el norte del continente a principios del 2021. Así, todas las economías del planeta, incluidas las que más han avanzado en la implementación de energías limpias, seguirán requiriendo de una capacidad de refinación de petróleo por arriba de 85 millones de barriles diarios, más allá del 2050, y por lo tanto, es más que optimista la meta de 0 emisiones de CO₂ para ese año y no se podría cumplir con el Objetivo 14 del Desarrollo Sustentable propuesto por las Naciones Unidas.

Vinculado de forma muy estrecha a la situación nacional derivada de las actividades petroleras, se ha documentado la presencia de metabolismos microbianos, principalmente bacterianos, con la capacidad de sobrevivir exitosamente en sitios con abundancia de hidrocarburos, en diversas

localidades del golfo de México, así como en condiciones extremas como las que se presentan en las ventilas hidrotermales del pacífico subtropical mexicano donde existen hidrocarburos en concentraciones altas. A estos grupos de bacterias, capaces de aprovechar el petróleo y sus compuestos relacionados como una gran fuente de carbono y energía, se les conoce como bacterias hidrocarbonoclasticas o más comúnmente nombradas degradadoras de petróleo.

Bacterias degradadoras de petróleo

El golfo de México es un gran ecosistema marino impactado constantemente por aportes naturales o antropogénicos de petróleo crudo. Joye *et al.* (2016) han estimado que en todo el golfo de México, las emanaciones naturales conocidas como chapopoteras, aportan un promedio anual de 1.6 a 6.0 x 10⁵ barriles de petróleo (1 barril U.S. = 159 L). Estas emanaciones anuales, representan una cantidad similar a la cuantificada en cada uno de los dos mayores accidentes registrados en el golfo de México, el pozo Ixtoc-I en 1979 en aguas nacionales (Soto *et al.*, 2014) y la plataforma Deepwater Horizon (DWH) en territorio estadounidense durante 2010 (Joye *et al.*, 2016). Sin embargo, a diferencia de las emanaciones naturales, estos accidentes significan un ingreso masivo de petróleo a los ecosistemas pelágico y bentónico, lo que dificulta su biodegradación. En este sentido, las bacterias degradadoras de petróleo (BDP), al tener la capacidad de utilizar los hidrocarburos como fuente de C y de energía son utilizadas en la biorremediación de zonas contaminadas por este. Diversos estudios han mostrado que existe una gran diversidad de bacterias capaces de degradar el petróleo y cuya abundancia está relacionada con el tipo de hidrocarburos del petróleo presentes en el ambiente.

Respecto a este grupo de bacterias, las BDP, Lizárraga-Partida (1996), después del control del pozo Ixtoc-I en la sonda de Campeche en el sur del golfo de México, registró tasas muy bajas de BDP con relación a las bacterias heterotróficas viables (BHV) (BDP/BHV), siendo esta tasa un parámetro importante del impacto del petróleo crudo. Este índice bacteriano que relaciona ambos grupos de metabolismos microbianos, puede presentar heterogeneidad que se ha relacionado con la variabilidad climática de la región sur del golfo de México, habiéndose reportado tasas más altas en época de lluvias debido probablemente al transporte fluvial de petróleo crudo procedente de los pozos de explotación ubicados en tierra en las cercanías costera (Lizárraga-Partida, 1996). Asimismo, se ha documentado la existencia de fluctuaciones temporales en la magnitud de esta tasa (BDP/BHV) que evidencia la presencia de este tipo particular de bacterias, en compartimentos ambientales como agua superficial y sedimentos localizados bajo los quemadores de gas de las plataformas petroleras de la zona del complejo petrolero de Cantarell, el más grande y antiguo en la sonda de Campeche, indicando intensos procesos fisicoquímicos y microbiológicos en la degradación del petróleo, el cual es continuamente aportado por las plataformas petroleras (Lizárraga-Partida, 1996). De suma importancia en este proceso de degradación bacteriana del petróleo ha sido el haber podido registrar la importancia de las “partículas de alquitrán” (> 5 mm) en el transporte en parches de bacterias degradadoras de petróleo, procedentes del mar Caribe, una de las más grandes regiones productoras de este hidrocarburo en el mundo y de mayor tráfico de buques-tanque, donde México forma parte como destino final o zona de intercambio

(carga y descarga) de este energético con lo que significa en el ámbito de la contaminación crónica de los mares debido al petróleo (Lizárraga-Partida, 1996). Joye *et al.* (2016), también han documentado la importancia de estas partículas, de estos parches de alquitrán, durante el derrame de la DWH, en el fenómeno de nieve marina de petróleo (marine oil snow), enriqueciendo el fondo marino desde la superficie, lo que representan un escenario de gran relevancia en la oxidación del petróleo.

Más recientemente Hernández-López *et al.* (2019), señalaron la presencia de bacterias degradadoras de petróleo a todo lo largo de la columna de agua y sedimentos profundos en el sur del golfo de México; esta información nacional concuerda con los hallazgos de Joye *et al.* (2016), ya que estos autores reportaron haber detectado una reproducción exponencial de grupos de bacterias reconocidos como degradadores de petróleo en la zona profunda bajo la incidencia del derrame de petróleo de la DWH. Lo anterior indica que, debido a los continuos aportes naturales de petróleo, las BDP están latentes en todo el ecosistema y pueden reproducirse rápidamente en zonas de derrame con alta concentración de nutrientes y oxígeno disuelto como lo son las aguas profundas del golfo de México, a pesar de las bajas temperaturas.

Ya que nuestro país sigue siendo económicamente dependiente del sector petrolero y lo seguirá por varias décadas más, es recomendable incluir la detección de BDP por cultivo o por métodos genéticos (qPCR, metagenómica), con la finalidad de registrar cambios en la línea base establecida por diversas instituciones de investigación nacionales (CICESE e IBT/UNAM) (<https://cigom.org>) para contar con la base de datos molecular robusta, necesaria que pueda re-

comendarse a ser utilizada en casos urgentes de biorremediación o atención rápida de derrames masivos de petróleo y con ello contribuir a minimizar el impacto ambiental sobre el ecosistema marino.

Metales pesados

El uso de combustibles fósiles en la industria y en los vehículos automotores, la disposición inadecuada de residuos sólidos, incluidas las gangas de la industria minera que generan gran cantidad de lixiviados, el vertido de aguas residuales industriales y urbanas que no han sido debidamente tratadas, la escorrentía pluvial de las áreas agrícolas y las emisiones de la industria metalúrgica y manufacturera, han contribuido a aumentar la concentración ambiental de metales pesados (MP) en el ambiente marino en México (León-Nuñez y Villanueva, 2019). De hecho, usando los registros geoquímicos contenidos en núcleos sedimentarios y en las bandas de crecimiento de corales arrecifales, se ha podido demostrar una tendencia generalizada de aumento en la concentración de diversos MP en México, al menos desde mediados del siglo XIX (Soto-Jiménez et al., 2006; Carriquiry y Horta-Puga 2010). Desafortunadamente, este aumento también se ha observado a escalas regional y/o global. Uno de los casos más conocidos es el del plomo, cuyos niveles ambientales han aumentado desde la época de la cultura romana y llegaron a tope en el siglo XX, a consecuencia del uso de las gasolinas con plomo (Horta-Puga y Carriquiry 2014). Además, considerando que muchos de los objetos de uso cotidiano, las máquinas y herramientas usadas en la industria, los vehículos de transporte, y las construcciones de todo tipo, emplean MP como un constituyente importante, es previsible que la tendencia de aumento continúe.

Programas internacionales para prevenir la contaminación en el mar

Los gobiernos de diferentes países, a través de las organizaciones internacionales como son la ONU (UNESCO y PNUMA), FAO, UE, y TPP (Asociación Transpacífico), han desarrollado diversos programas, para prevenir, remediar y disminuir la contaminación por MP, considerando las fuentes antropogénicas, vías de circulación y efectos sobre la salud humana y ecosistémica (GESAMP, 2018). A continuación, se presenta un breve panorama sobre los programas internacionales, que han sido firmados por el gobierno de México y diversos países latinoamericanos:

- (1) **Convenio de Ginebra** (1979), un acuerdo firmado por 51 países, para disminuir la contaminación atmosférica. Incluye un tratado sobre MP (*Protocolo de Aarhus*), cuyo objetivo es reducir las emisiones de Cd, Hg y Pb de fuentes industriales, procesos de combustión e incineración de residuos.
- (2) **Convenio de Basilea** (1992), firmado por 170 países, enmarcados en el PNUMA, apunta al control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos, a través de la aplicación de un sistema regulatorio. Diversos países han adoptado medidas jurídicas y administrativas para aplicar y hacer cumplir las disposiciones del presente convenio.
- (3) **Convenio de Rotterdam** (2004), establecido para controlar el uso y circulación de sustancias químicas peligrosas, fue firmado por más de 100 países. El convenio representa un paso importante para garantizar la protección de la población y el ambiente de los posibles peligros que entraña el comercio de productos químicos altamente peligrosos.

(4) **Convenio de Minamata** (2013), este convenio pone a disposición del público información sobre la salud y la seguridad humanas y del medio ambiente en relación con la presencia, uso y distribución del mercurio y sus compuestos. El acuerdo está actualmente en plena fase de instrumentación e inicio de aplicación.

Esfuerzos nacionales para prevenir la contaminación en el mar

En México, los esfuerzos gubernamentales para disminuir la contaminación por MP se han enfocado en dos vertientes. Por un lado, generar un marco jurídico que norme el vertido y la emisión de fluidos contaminantes, establece los límites máximos de MP en diferentes compartimientos ambientales, y establece los protocolos de análisis químico. Así, se han creado las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). En la tabla 1, se presentan las más importantes de aplicación en el ambiente marino.

El gobierno federal ha implementado diversos programas que podrían contribuir a disminuir la contaminación por MP en el ambiente marino. Entre estos se incluyen:

Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire), Programa para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Urbanos (PRSU), Programa para el Manejo de Residuos Peligrosos (CRIT), que son supervisados por la SEMARNAT. El único programa cuyo objetivo es prevenir y controlar la contaminación de los ecosistemas marinos, es el denominado Programa Permanente de Protección Ecológica a Estados Costeros (PPPEEC), cuya ejecución corre a cargo de la SEMAR. La actividad principal es llevar a cabo recorridos de inspección para detectar fuentes contaminantes, y la recolección de desechos sólidos en playas y bahías.

Contaminantes metálicos emergentes (Li y V)

México es uno de los 195 países que se adhirió a la Conferencia Internacional sobre Cambio climático (COP 21), que tiene como meta limitar a menos de 2 °C el incremento de la temperatura promedio a nivel mundial. Así para el año 2030 se plantea reducir en un 22 % la emisión de gases de invernadero, principalmente CO₂, y en un 51 % la emisión de partículas de carbono.

Tabla 1. Normas oficiales mexicanas de aplicación directa o indirecta en la prevención y remediación de la contaminación por metales pesados en el ambiente marino.

NOM	Campo de acción
NOM-026-SSA1-1993	Criterio para evaluar la calidad del aire (Pb).
NOM-052-ECOL-1993	Lista de residuos peligrosos y límites máximos.
NOM-001-ECOL-1996	LMPC en aguas residuales y naturales.
NOM-002-ECOL-1996	LMPC en aguas residuales urbanas.
NOM-003-ECOL-1997	LMPC en aguas residuales tratadas para servicio público.
NOM-021-SEMARNAT-2000	Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.
NOM-098-SEMARNAT-2002	LMPC en las emisiones de la incineración de residuos.
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	LMPC de remediación de suelos contaminados por MP.

LMPC= límite máximo permisible de contaminantes (concentración).

no negro (PM_{2.5}) (SEMARNAT, 2020). Dado que la mayor proporción de emisiones contaminantes proviene de los vehículos automotores, una estrategia viable es incrementar el uso de vehículos eléctricos que usan una batería de litio (Li-ion). Cada batería contiene ~10 kg de Li, y se calcula que para el 2030 se producirán >30 millones anualmente. La vida útil de una batería es de ~8 años, por lo cual se tendrá que disponer de un 10-15 % de las baterías cada año. Así, la posibilidad de que se incrementen los niveles ambientales de Li y otros MP que se usan cada batería (Co, Ni, Mn y Al) es importante (Peters *et al.*, 2017).

Adicionalmente, se han propuesto el uso de energía limpia (solar, eólica, etc.), para la generación de electricidad, en sustitución de las plantas termoeléctricas, que son grandes consumidoras de combustible. Un problema importante es que la generación de energía limpia no es constante (luz de día, viento, etc.), por lo que se requiere el uso de baterías que sean funcionales aun después de permanecer descargadas por largos periodos de tiempo. Las baterías de flujo redox de vanadio, por el momento son la mejor opción, ya que permiten almacenar energía suficiente, según su tamaño, para una casa e incluso una pequeña comunidad. Aunque la vida media de una batería de flujo redox de vanadio es de 15 años; con el tiempo la disposición final del vanadio podría convertirse en un problema ambiental (Chen *et al.*, 2017).

Hacia el 2030: el océano que todos queremos

La humanidad requiere de múltiples artículos, herramientas y máquinas que presentan MP, lo que implica un potencial aumento en su concentración ambiental, que desafortunadamente tendrá como destino

final el océano. De hecho, en un estudio reciente se reportó que México se encuentra entre los 10 países con mayor aporte de emisiones contaminantes de MP entre los que se incluyen As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Sb (Zhu *et al.*, 2020). Adicionalmente, se ha anunciado la apertura de una mina de litio (Li₂CO₃) en Sonora, la cual se estima tendrá una producción de ~35 mil toneladas anuales, lo que posicionará a México como uno de los principales productores a nivel mundial (Bacanora Lithium, 2021). Por lo anterior, uno de los objetivos principales de la política ambiental del país debe incluir el disminuir ostensiblemente los niveles ambientales de MP para el 2030. Entre las acciones que potencialmente podrán ayudar a lograr este objetivo se cuentan:

- Impulsar los estudios que permitan la detección temprana de eventos potencialmente contaminantes; un ejemplo de esto es el arribazón masivo de sargazo en el caribe mexicano, que puede ser fuente de MP en el medio costero.
- Hacer eficientes los procesos de recuperación de MP, durante la extracción, metalurgia, manufactura, tratamiento de aguas residuales, y lixiviados derivados de desechos sólidos; a través del apoyo a proyectos de investigación tecnológica.
- Diseñar y ejecutar un programa nacional integral de reciclaje de desechos metálicos.
- Convocar al sector académico a colaborar para actualizar la legislación ambiental aplicable, para lograr una disminución efectiva de los MP en las aguas nacionales costeras y oceánicas.

Desafortunadamente, en los procesos de contaminación marina, las fuentes se presentan de forma simultánea lo que hace más complejo el estudio de la alteración

de los ecosistemas costeros y marinos, obligándonos a realizar abordajes parciales del mismo. De ahí la importancia de incluir a continuación un componente fundamental para el ser humano que es la alimentación y lo que ha implicado, tener un crecimiento poblacional exponencial, acelerado, la producción masiva de insumos alimenticios con el uso a gran escala de agroquímicos, siendo los plaguicidas sintéticos los de mayor riesgo para los ecosistemas y para la salud humana. Todos sabemos la diversidad

de nuestro país en muchos sentidos, y la producción de alimentos no es la excepción, por lo que el grado de impacto debido a estos agrotóxicos será también diferencial en los litorales mexicanos, siendo innegable que su presencia cada vez más creciente y compleja debido a las mezclas que se utilizan, incrementa el daño ecosistémico, vulnera la salud de los consumidores y vuelve más difícil la disminución de estos grandes aportes que llegan a la zona costera.

Sector agroalimentario y contaminación marina

Plaguicidas

Alrededor del mundo, cerca de 20 billones de toneladas de desechos ingresan anualmente al océano (Lloyd e Immig, 2018). De la amplia gama de compuestos emitidos, los plaguicidas han despertado considerable interés debido a sus propiedades fisicoquímicas que los hacen persistentes, bioacumulables y tóxicos (Sharma *et al.*, 2019). El impacto de estas sustancias en el medio marino ha sido caracterizado a través de estudios de campo y pruebas de laboratorio, los cuales indican que alteraciones endocrinas, carcinogénesis y cambios en el metabolismo celular son algunos de los principales efectos adversos ocasionados por la exposición crónica a plaguicidas. Las afectaciones en la salud, desarrollo y supervivencia de los organismos generan a su vez modificaciones en la estructura poblacional y alteraciones significativas en la dinámica de las comunidades que conforman el medio marino (Kumar *et al.*, 2021).

El deterioro ecológico en los océanos ocasionado por la presencia de plaguicidas no parece cambiar a corto plazo, en la última década el uso de estos compuestos se in-

crementó un 25 % (Surfrider, 2020), situación que se contrapone con la meta 14.1 de los objetivos del desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, la cual busca prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo para el año 2025.

La preocupación por los daños que generan diversos contaminantes (incluyendo plaguicidas) en el medio marino, ha conducido al desarrollo de programas e instrumentos políticos internacionales que tienen por objetivo común lograr un océano limpio y sano. Entre las principales iniciativas destacan el Programa de Acción Global para la Protección del Medio Marino Contra Las Actividades Terrestres, (GPA, por sus siglas en inglés), la Comunidad de Acción por el Océano, la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS) y las Convenciones de Londres, Barcelona, Cartagena y Helsinki (Lloyd e Immig, 2018).

La mayoría de los instrumentos propuestos a menudo se enfocan en la protección de los mares a través de la reducción, control y eliminación de contaminantes desde que son originados en la zona terrestre. Para

ello, se han desarrollado enfoques estratégicos en la gestión internacional de diversos productos químicos. En particular para los plaguicidas, existen acuerdos multilaterales ambientales tales como los *Convenios de Estocolmo, Rotterdam y Basilea*, que favorecen la eliminación de estos compuestos o contribuyen a limitar su producción, comercio y transporte transfronterizo (BRS, 2010).

Para ayudar a los países signatarios a cumplir sus compromisos en virtud de los convenios indicados, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) y sus cinco organismos asociados (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), el Banco Mundial y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)) intervienen activamente en el fortalecimiento de la capacidad nacional para gestionar los plaguicidas apoyando la creación de marcos reglamentarios adecuados y financiando las propuestas de proyectos relacionados con el monitoreo y eliminación de estas sustancias (FMAM, 2011).

Asimismo, la FAO a través de su *Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas* proporciona a las autoridades gubernamentales, actores del sector privado y sociedad civil un marco de referencia sobre las prácticas necesarias para el control de plaguicidas durante su ciclo de vida, haciendo hincapié en la importancia de una producción agrícola sostenible mediante el manejo integrado de plagas. A su vez, organizaciones tales como la Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN) y la Red de Acción de Plaguicidas (PAN) realizan esfuerzos de investigación orientados al fortalecimiento de las políticas de gestión

y a la promoción de sistemas alternativos para el manejo de plagas.

A pesar de la variedad de instrumentos regulatorios internacionales que existen para el control de plaguicidas, actualmente la contaminación de los océanos por estos compuestos sigue siendo un problema ambiental relevante. Si bien algunos informes revelan que los convenios establecidos son una estrategia útil para abordarlo, se ha observado que el cumplimiento de sus objetivos ha sido parcial. La implementación inadecuada de los programas en conjunto con la notoria falta de información respecto al uso de plaguicidas en varios países limita la posibilidad de discutir la efectividad de las medidas adoptadas hasta ahora (Stockholm Convention, 2017).

En México, el marco regulatorio de plaguicidas está constituido por los Planes Nacionales de Implementación (PNI) de los convenios ratificados y por una estructura jurídica de múltiples leyes, reglamentos y normas cuya aplicación es determinada mediante distintas dependencias gubernamentales. Dentro de los PNI, la mejora del régimen jurídico y capacidad institucional, el desarrollo de capacidades analíticas, la integración de inventarios de información en sistemas unificados y la comunicación efectiva, son consideradas las principales propuestas de acción a través de las cuales se busca avanzar en la eliminación de los plaguicidas y sus riesgos hacia la salud de la población y medio ambiente (SEMARNAT, 2007).

De acuerdo a una reunión consultiva llevada a cabo en abril del 2019, la implementación de dichos planes en el país cuenta con una estrategia de acompañamiento técnico de la FAO con el fin de mejorar su desempeño y lograr la sinergia entre los tratados ambientales multilaterales y

el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 (FAO, 2019). Sin embargo, hasta la fecha los avances respecto a la consecución de los objetivos de los PNI no han sido publicados. Además, se ha descrito que la estructura jurídica vigente en México no sigue el esquema recomendado por las directrices de la FAO, ya que el control de plaguicidas es gestionado a través de varias dependencias y leyes en lugar de ser una autoridad única responsable la que se haga cargo de su manejo (Albert y Viveros, 2019).

A pesar de las deficiencias operativas que han impedido que la legislación actual pueda llevarse plenamente a la práctica, en México se han coordinado esfuerzos encaminados a abordar la problemática que representa el uso inadecuado de plaguicidas. Por ejemplo, existe la Red Temática de Toxicología de Plaguicidas, un gran grupo de científicos que estudia las implicaciones de la presencia de estos compuestos tanto en ecosistemas terrestres como costeros, así como los daños a poblaciones humanas vulnerables como niños, trabajadores agrícolas, fumigadores urbanos, mujeres embarazadas, indígenas, entre las más frágiles por su exposición a estos agrotóxicos. Se cuenta también con una serie de aportaciones desde el sector académico que incluyen revisiones y compilaciones de información actualizada sobre la tendencia del uso de plaguicidas y su diferenciación regional, el grupo químico de estas sustancias tóxicas más reportado, los sitios costeros en ambos litorales mexicanos con mayores niveles de acumulación tanto en los sedimentos como en una gama amplia de organismos, todos ellos de consumo humano (García-Hernández *et al.*, 2018; Ponce y Botello, 2019).

Asimismo, recientemente se realizó un análisis en nuestro país que establece la lista de plaguicidas altamente peligrosos de-

bido a sus características toxicológicas reconocidas internacionalmente. Lo anterior orilló a algunas agencias gubernamentales a reafirmar la necesidad de modificar la regulación nacional con el fin de lograr una eliminación efectiva de estos compuestos y establecer una estrategia de transición al uso de los menos peligrosos, acompañada de alternativas factibles como una producción alimentaria basada en prácticas sostenibles principalmente agroecológicas y con ello disminuir la carga contaminante de estos biocidas registrada en zonas continentales, litorales y marinas (Bejarano, 2017; Albert y Viveros, 2019).

Particularmente para los océanos, en México una de las dependencias encargadas de la prevención y control de la contaminación marítima es la Secretaría de Marina (SEMAR), la cual interviene directamente en colaboración con otras instituciones nacionales. A través de su Programa Permanente de Protección Ecológica a Estados Costeros (PPPEEC), la SEMAR busca evitar o minimizar la contaminación de los ecosistemas marinos mexicanos través de la regulación del vertimiento de desechos, la inspección y vigilancia de fuentes contaminantes, la atención oportuna a derrames y la concientización ecológica a la población. A pesar de que el PPPEEC considera un Plan Nacional de Contingencia para Combatir y Controlar Derrames de Hidrocarburos y Otras Sustancias Nocivas en el Mar, es importante señalar que en el país no existe un programa específico diseñado para regular los vertimientos de plaguicidas en los litorales (SEMAR, 2021). Aun contando con la labor de la SEMAR, el Consorcio de Instituciones de Investigación Marina del Golfo de México y del Mar Caribe (Cii-Mar-GoMC) ha indicado que el problema de la contaminación es la principal cau-

sa de deterioro de los ecosistemas costeros del país y que si bien existe la Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Sustentable de Mares y Costas de México (CIMARES) y la Política de Mares y Costas, en realidad estos instrumentos se mantienen ausentes dentro de la política de estado.

A partir del contexto anterior, es evidente que los sistemas regulatorios actuales nacionales e internacionales han sido insuficientes en la gestión de plaguicidas ya que estos compuestos siguen teniendo un impacto relevante en el medio ambiente y los océanos no son excepción. Para lograr la protección y el cuidado efectivo de los mares se requiere de un compromiso genuino de las partes interesadas que considere la factibilidad de aplicación de los distintos instrumentos políticos de acuerdo al contexto económico-social en el que se encuentren. Además de voluntad política, una mayor asistencia técnica y científica especializada, el desarrollo de programas de biomonitoreo e integración de datos, el manejo de cuencas ordenado y el análisis de flujos de contaminantes, son otras de las acciones sugeridas que pueden contribuir a la solución del conflicto ambiental que representa el deterioro de los océanos (Lloyd e Immig, 2018).

Finalmente, no podemos dejar de incluir lo que aportan los lugares donde vivimos, la mayor parte de los habitantes de nuestro país y del resto del mundo, hacia los mares. Las ciudades se incluyen como fuentes muy importantes de contaminación ambiental, son grandes sitios concentradores de diversas actividades humanas que demandan enormes cantidades de recursos (agua, energía, espacio) y producen residuos a gran escala, son lugares de una complejidad tal, que por un lado permiten que sus residuos sólidos sean considerados como una fuente de ingresos económicos para determinado sector de la sociedad y por otro, compromete significativamente a la propia población citadina así como a poblaciones en vecindad y en lejanía por la emisión de contaminantes atmosféricos con transporte a gran escala y por la exposición a sus aguas residuales no tratadas principalmente en sus periferias. Estas aguas negras urbanas que en la mayoría de los casos de México son mixtas, mezcladas entre domésticas e industriales, más tarde o más temprano, alcanzan la zona costera contribuyendo de forma constante a la contaminación de nuestros mares.

Las ciudades como grandes generadoras de contaminación marina

Basura y plásticos

Actualmente es muy preocupante la presencia de basura y plásticos en los mares y las costas del planeta. Se reporta que aproximadamente 8 millones de toneladas entran a los mares y costas provenientes de las grandes ciudades costeras (Tolba, 1992). Su contenido son productos sintéticos princi-

palmente plásticos y redes de pesca (85 %), cuya presencia es innegable ya que, debido a esto, se han formado 5 grandes “*Islas de Basura*” en los diversos océanos que están generando múltiples problemas para las pesquerías mundiales y la sostenibilidad de los ecosistemas marinos, sobre todo por la

lenta degradación y la vida media muy larga de sus componentes.

Para el 2018 la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAT), detalló que la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en México llegó a 102 024 636 kg/día, lo que significa que cada habitante genera 0.8634 kg/día (Ledezma, 2019). De esta cantidad, las principales ciudades costeras como Baja California Norte y Sur, Campeche, Colima, Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Quintana Roo, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán; producen aproximadamente 45 500 millones toneladas de RSU diariamente de las cuales el 85 % son plásticos, convirtiéndose así en una gran amenaza mundial y obligando a la necesidad de implementar acciones para su uso incluyendo la prohibición de ellos en algunos países.

La cantidad de microplásticos (MP) en los ambientes acuáticos va *in crescendo* de acuerdo a los registros científicos, en parte debido a la constante y creciente producción global de plásticos que alcanzaron las 368 M Ton en 2019. Existe un sinnúmero de características de los plásticos que los hacen un material deseable para múltiples aplicaciones, desde la medicina hasta la construcción. Esas mismas características los convierten en problemáticos para el medio ambiente: resistencia a la corrosión, baja conductividad térmica y eléctrica, bajo costo y extrema durabilidad. Sumado a esto, los plásticos pueden incorporar otros compuestos químicos durante su fabricación (aditivos) los cuales mejoran sus propiedades, pero son tóxicos en caso de ser ingeridos (por ej. ésteres de ftalatos). De manera similar, muchas sustancias químicas del ambiente pueden ser adsorbidas/incorporadas a las partículas de plástico; la larga relación área/superficie permite un

gran potencial de asociación con otro tipo de contaminantes, tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los bifenilos policlorados o los metales pesados.

Regulaciones globales

La gobernanza global sobre los plásticos se caracteriza por autoridad fragmentada, políticas superpuestas y no coordinadas. La Convención de las Naciones Unidas sobre la Ley del Mar (UNCLOS) realiza una gobernanza global del Océano (UNCLOS, 1982) promoviendo que las naciones signatarias se esfuercen por reducir la basura marina minimizando la contaminación de las fuentes marinas y terrestres que pueden ingresar al entorno marino (PNUMA, 2018). Mientras tanto, la Convención sobre la Prevención de la Contaminación Marina mediante el vertido de desechos y otros materiales (MARPOL), creado en la Convención de Vertidos de Londres en 1972, ejerce un acuerdo internacionalmente legalmente vinculante que prohíbe que se envíen los desechos (incluido el plástico) en los océanos.

El Convenio de Basilea -uno de los acuerdos más relevantes en términos de residuos plásticos- se ocupa del control de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su disposición entre países: desde 2019 incluye los residuos plásticos que no van hacia el reciclaje directo. Otra convención que aborda los residuos plásticos es el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP). Esta convención compromete a las naciones para prohibir o restringir todos los productos químicos, incluidos los COP-muchos de ellos utilizados en la industria plástica como aditivos-.

En 2011, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) en los Es-

tados Unidos y el Medio Ambiente de la ONU desarrolló la Estrategia de Honolulu, basada en los compromisos voluntarios de la nación para reducir la incidencia y los impactos en los ecosistemas costeros y marinos para 2025, promoviendo estrategias para marcos regulatorios sobre los desechos plásticos. Otras convenciones, como la Convención sobre la Diversidad Biológica (2016) y la Conferencia de las Partes en la Convención sobre Especies Migratorias de Animales Salvajes (2014), han adoptado resoluciones para reducir la basura marina. Finalmente, el Código de Conducta para las pesquerías responsables de la FAO establece una serie de prerrogativas para evitar el desecho de redes, cajones y cabos en los mares, sin embargo, no es legalmente vinculante (UNEP, 2017; PNUMA, 2016).

Regulaciones regionales para Latinoamérica y Caribe (LAC)

De los 18 programas de Mares Regionales de Naciones Unidas para proteger los entornos costeros y marinos, hay dos que involucra a los entornos costeros de LAC. En este contexto se estableció la Convención para la Protección y el Desarrollo del Medio Ambiente Marino de la Región Amplia del Caribe o “Convenio de Cartagena” como su marco legal, siendo el único instrumento legal que contempla tres protocolos: uno relacionado con derrames de petróleo “Protocolo de derrames de petróleo”, uno para áreas protegidas y vida silvestre “Protocolo de SPAW” y finalmente el protocolo relativo a la contaminación de fuentes basadas en la tierra, el “Protocolo de LBS”, que entró en vigor el 2010. La Segunda Convención es el Plan de Acción del Pacífico Sureste, el cual fue adoptado por los firmantes a partir de la Convención Para la protección del medio ambiente marino y las zonas costeras en el sureste del Pacífico o “Convención de

Lima”. Los países involucrados fueron Chile, Colombia, Ecuador, Panamá y Perú, en torno a proteger y preservar el medio ambiente marino y las áreas costeras del Pacífico del sureste de todos los tipos y fuentes de contaminación. La región firmó hace unos años un acuerdo histórico con la Secretaría del Programa de Medio Ambiente del Pacífico (SPREP) para cooperar y proteger un área del Pacífico más extenso (PNUMA, <https://www.unenvironment.org/>).

Regulaciones nacionales

Una de las medidas más comunes en los países de LAC es la prohibición de las bolsas de plástico (Alfonso *et al.*, 2020). Por ejemplo, Antigua y Barbuda fue de los primeros países en prohibir su uso en 2016, seguido de Panamá y Chile. Mientras tanto, Colombia creó un impuesto sobre las bolsas de plástico y espera reducir su uso en un 35%. Jamaica también aplicó un impuesto para los productos plásticos locales e importados, mientras Perú emitió la obligación de utilizar bolsas y productos de plástico biodegradables en toda entidad del sector público. Costa Rica por su parte adoptó una estrategia para reducir el uso de plásticos de un solo uso para 2021, al igual que Belice y Bahamas. Ecuador ha optado por transformar la isla de Galápagos en un lugar libre de plásticos, prohibiendo su uso y venta. Mientras tanto en México, su gobierno ha promovido la reducción del uso de sorbetes y se espera que prohíba aún más artículos incluyendo bolsas de plástico y otros artículos de polietileno. Colombia promueve el uso racional de las bolsas de plástico y Haití prohibió la importación, fabricación de bolsas de polietileno negro y contenedores de espuma de poliestireno. En el caso de Argentina, las bolsas de plástico están prohibidas a nivel subnacional en algunas ciudades y pueblos. En lo

que respecta a la eliminación final de los residuos plásticos, existen regulaciones a nivel nacional en la mayoría de los países de LAC (por ejemplo, Argentina, Bahamas, Barbados, Belice, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, Venezuela, Granada, Guyana, Trinidad y Tobago, Honduras, Jamaica, México, etc.). Otros países como Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay avanzaron en reconocer leyes de responsabilidad extendida del productor para envases plásticos (PNUMA, 2018).

Contaminantes emergentes

En la actualidad, la creciente demanda de diversos productos de uso doméstico, industrial, agrícola y otras actividades antrópicas han ocasionado la descarga de nuevas sustancias de numerosas familias químicas que aumentan el impacto a los ecosistemas marinos. Estas sustancias, conocidas como contaminantes emergentes (CE), no habían sido consideradas como tales a pesar de que muchas de ellas llevan varios años dispersándose en el ambiente. La principal causa del desconocimiento sobre su presencia en los ecosistemas marinos es que se encuentran a muy baja concentración y en algunos casos se trata de nuevos compuestos (Wilkinson *et al.*, 2017). Fue gracias al mejoramiento de las técnicas analíticas y a las investigaciones sobre sus efectos tóxicos que comenzaron a ser de gran preocupación. Se trata de sustancias de diferente naturaleza química, surgidas en el mundo contemporáneo y provenientes de fuentes diversas, muchas de ellas sin identificar, cuyos efectos conocidos o esperados alertan a la comunidad internacional debido a su mayor presencia en el medio ambiente a escala global. La gran mayoría de estas sustancias son productos de la excreción humana que llegan a las aguas residuales urbanas; tam-

bién provienen de los efluentes hospitalarios e industriales, así como de productos de desecho de animales de granja que llegan directamente a los sistemas acuáticos (Geissen *et al.*, 2015).

A pesar de la creciente preocupación por la dispersión de estas sustancias a nivel mundial, los contaminantes emergentes aún no están regulados y por lo general no son incluidos en los programas de monitoreo lo que provoca un gran vacío de información sobre las sustancias liberadas a los ecosistemas y sus efectos adversos. Las regiones que cuentan con una mayor cantidad de estudios sobre CE son Estados Unidos, Canadá y Europa. En la Unión Europea se han identificado cientos de sustancias diferentes que año con año se actualizan, mientras que en América Latina el conocimiento sobre los CE que se descargan a los ecosistemas acuáticos es muy incipiente (Llorca *et al.*, 2017; Peña-Guzmán *et al.*, 2019).

La Comisión Europea fundó en 2005 la Red de Laboratorios de Referencia, Centros de Investigación y Organizaciones Relacionadas para el Monitoreo de Sustancias Emergentes (NORMAN, por sus siglas en inglés), que representa uno de los mayores esfuerzos a nivel mundial para la vigilancia de los CE al encargarse de monitorear y concentrar información sobre estos, además de alertar sobre las amenazas al ambiente y la salud. La asociación NORMAN ha clasificado a los contaminantes emergentes dentro de 20 grupos diferentes de acuerdo con su origen, entre los que destacan fármacos, hormonas, productos de uso personal, subproductos de la desinfección, sustancias industriales, plaguicidas y surfactantes, que han sumado cerca de 900 compuestos diferentes. Actualmente, la NORMAN colabora con investigadores de América del Norte

para la creación de una base de datos compartidos en la que se incluyen nuevas sustancias sospechosas y que busca fomentar la colaboración entre investigadores para lograr un consenso para el desarrollo de políticas encaminadas a la regulación de los CE (Dulio *et al.*, 2018).

Los CE representan un gran peligro para la salud humana y los ecosistemas ya que se trata de cientos de sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables. Muchas de estas, fueron diseñadas para maximizar su acción biológica a bajas concentraciones (e.g. fármacos) y por lo tanto generan fuertes efectos adversos en los organismos expuestos. Además, la existencia de mezclas complejas en el medio ambiente puede generar sinergias, favoreciendo una mayor toxicidad que los compuestos simples. A pesar del desconocimiento sobre los efectos ecotoxicológicos de muchas sustancias dentro de este amplio grupo de contaminantes, se ha investigado solamente la toxicidad de algunas. Entre los más estudiados se puede mencionar a la feminización por exposición a estrógenos en la vida acuática. Estos efectos son conocidos como perturbación endocrina y es precisamente esta actividad molecular de alteración, la que es considerada de mayor peligrosidad por sus efectos subletales a largo plazo, impactando a las especies, a la estructura de las comunidades bióticas, a la salud humana; el trastocamiento hormonal también se genera por la exposición a progestágenos, fitoestrógenos, andrógenos e incluso a productos de cuidado personal como fragancias y pantallas solares (Ebele *et al.*, 2017; Barrios-Estrada *et al.*, 2018).

De igual forma, se ha encontrado que los productos cosméticos o de cuidado personal con sustancias como ftalatos, parabenos, biocidas y pantallas solares están

asociados al desarrollo de alergias, obesidad, neurotoxicidad, cáncer, endometriosis y defectos congénitos (Llorca *et al.*, 2017).

El amplio espectro en la toxicidad de los CE y sus mezclas representa una gran amenaza para el equilibrio ecosistémico y la salud humana y por esta razón deben considerarse una prioridad en los planes de monitoreo ambiental. Sin embargo, la enorme cantidad de sustancias existentes es un gran reto en el desarrollo de estrategias de vigilancia ecotoxicológica. Aunado a lo anterior, el riesgo de los CE, no se limita solamente a la enorme cantidad de sustancias existentes sino a la variabilidad espacial y temporal que presentan. Algunos de estos se consideran semipersistentes debido a su estacionalidad, es decir, su utilización se eleva notablemente por temporadas, mientras que otros se consideran persistentes por su continua liberación al ambiente o por la dificultad para ser removidos por procesos convencionales de tratamiento (Ebele *et al.*, 2017; Peña-Guzmán *et al.*, 2019). Los planes de manejo de los CE para la protección de los ambientes marinos necesitan inicialmente la implementación de técnicas específicas de muestreo, así como la resolución de los problemas en las técnicas analíticas para la detección e identificación de sustancias específicas.

Como ya se ha comentado en secciones anteriores, para la mayoría de los contaminantes presentes en los océanos no existe una estrategia regulatoria específica, se encuentran incluidos de forma genérica en diversos acuerdos internacionales, en programas y estrategias generales que requieren ser transformados adecuadamente en planes de acción determinados de acuerdo a la urgencia derivada de la peligrosidad representada por grupos definidos de sustancias y elementos contaminantes, como los

CE dentro de los cuales los plastificantes son de gran interés actual debido a los registros que se están haciendo en diversos ecosistemas costeros y marinos en el planeta; la regulación europea sobre restricción, evaluación y autorización de sustancias químicas (REACH por sus siglas en inglés), la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés), Japón a través de sus Programas Estratégicos sobre Perturbadores Endocrinos Ambientales (SPEED, por sus siglas en inglés), son algunos ejemplos de los esfuerzos internacionales por contener, mitigar y regular la contaminación por este grupo de sustancias tóxicas (Ministry of Environment of Japan, 2010; Deblonde *et al.*, 2011; USEPA, 2016).

Para México, en el contexto gubernamental actualmente se tiene una propuesta institucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) para incluir las herramientas de evaluación toxicológica en la detección de los CE en el camino de impulsar una normatividad nacional para la regulación de estos perturbadores hormonales como se está haciendo en otras regiones del mundo (SEMARNAT, 2014). En el campo de la investigación científica mexicana, particularmente en el estudio de temas ambientales, de contaminación costera y marina se está comenzando a avanzar cada vez en los tópicos sobre los CE; actualmente existe un mayor el registro de datos sobre microplásticos (MP) en diversos ecosistemas costeros que de otro tipo de contaminantes emergentes debido a las limitaciones técnicas y los costos que significan realizar estos análisis complejos; hay reportes de MP en el sur del golfo de México y en el Pacífico mexicano de MP en playas mexicanas así como en diversos compartimentos ambientales costeros como agua, sedimentos y biota contemplando organismos bioindica-

dores y contenido gastrointestinal de peces (Retama *et al.*, 2016; Reyes-Bonilla *et al.*, 2019; Borges *et al.*, 2020; Celis-Hernández *et al.*, 2021) y en menor grado están los estudios nacionales enfocados al registro de los contaminantes químicos del grupo de los emergentes donde están incluidos los plastificantes, entre otros (Borges *et al.*, 2019). Cabe destacar que el mayor número de investigaciones de CE en México ha sido sobre plaguicidas organoclorados debido a su uso histórico en nuestro territorio y a la persistencia ambiental que presentan mucho antes de que fueran considerados como parte de los CE, situación que ya ha sido descrita en la sección anterior en este capítulo.

Los retos derivados de la creciente e incesante presencia de CE en el medio marino y costero, contemplan el establecimiento de programas de monitoreo a mediano y largo plazo integrados a planes de acción más complejos donde formen parte, el manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos, se regule de mejor forma la producción de insumos de cuidado personal y limpieza doméstica limitando el uso de materias primas del tipo de los perturbadores endocrinos, se realicen los inventarios nacionales y se estructure una base de datos internacional de los CE que se definan como prioritarios por su peligrosidad para tomar los acuerdos y las acciones internacionales que disminuyan el impacto sobre la biodiversidad y la salud de los océanos. El aporte exacerbado de CE proveniente de ambientes urbanos y de centros industriales, es la principal causa de su presencia en ecosistemas costeros y marinos, por lo que es fundamental establecer medidas integrales desde estas localidades con las autoridades correspondientes, con la participación social y la comunidad científica para poder

lograr detener y mitigar la gran carga de CE que se envía hacia las costas y mares y disminuir el impacto sobre estos valiosos ambientes y sobre la salud humana dependiente de ellos.

Después de haber presentado de forma sintética el panorama de la contaminación marina para México en el contexto de las tendencias históricas y la realidad actual considerando la participación, los compromisos y las acciones internacionales, los acuerdos regionales y los estudios y esfuerzos locales con algunos ejemplos de zo-

nas identificadas con mayor problemática y aquellas que representan casos de éxito, se cuenta con una serie de consideraciones y de puntualizaciones concretas sobre lo que se recomienda hacer, hacia contribuir verdaderamente en la mejora de la calidad ambiental de nuestras costas y mares y con ello en la mitigación de la contaminación marina para avanzar hacia una adecuada y necesaria salud de los océanos en el compromiso sostenible de nuestro país hacia los océanos que queremos para nosotros y las generaciones futuras.

Consideraciones finales

La conservación de los océanos requiere de la participación integral en varios niveles de organización, es decir, que incluya al gobierno, la academia, la industria y la sociedad, cuya responsabilidad social comienza con el quehacer y pensar cotidiano en el que cada individuo se hace responsable de su papel en la generación de contaminantes y la manera en la que se liberan al ambiente.

Es indispensable que las autoridades y la comunidad científica establezcan programas de vigilancia ambiental marina a mediano y largo plazo, que consideren el manejo de bases de datos ambientales actualizadas con registros adecuados de padecimientos humanos asociados a contaminantes presentes en productos marinos de consumo, para generar controles eficientes de inocuidad y calidad ambiental, principalmente para los contaminantes de mayor riesgo.

Finalmente, para lograr resultados tangibles en la mejora y conservación de la

salud de los océanos y costas, se proponen algunas acciones, las cuales deben estar apoyadas en la aplicación efectiva de la normatividad nacional, principalmente en las fuentes de contaminación, así como en la mejora de la normatividad acorde a la realidad de contaminación marina con la participación de gobierno, academia, sociedad civil e industria:

- Apoyar la investigación costera y marina sobre contaminación y alternativas de producción.
- Establecer ordenamientos de cuencas adecuados.
- Fomentar procesos productivos más eficientes y menos contaminantes.
- Impulsar las alternativas de producción agropecuaria que eviten el uso de agrotóxicos.
- Tener plantas de tratamiento eficientes y suficientes para los residuos peligrosos.
- Cumplir con los acuerdos internacionales sobre todo los de carácter vinculante.

Referencias

- Albert, L. y Viveros, A. 2019. Plaguicidas y Ambiente. RAPAM, CCMSS, Asociación de Productores Orgánicos, Fronteras Comunes, AmSAC, Red Temática de Toxicología de Plaguicidas.
- Alfonso, M. B., Arias, A. H., Menéndez, M. C., Ronda, A. C., Harte, A., Piccolo, M. C., y Marcovecchio, J. E. 2021. Assessing threats, regulations, and strategies to abate plastic pollution in LAC beaches during COVID-19 pandemic. *Ocean & Coastal Management*, 208, 105613.
- Bacanora Lithium. (2021). Sonora lithium. <https://www.bacanoralithium.com/>. Consultado 30/jun/2021.
- Barrera-Escorcía, G. y Wong-Chang, I. 2014. Diagnóstico y tendencias de la contaminación microbiológica en el Golfo de México p. 595-619. En: A.V. Botello, J. Rendón von Osten, J. Benítez, y G. Gold-Boucht (Eds.), Golfo de México, Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias: UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Mérida.
- Barrios-Estrada, C. Rostro-Alanis, M.J. Muñoz-Gutiérrez, B.D. Iqbal, H.M.N. Kannan, S. Parra-Saldívar, R. 2018. Emergent contaminants: Endocrine disruptors and their laccase-assisted degradation A review. *Science of the Total Environment*, 612: 1516-1531.
- Basel, Rotterdam & Stockholm Convention (BRS). 2010. About Synergies. Recuperado de <http://www.brsmes.org/Decisionmaking/Overview/AboutSynergies/tabid/2614/language/es-CO/Default.aspx>
- Bejarano-González, F. 2017. Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A.C. (RAPAM), 351 p.
- Borges-Ramírez, M.M. Caamal, R.D. Rendón-von Osten, J. 201. Occurrence and seasonal distribution of microplastics and phthalates in sediments from the urban channel of the Ria and coast of Campeche, Mexico. *Science of the Total Environment*, 672, 97-105.
- Borges, M.M. Mendoza, E.F. Escalona, G. Rendón, J. 2020. Plastic density as a key factor in the presence of microplastic in the gastrointestinal tract of commercial fishes from Campeche Bay, Mexico. *Environmental Pollution*, 267, 115659.
- Breitburg, D. Levin, L.A. Oschlies, A. Grégoire, M. Chavez, F.P. Conley, D.J. Garçon, V. Gilbert, D. Gutiérrez, D. Isensee, K. Jacinto, G.S. Limburg, K.E. Montes, I. Naqvi, S.W.A. Pitcher, G.C. Rabalais, N.N. Roman, M.R. Rose, K.A. Seibel, B.A. Telszewski, J. Yasuhara, M. y Zhang, J. 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359 (6371).
- Brugnoli E. Arocena R. Cabrera-Lamanna L. Muniz P. 2021. Management and monitoring of eutrophication: Trophic state indexes on the Río de la Plata Northern Coast. In: *Life Below Water -Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, Leal Filho W. Azul A.M. Brandli L. Lange Salvia A. Wall T. (eds), Springer, Heidelberg (Germany). https://doi.org/10.1007/978-3-319-71064-8_114-1.
- Cardoso, A.C. Cochrane, S. Doerner, H. Ferreira, J.G. Galgani, F. Hagebro, C. 2010. Scientific support to the European commission on the marine strategy framework directive. En: *Management Group Report*, ed. H. Piha (Luxembourg: European Commission and International Council for the Exploration of the Sea).
- Carriquiry, J.D. y Horta-Puga, G. 2010. The Ba/Ca record of corals from the Southern Gulf of Mexico: contributions from land-use changes, fluvial discharge and oil-drilling muds. *Marine Pollution Bulletin* 60:1625-1630. DOI:10.1016/j.marpolbul.2010.06.007.
- Castañeda-Chávez, M.R. Lango-Reynoso, F. 2021. Impact of the Jamapa River Basin on the Gulf of Mexico. En: *River Deltas-Recent Advances*, Editor IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.97021. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.97021_2-20.
- Celis-Hernández, O., Ávila, E., Ward, R. D., Rodríguez-Santiago, M. A., y Aguirre-Téllez, J. A. 2021. Microplastic distribution in urban vs pristine mangroves: Using marine sponges as bioindicators of environmental pollution. *Environmental Pollution*, 284, 117391.
- Chen, R. Kim, S. y Chang, Z. 2017. Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications, Redox. En: Kalid M (ed) *Redox - Principles and Advanced Applications*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.68752.
- Cory, R. M., y Kling, G. W. 2018. Interactions between sunlight and microorganisms influence dissolved organic matter degradation along the aquatic continuum. *Limnology and Oceanography Letters*, 3(3), 102-116.

- Costanza, R.R. d'Arge, R. d'Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton y van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630), 253-260.
- da Silva, E.B. de Araújo Neto, J.R. y Lima, B.P. 2017. Similarity during eutrophication of surface waters from the Alto Jaguaribe Basin, Ceará. *Engenharia na Agricultura*, 25 (4), 336-343.
- Deblonde, T. Cossu-Leguille, C. y Hartemann, P. 2011. Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *Int. J. Hyg. Environmental Health*, 214 (6), 442-448.
- Driscoll, C.T. Mason, R.P. Chan, H.M. Jacob, D.J. Pirrone, N. 2013. Mercury as a global pollutant: sources, pathways and effects. *Environmental Science & Technology*, 47: 4967-4983. DOI: 10.1021/es305071v.
- Dulio, V. van Bavel, B. Brorström-Lundén, E. Harmen, J. Hollender, J. Schlabach, M. Slobodnik, J. Thomas, K. Koschorreck, J. 2018. Emerging Pollutants in the EU: 10 Years of Norman in Support of Environmental Policies and Regulations. *Environmental Sciences Europe* 30, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0135-3>.
- Ebele, A.J. Abou-Elwafa Abdallah, M. y Harrad, S. 2017. Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Freshwater Aquatic Environment. *Emerging Contaminants* 3, no. 1: 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2016.12.004>.
- EDF 2021. All about electric car batteries. <https://www.edfenergy.com/electric-cars/batteries>. Consultado 29/junio/2021.
- Field, G.J. Hempel, G. y Summerhayes, C.P. 2020. OCEANS 2020: Science, Trends and the Challenge of Sustainability. IOC-SCOR. Island Press. London. 365 p.
- Flores-Primo, A. Pardío-Sedas, V. Lizárraga-Partida, M.L. López-Hernández, K. Uzcanga-Serrano, R. Flores-Hernández, R. 2014. Seasonal Abundance of Total and Pathogenic *Vibrio parahaemolyticus* Isolated from American Oysters Harvested in the Mandinga Lagoon System, Veracruz, Mexico: Implications for Food Safety. *Journal of Food Protection*, 77(7): 20: 1069-1077.
- Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). 2011. Creación de alianzas para una gestión racional de los productos químicos.
- Gago, J. Booth, A.M. Tiller, R. Maes, T. Larreta, J. 2020. Microplastics Pollution and Regulation, *In: Handbook of Microplastics in the Environment*. pp. 1-27. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10618-8_52-1.
- García-Hernández, J. Leyva-Morales, J.B. Martínez-Rodríguez, I.E. Hernández-Ochoa, M.I. Aldana-Madrid, M.L. Rojas-García, A.E. Betancourt-Lozano, M. Pérez-Herrera, N.E. Perera-Ríos, J.H. 2018. Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34, 29-60. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.esp01.03>.
- Geissen, V. Mol, H. Klumpp, E. Umlauf, G. Nadal, M. van der Ploeg, M. van de Zee, S.E.A.T.M. Ritsema, C.J. 2015. Emerging Pollutants in the Environment: A Challenge for Water Resource Management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1): 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>.
- GESAMP. 2018. Global trends in pollution of coastal ecosystems. En: Ruiz-Fernández, A.C. J.A. Sánchez-Cabeza (Eds) (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 106, 101 p.
- Guerrero-Ruiz, A. Fuentes-Pascacio, J.A. y Lizárraga-Partida, M.L. 2014. Incidencia de vibrios patógenos en ostión *Crassostrea gigas* cultivado en la península de Baja California p. 441-456. En: Botello, A.V. F. Páez-Osuna, L. Méndez-Rodríguez, M. Betancourt-Lozano, S. Álvarez-Borrego y R. Lara-Lara (Eds.). Pacífico Mexicano. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y Tendencias. UAC, UNAM-ICMyL, CIAD-Mazatlán, CIBNOR, CICESE. 930 p.
- Hernández-López, E.L. Gasperin, J. Bernáldez-Sarabia, J. Licea-Navarro, A.F. Guerrero, A. Lizárraga-Partida, M.L. 2019. Detection of *Alcanivorax* spp. *Cycloclasticus* spp. and *Methanomicrobiales* in water column and sediment samples in the Gulf of Mexico by qPCR. *Environmental Science & Pollution Research*. 26: 35131-35139.
- Horta-Puga, G. y Carriquiry, J.D. 2014. The last two centuries of lead pollution in the southern Gulf of Mexico recorded in the annual bands of the

- scleractinian coral *Orbicella faveolata*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92:567-573. DOI 10.1007/s00128-014-1222-9.
- Joshi, S.R. Kukkadapu, R.K. Burdige, D.J. Bowden, M.E. Sparks, D.L. Jaisi, D.P. 2015. Organic matter remineralization predominates phosphorus cycling in the mid-bay sediments in the Chesapeake Bay. *Environmental Science & Technology*, 49(10), 5887-5896.
- Joye, S.B. Bracco, A. Özgökmen, T.M. Chanton, J.P. Grosell, M. MacDonald, I.R. Cordes, E.E. Montoya, J.P. Passow, U. 2016. The Gulf of Mexico ecosystem, six years after the Macondo oil well blowout. *Deep-Sea Research II* 129: 4-19.
- Kumar, R. Sankhla, M.S. Kumar, R. y Sonone, S.S. 2021. Impact of pesticide toxicity in aquatic environment. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(3), 10131-10140.
- Lapointe, B.E. Herren, L.W. Debortoli, D.D. Vogel, M.A. 2015. Evidence of sewage-driven eutrophication and harmful algal blooms in Florida's Indian River Lagoon. *Harmful Algae*, 43, 82-102.
- Ledezma-Hernández, A. 2019. Basura y plásticos en las ciudades costeras de México. p. 573-590. En: Botello, A.V. S. Villanueva y J. Gutiérrez. (Coords.) Costas y Mares Mexicanos: Contaminación, Impactos, Vulnerabilidad y Cambio Climático. UNAM, UAC. 652p. DOI10.26359/epomex.0419.
- Lemley, D.A. Adams, J.B. Bornman, T.G. Campbell, E.E. Deyzel, S.H. 2019. Land-derived inorganic nutrient loading to coastal waters and potential implications for nearshore plankton dynamics. *Continental Shelf Research*, 174, 1-11.
- Le Moal, M., Gascuel-Odoux, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A. y Pinay, G. 2019. Eutrophication: a new wine in an old bottle? *Science of the Total Environment*, 651, 1-11.
- León-Nuñez, D. y Villanueva-Fragoso, S. 2019. Estado actual sobre la presencia de metales y metaloides en las zonas costeras del Golfo de México (2000-2018). p. 93-114. En: Botello A.V. S. Villanueva y J. Gutiérrez (eds.). Las Costas Mexicanas, Contaminación, Impacto Ambiental, Vulnerabilidad y Cambio Climático. UNAM, UAC. 652 p. DOI 10.26359.376639.
- Lizárraga-Partida, M.L. 1996. Microbiología del petróleo en el sur del Golfo de México. p. 265-278. En: A.V. Botello, J.L. Rojas Galaviz, J.A. Benitez, D. Zárate Lomeli (Eds). Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX, serie científica. 5. 666 p.
- Llorca, M., Farré, M., Eljarrat, E., Díaz-Cruz, S., Rodríguez-Mozaz, S., Wunderlin, D., y Barcelo, D. 2017. Review of emerging contaminants in aquatic biota from Latin America: 2002-2016. *Environmental toxicology and chemistry*, 36(7), 1716-1727.
- Lloyd-Smith, M. y Immig, J. 2018. Ocean pollutants guide: toxic threats to human health and marine life.
- López-Hernández K.M. Pardío-Sedas, V. Lizárraga-Partida, M.L. Williams, J.J. Martínez-Herrera, D. Flores-Primo, A. Uscanga-Serrano, R. 2015. Seasonal abundance of *Vibrio cholerae* non O1/non O139 chxA β in oysters harvested in a coastal lagoon of Mexico's Gulf coast: A seafood safety risk concern. *Food Control*, 53: 46-54
- Macias, D. Garcia-Gorriz, E. y Stips, A. 2018. Major fertilization sources and mechanisms for Mediterranean Sea coastal ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 63(2): 897-914.
- Matthews, M.W. y Bernard, S. 2015. Eutrophication and cyanobacteria in South Africa's standing water bodies: A view from space. *South African Journal of Science*, 111 (5): 1-8.
- Ministry of the Environment of Japan. 2010. Further Action to Endocrine Disrupting Effects of Chemical Substances.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONU-FAO). 2019. Avanzan gobierno y sociedad de México en el manejo de sustancias químicas peligrosas y plaguicidas. FAO en México Noticias. Recuperado de <http://www.fao.org/mexico/noticias/detail-events/es/c/1190367/>.
- Panizzo, V.N. Roberts, S. Swann, G.E. McGowan, S. Mackay, A.W. Vologina, E. Pashley, V. y Horstwood, M.S. 2018. Spatial differences in dissolved silicon utilization in Lake Baikal, Siberia: Examining the impact of high diatom biomass events and eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 63(4): 1562-1578.

- Peña-Guzmán, C. Ulloa-Sánchez, S. Mora, K. Helena-Bustos, R. López-Barrera, E. Alvarez, J. Rodríguez-Pinzón. M. 2019. Emerging Pollutants in the Urban Water Cycle in Latin America: A Review of the Current Literature. *Journal of Environmental Management* 237: 408-23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>.
- Peters, J.F. Baumann, M. Zimmermann, B. Braun, J. 2017. The environmental impact of Li-ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 491-506. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>.
- Piroddi, C. Akoglu, E. Andonegi, E. Bentley, J.W. Celić, I. Coll, M. Dimarchopoulou, D. Friedland, R. de Mutsert, K. Girardin, R. Garcia-Gorriç, E. Grizzetti, B. Hervann, P.-Y. Heymans, J.J. Müller-Karulis, B. Libralato, S. Lynam, C.P. Macia, D. Miladinova, S. Moullec, F. Palialexis, A. Parn, O. Serpetti, N. Solidoro, C. Steenbeek, J. Stips, A. Maciej, T. Tomczak, M.T. Travers-Trolet, M. Tsikliras, A.C. 2021. Effects of nutrient management scenarios on marine food webs: A Pan-European Assessment in support of the Marine Strategy Framework Directive. *Frontiers in Marine Science*, 8, 179.
- Ponce-Vélez, G. y Botello, A.V. 2018. Plaguicidas organoclorados en organismos costeros y marinos de los litorales mexicanos: Una Revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34: 81-98. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.esp02.07>.
- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2000. América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente. GEO 2000, 145 p.
- Retama, I. Jonathan, M.P. Shruti, V.C. Velumani, S. Sarkar, S.K. Roy, Priyadarsi D. Rodríguez-Espinosa, P.F. 2016. Microplastics in tourist beaches of Huatulco Bay, Pacific coast of southern Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 113: 530-535.
- Reyes-Bonilla, H. Alvarez-Filip, L. Rivera-Garibay, O. Perez-España, H. Santillo, D. Olivera-Bonilla, A. Perez-Cervantes, E. Rivas-Soto, M. (2019). Study on the Impact of Microplastic Pollution on Fish in Mexico. <https://storage.googleapis.com/planet4-mexico-stateless/2019/10/01f918b5-estudio-sobre-el-impacto-de-la-contaminacion-por-microplasticos-en-peces-de-mexico.pdf>.
- Romero-Jarero, J. Ferrara-Guerrero, M.J. Lizárraga-Partida, M.L. Rodríguez-Santiago, H. 1986. Variación estacional de las poblaciones de enterobacterias en la Laguna de Términos, Campeche, México. *An. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 13: 73-86.
- Secretaría de Marina (SEMAR). 2021. Protección al medio ambiente. Recuperado de <https://www.gob.mx/semar/es/articulos/proteccion-al-medio-ambiente-marino?idiom=es>.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2007. Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo.
- SEMARNAT. 2014. Programa institucional del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 2014–2018.
- SEMARNAT. 2020. Contribución determinada a nivel nacional. Versión actualizada 2020. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, CDMX. 44 pp.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA). NOM-242-SSA1-2009. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5177531&fecha=10/02/2011.
- Sharma, A. Kumar, V. Shahzad, B. Tanveer, M. Sidhu, G.P.S. Handa, N. Thukral, A.K. 2019. Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1(11): 1-16.
- Stockholm Convention. 2017. Report on the effectiveness evaluation of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.
- Soto-Jiménez, M.F. Hibdon, S.A. Rankin, C.W. Aggarawal, J. Ruiz-Fernández, A.C. Páez-Osuna, F. Flegal, A.R. 2006. Chronically a century of lead pollution in Mexico: stable lead isotopic composition analyses of dated sediment cores. *Environ. Science and Technology*, 40: 764-770.
- Soto, L.A. Botello, A.V. Licea-Durán, S. Lizárraga-Partida, M.L. Yáñez-Arancibia, A. 2014. The environmental legacy of the Ixtoc-I oil spill in Campeche Sound, southwestern Gulf of Mexico. *Frontier in Marine Science* 1, 57: 1-9.
- Surfrider. (2020). Chemical pollution of the ocean: the pesticide issue. Recuperado de <https://surfrider.eu/en/learn/news/chemical-pollution-of-the-ocean-the-pesticide-issue-121131209634.html#:~:text=Over%20the%20last%20decade%2C%20scientific,25%25%20increase%20of%20pesticides%20use.&text=These%20streams%2C%20before%20reaching%20the,amplified%20impact%20on%20the%20ocean>.

- Tolba, M.K. 1992. Saving our Planet: Challenges and hopes. United Nations Environment Programme. Chapman & Hall, London, UK. 287p.
- Tong, Y. Zhao, Y. Zhen, G. Chi, J. Liu, X. Lu, Y. Wang, X. Yao, R. Chen, J. Zhang, W. 2015. Nutrient loads flowing into coastal waters from the main rivers of China (2006–2012). *Scientific Reports*, 5 (1): 1-12.
- Tromboni, F. y Dodds, W.K. 2017. Relationships between land use and stream nutrient concentrations in a highly urbanized tropical region of Brazil: thresholds and riparian zones. *Environmental Management*, 60(1): 30-40.
- UNCLOS. 1982. United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982. Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea.
- UNEP. 2018. Informe sobre la Brecha de Emisiones 2018. UN Environment. Rep. ONU. URL <https://www.unenvironment.org/es/resources/informe-sobre-la-brecha-de-emisiones-2018> (accessed 11.9.20).
- UNEP. 2018. Límites legales de los productos de plástico desechables y los microplásticos: examen a escala mundial de las leyes y los reglamentos nacionales.
- United State Environmental Protection Agency (USEPA). 2016. Table of Regulated Drinking Water Contaminants. <https://www.epa.gov>.
- van Beusekom, J.E. 2018. Eutrophication. In: Handbook on Marine Environment Protection, M. Salomons y T. Markus (Eds). Springer, Heidelberg (Germany), Ch.22, pp. 429-445 (1001 pp). ISBN: 978-3-319-60156-4.
- Van Cappellen, P. y Maavara, T. 2016. Rivers in the Anthropocene: global scale modifications of riverine nutrient fluxes by damming. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 16(2): 106-111.
- Wilkinson, J. Hooda, P.S. Barker, J. Barton, S. Swinden, J. 2017. Occurrence, Fate and Transformation of Emerging Contaminants in Water: An Overarching Review of the Field. *Environmental Pollution*, 231: 954-70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.032>.
- Williams, C.J. Frost, P.C. Morales-Williams, A.M. Larson, J.H. Richardson, W.B. Chiandret, A.S. Xenopoulos, M.A. (2016). Human activities cause distinct dissolved organic matter composition across freshwater ecosystems. *Global Change Biology*, 22(2): 613-626.
- Zhao, Z. Cao, Y. Fan, Y. Yang, H. Feng, X. Li, L. Zhang, H. Xing, L. Zhao, M. 2019. Ladderane records over the last century in the East China sea: Proxies for anammox and eutrophication changes. *Water Research*, 156: 297-304.
- Zhu C. Tian, H. Hao, J. 2020. Global anthropogenic atmospheric emission inventory of twelve typical hazardous trace elements, 1995–2012. *Atmospheric Environment*, 220: 117061. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117061>.