Navarrete-Hernández,M.A., Escobar-Briones,E., Spalding, M., Dobush, B-J. Jiménez Nava, F. (Coordinadores). 2023. Desarrollo de estrategias nacionales de investigación y desarrollo en México. p.429-470. En; Rivera-Arriaga E., Azuz-Adeath, 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/EPOMEX01202315

Desarrollo de estrategias nacionales de investigación y desarrollo en México

M. A. Navarrete-Hernández, E. Escobar-Briones, M. Spalding, B-J. Dobus, F. Jiménez Nava (Coordinadores)

Resumen

Para apoyar la Década de los Océanos, la comunidad científica marina mundial debe dar prioridad al "desarrollo sostenible" y a la "restauración de la abundancia" sobre la mejora de la comprensión básica del océano. Una ciencia más pragmática y aplicada es necesaria para abordar los problemas existentes y emergentes en lugar de ciencia para satisfacer únicamente la curiosidad por lo desconocido. Esta ciencia pragmática debe orientarse a ayudar a conseguir un océano sano con una abundancia restaurada que alimente a las personas, nutra la función de los ecosistemas y proporcione resiliencia climática. Los programas existentes han reconocido que los ecosistemas marinos están menos documentados que sus homólogos terrestres y en peligro por las presiones del crecimiento desordenado de las zonas costeras, la entrada de aguas residuales, la sobreexplotación de los recursos pesqueros, la contaminación y los desechos plásticos, y el cambio climático ocasionando la pérdida y degradación de la biodiversidad. La obtención de datos sigue siendo la principal brecha de conocimiento, junto con la capacidad y la infraestructura, para monitorear los cambios a largo plazo. La toma de decisiones sobre la restauración de los océanos, la rehabilitación de los ecosistemas marinos, y la recuperación de especies requiere los mejores conocimientos disponibles basados en investigación científica. Entre los mayores retos se encuentran la promoción y difusión de los conocimientos

científicos sobre los océanos y su integración con los conocimientos locales y tradicionales para reforzar la política nacional sobre los océanos, la gobernanza y la toma de decisiones. El acceso de los ciudadanos a la información sobre los océanos, de forma culturalmente relevante a través de programas de alfabetización oceánica para cambiar la percepción de un océano distante a un océano que define cada día de nuestras vidas en este planeta, incluso para aquellos que no habitan en las costas. La gran oportunidad de la Década de los Océanos es reducir la falta de datos y conocimientos sobre los océanos mediante programas de alfabetización oceánica, desarrollo de capacidades, y el acceso a programas tecnológicos. Más concretamente, las acciones emprendidas a través de la Década de los Océanos deben defender y promover la importancia de realizar observaciones oceánicas sistemáticas y sostenidas para la sociedad, junto con el apoyo al desarrollo de capacidades. También deben garantizar el acceso a tecnologías e instrumentos oceánicos rentables y fáciles de usar para ofrecer soluciones viables que se adapten a las necesidades científicas y sociales de los usuarios y que sirvan de base para la toma de decisiones a todos los niveles.
Palabras clave: Investigación y desarrollo oceanográfico, ciencia, Década de las Naciones Unidas para las Ciencias del Mar en México.

Abstract

To support the Ocean Decade, the global marine science community must prioritize "sustainable development" and "restoring abundance" over improving basic understanding of the ocean – more pragmatic and applied science is needed to address existing and emerging issues instead of science to solely satisfy curiosity about the unknown. Such pragmatic science should lean toward helping achieve a healthy ocean with restored abundance that will feed people, nurture ecosystem function, and provide climate resilience. The existing programs have recognized that the marine ecosystems are less documented than their terrestrial counterparts and that they are also endangered by the pressures from the disorderly growth of coastal areas, the input of residual water, overexploitation of fishery resources, pollution and plastic litter, and climate change causing biodiversity loss and degradation. Data acquisition is still the major gap, together with capacity and infrastructure, to monitor changes in the long term. Decision-making on ocean restoration, marine ecosystem rehabilitation, and the recovery of species requires the best available knowledge based on scientific research. Among the recognized challenges are the promotion and dissemination of ocean scientific knowledge and its integration with local and traditional knowledge to strengthen national ocean policy, governance and decision making. Access to ocean information by citizens, in a culturally relevant way through ocean literacy programs, is urgently required to change the perception of a distant ocean to an ocean that defines every day of our lives on this planet, even for those who live in large urban areas at high altitudes.
The great opportunity of the Ocean Decade is to reduce the gaps in ocean data and knowledge through ocean literacy, capacity development, and access to technology programs. More specifically, actions taken through the Ocean Decade must advocate and promote the importance of making systematic and sustained ocean observations for society along with support for developing capacity. They should also ensure access to cost-effective, easy-to-use ocean technology and instrumentation to deliver viable solutions that can fit users' scientific and societal needs and inform decision making at all levels.
Keywords: Oceanographic research and development, science, UN Decade of Ocean Science in Mexico

La perspectiva internacional de los programas para el desarrollo de estrategias nacionales de investigación y desarrollo

Introducción

A continuación, se presenta un breve análisis sobre los principales avances, retos, oportunidades y brechas de información y conocimiento que existen en relación con el desarrollo de estrategias nacionales de investigación y desarrollo a nivel internacional, especialmente en relación con el Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible ("Década de los Océanos").

¿Qué es exactamente la investigación y el desarrollo (I+D)?

Según la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Cultura y la Ciencia (UNESCO), "la investigación y el desarrollo experimental (I+D) comprenden el trabajo creativo y sistemático emprendido para aumentar el acervo de conocimientos, incluidos los conocimientos de la humanidad, la cultura y la sociedad para idear nuevas aplicaciones del conocimiento disponible ". El término I+D abarca tres tipos de actividades: investigación básica, investigación aplicada, y el desarrollo experimental. Para ser considerada una actividad de I+D, una actividad debe satisfacer cinco criterios fundamentales, que deben de ser:

- Novedosos (debe dirigirse a los nuevos descubrimientos)
- Creativa (debe basarse en conceptos e hipótesis originales, no obvios)
- Incierta (no estar seguro del resultado final)
- Sistemática (debe ser planificada y presupuestada)
- Transferibles y/o reproducibles (que den lugar a resultados que puedan reproducirse)".[1]

¿De qué manera la I+D aportan a la Década de los Océanos

El lema de la Década de los Océanos, "la ciencia que necesitamos para el océano que queremos", es excelente para establecer una visión amplia sobre los retos y amenazas así como, oportunidades que prevalecen en los ecosistemas marinos y costeros. Sin embargo, para establecer objetivos concretos, la comunidad científica marina mundial debe suponer matices a esa visión. Una mejor comprensión del océano, por sí sola, no conducirá automáticamente al "océano que queremos". El mero conocimiento no necesariamente se puede traducir a una acción concreta de forma inmediata. Creo que este es mas bien el caso. Necesitamos una ciencia orientada a las soluciones que se incline hacia el "desarrollo sostenible" en beneficio, y con la participación, de los pueblos que dependen del océano. El verdadero objetivo es crear capacidad científica y generar conocimientos que contribuyan directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), especialmente el ODS 14

[1] http://uis.unesco.org/en/glossary-term/research-and-experimental-development-rd

"Vida submarina". Esto incluye subobjetivos como la reducción de las fuentes terrestres y marítimas de contaminación marina (ODS 14.1) y la mejora de las soluciones de gestión de los ecosistemas marinos frente a las amenazas múltiples y acumulativas (ODS 14.2 y 14.5), incluida la acidificación de los océanos (ODS 14.3).

Un enfoque basado en los ODS debería dar como resultado un océano limpio y saludable, con productividad y abundancia restauradas, así como una resiliencia costera natural para proteger vidas y medios de subsistencia. Como parte de este proceso, la comunidad científica mundial también trabajará para mejorar nuestra capacidad de predecir las condiciones cambiantes de los océanos, anticipar dónde se producirán esos cambios (por ejemplo, la migración de especies) y mejorar la forma en que las sociedades valoran y entienden el océano global.

La Década de los Océanos busca gestionar datos y conocimientos a través de un esfuerzo de diez años, estableciendo el ecosistema digital de la Década de los Océanos:

El ecosistema digital de la Década de los Océanos contribuirá a la comprensión del océano utilizando datos históricos, contemporáneos, y modelados para describir las condiciones pasadas y actuales y predecir las condiciones oceánicas futuras. Las fuentes de datos incluirán la industria y la ciencia ciudadana, así como fuentes de datos menos cuantificables, como los conocimientos tradicionales (indígenas y locales). El desarrollo del ecosistema digital superará las barreras existentes, incluidos los diferentes niveles de capacidad y acceso a la tecnología y el potencial informático, la fragmentación y el almacenamiento de datos y los impedimentos para el intercambio de datos, incluidos el lenguaje y los conjuntos de datos ocultos o subexplotados.

El ecosistema digital de la Década de los Océanos cataliza la cooperación entre los generadores de conocimientos y los diversos grupos de usuarios, incluidos los gobiernos, las entidades de las Naciones Unidas, los científicos, los planificadores y los responsables de la toma de decisiones, así como la industria y las comunidades. Estos usuarios deben poder acceder, evaluar, e influir en los datos y conocimientos generados para que respondan a sus necesidades y medios de vida.

Para garantizar que todas las partes interesadas tengan las habilidades y puedan acceder a la tecnología necesaria para generar información y conocimientos, interpretar y utilizar los datos, las iniciativas relacionadas con los datos de la Década de los Océanos se vincularán con iniciativas de desarrollo de capacidades y transferencia de tecnología marina cuando sea pertinente.[2]

¿De qué manera las Estrategias Nacionales pueden atender las carencias y vacíos de las Ciencias Oceánicas Internacionales en I&D?

Las estrategias nacionales deben abordar los vacíos en la investigación y el desarrollo de las ciencias oceánicas, incluida la necesidad de una financiación diversa y equitativa, además de un enfoque en el desarrollo sostenible y la ciencia abierta.

[2] Plan de aplicación de la Década de los Océanos: Resumen (en la página 14) https://www.oceandecade.org/wp-content/uploads//2021/09/337521-Ocean%20Decade%20Implementation%20Plan:%20Summary

Los inversores en investigación y desarrollo oceánico han sido criticados por perseguir las prioridades de las naciones desarrolladas mientras descuidan las prioridades determinadas localmente. Además, el financiamiento transnacional de la ciencia se utiliza a menudo para promover los objetivos geopolíticos de ciertas naciones desarrolladas, independientemente del lugar en el que se lleve a cabo su investigación en ciencias oceánicas. Tales objetivos se persiguen a menudo a expensas de los recursos y las comunidades locales, y con demasiada frecuencia, alimentan intereses mercantiles, extractivos y coloniales. Esto ha incluido el desarrollo de tecnologías para localizar, extraer y almacenar los recursos marinos (por ejemplo, la biodiversidad costera, pesquerías de alta mar, energía y recursos minerales del fondo marino). Lo que comenzó como disparidades de acceso y capacidad se traduce en brechas significativas en la riqueza debido a la distribución desigual de los recursos marinos de todo tipo. Esto refleja cómo se financia y utiliza la ciencia, no la ciencia en sí. La ciencia no conduce inherentemente a brechas en la riqueza. De hecho, puede crear capacidad e informar sobre la gestión sostenible de los recursos. Si el conocimiento y la tecnología son compartidos, inclusivos y abordan preocupaciones o preguntas impulsadas localmente, la ciencia puede ayudar a reducir esas brechas.[3]

Las naciones costeras necesitan un modelo científico abierto de acumulación de información, cotejo, síntesis e intercambio de información, que incluya la transferencia de tecnología, datos y conocimientos. Esto permitirá una comprensión más colectiva del océano. Esto puede ser un desafío para los regímenes tradicionales de propiedad intelectual que han alentado e incentivado al sector privado para comercializar los resultados de la ciencia básica [por ejemplo, la expansión de la capacidade de partentar las "invenciones" (productos) para incluir también los "descubrimientos" (el conocimiento detrás de los productos)].

Promoviendo la contribución de México a la I+D internacional en ciencias oceánicas

La Década de los Océanos presenta una oportunidad de desarrollo tecnológico de crear un "Océano Seguro, un Océano Previsible y un Océano Transparente". ¿Qué significaría poder pronosticar con antelación tsunamis con cables inteligentes, predecir mejor los fenómenos meteorológicos extremos, o integrar un conjunto de datos ambientales para ayudar a los pescadores artesanales a abastecer mejor a sus comunidades?

La "hoja de ruta" para la aplicación de la Década de los Océanos prevé que las áreas prioritarias de investigación y desarrollo incluyan la creación de un atlas digital del océano; la puesta en marcha de un sistema completo de observación de los océanos; el desarrollo de una comprensión cuantitativa de los ecosistemas oceánicos y de su funcionamiento la mejora de un sistema de alerta de peligros múltiples relacionados con los océanos; y la ampliación de los programas de creación de capacidades, educación y alfabetización oceánica.[4]

[3] www.equisea.org
[4] Hoja de ruta revisada para el Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265141.

La contribución de México a la I+D en ciencias oceánicas, especialmente en el marco de la Década del Océano

Relación de México con los océanos y con las ciencias oceánicas en investigación y desarrollo

México tiene una Zona Económica Exclusiva de 3.27 millones de kilómetros cuadrados, ubicandose en el puesto 13 de las naciones del mundo. De ellos, el océano Pacífico representa el 74 %, y el golfo de México y el mar Caribe el 26 %. Su litoral se extiende a lo largo de 11.122 km (figura 1). México se encuentra entre las 16 naciones de la iniciativa del Grupo de Alto Nivel para la Economía Oceánica Sostenible. Estas naciones represntan al menos 45 % de las costas del mundo y casi el 35 % de las zonas económicas exclusivas del mundo (Stuchtey *et al.*, 2020).[5]

México debe emprender una serie de medidas como contribuyente a la Década de los Océanos que aumenten la inversión en ciencias oceánicas para la sostenibilidad y que mejoren la capacidad de las comunidades dependientes del océano para comprender y mantener la salud de los recursos de los que dependen. Dado al papel que México debe desempeñar en la salud del océano global, así como la importancia de

Figura 1. Zonificación y regiones costeras de México.

[5] Ver: https://www.oceanpanel.org/about

las aguas costeras y oceánicas para apoyar su economía. La investigación científica oceánica genera conocimiento dependiente del capital intelectual, que se ha considerado durante décadas como un recurso importante para el crecimiento económico. Los servicios de datos e información oceánicos apoyan a aquellos cuyas vidas y medios de subsistencia dependen del océano.

Visión de México para la Década de los Océanos

México necesitará desarrollar una visión estratégica que presente oportunidades políticas clave para optimizar las inversiones en investigación y desarrollo y la planificación relacionada con la Década del Océano. Esto permitirá sentar las bases para desarrollar enfoques coordinados y mejorados para las inversiones en inverstigación y desarrollo que aborden las necesidades a corto y largo plazo nacionales.

Esta visión debe incluir infraestructura, equipamiento y sistemas utilizados por las comunidades científicas y técnicas para llevar a cabo investigación y desarrollo, también para fomentar la innovación en las ciencias oceánicas.

Las Naciones Unidas han pedido que se establezcan Comités Oceánicos Nacionales para que la comunidad oceánica de cada país participe en el desarrollo de iniciativas y facilitación de la coordinación de las actividades de la Década de los Océanos. México ha creado un Comité Nacional de los Océanos y le ha encomendado la tarea de involucrar y coordinar la participación de su comunidad científica en la Década del Océano.[6] La Secretaría de Educación Pública (SEP) alberga al Punto Focal de Coordinación en México para los programas de la UNESCO-COI. Trabajarán en conjunto con la Dirección General de Educación Media Superior, Tecnología Agropecuaria y Ciencias del Mar de la SEP. Este es el Punto Focal de Coordinación de México (CONALMEX) con la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) y la Subcomisión IO Caribe para el Comité Mexicano para el Decenio de los Océanos.

Marco nacional para las ciencias oceánicas en México: cambio climático, oceanografía, biodiversidad marina y objetivos de desarrollo sostenible 2030

Los programas y estrategias nacionales para actividades de investigación y desarrollo tecnológico oceánico en México se llevan a cabo principalmente en universidades y centros de investigación, tanto públicos como privados. Un vacío importante es un inexistente programa nacional de océanos y una incipiente inversión en investigación oceánica, capacidad e infraestructura para generar conocimiento oceánico y gestionar y proveer datos oceánicos para apoyar la toma de decisiones a nivel federal. En promedio, los países destinan el 1.7 % de los presupuestos nacionales de investigación para la ciencia oceánica (GOSR2020)[7]. Esta cantidad se ha comparado con la contribu-

[6] En el momento de redactar este documento, sólo Brasil, Finlandia, Alemania y Estados Unidos han creado sus Comités Nacionales del Decenio, y sólo 20 países han identificado puntos de contacto para ello (México es uno de ellos). https://www.oceandecade.org/national-ocean-decade-ecosystem/

ción del océano a la economía mundial y se ha definido como insignificante.

México destina el 0.41 % de su Producto Interno Bruto (PIB) a Ciencia y Tecnología (UNESCO, 2021), por lo que el presupuesto para la investigación oceánica debe aumentar en los próximos años. Los desafíos incluyen cambiar la mentalidad con respecto a la ciencia prioritaria en el país y comprender y explicar cómo la adquisición de datos y conocimientos del océano conducirá al éxito económico. Será necesario un cambio de comportamiento cultural. Será necesario que la comunidad científica, la industria y el gobierno se asocien y diseñen conjuntamente proyectos para hacer frente a los riesgos relacionados con los océanos, garantizar condiciones oceánicas limpias, saludables y productivas, e informar sobre cómo los ciudadanos y el gobierno se preparan para el cambio climático.

Estrategias nacionales de investigación y desarrollo en materia de cambio climático

Las zonas costeras son de gran valor socioeconómico y apoyan los sectores económicos, incluídos el transporte marítimo, la pesca, la extracción de recursos naturales y el turismo. Los humedales costeros se pierden debido al crecimiento urbano y la degradación ambiental. El cambio climático agrava estas pérdidas a través del aumento del nivel del mar, las marejadas ciclónicas, las inundaciones, el calentamiento del agua, la desoxigenación, la acidificación del océano, y la llegada masiva de sargazo a aguas poco profundas y playas. Estas amenazas tienen un alto costo para las comunidades costeras y contribuyen a la degradación de los ecosistemas. El Programa Sectorial de Medio Ambiente derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 reconoce que el 68 % de la población es vulnerable al cambio climático, y el 71 % del PIB se ha invertido en la recuperación de sus impactos. La observación sistemática de los océanos es necesaria para documentar el cambio climático, fortalecer los modelos necesarios para la planificación y lograr mejores capacidades de pronóstico para disminuir los riesgos para las comunidades y ecosistemas costeros.

La Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y el Programa Especial de Cambio Climático 2021-2024 (figura 2) son instrumentos de planificación para la reducción de riesgos que guían al gobierno federal para encontrar soluciones responsables. Esta iniciativa sobre cambio climático, liderada por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), es el mecanismo de acción administrativo nacional. Reforzada por un sólido conocimiento científico, esta iniciativa ayuda a reconocer vulnerabilidades y sugerir acciones de mitigación para las personas, la industria y la infraestructura, así como acciones transversales.

Estas acciones se contemplan en un plazo de 10-20-40 años. Apegadas a la Ley General de Cambio Climático en México; sus objetivos y metas se ajustan o modifican en consecuencia para cumplir con el Acuerdo de París. Seis grupos de trabajo y un comité de reducción de emisiones y captura de gases de efecto invernadero ayudan a lograr los objetivos de la Estrategia Nacional de Cambio Climático. La observación del océano en apoyo a la Estrategia de Cambio Climático en México incluye:

[7] Global Ocean Science Report 2020.

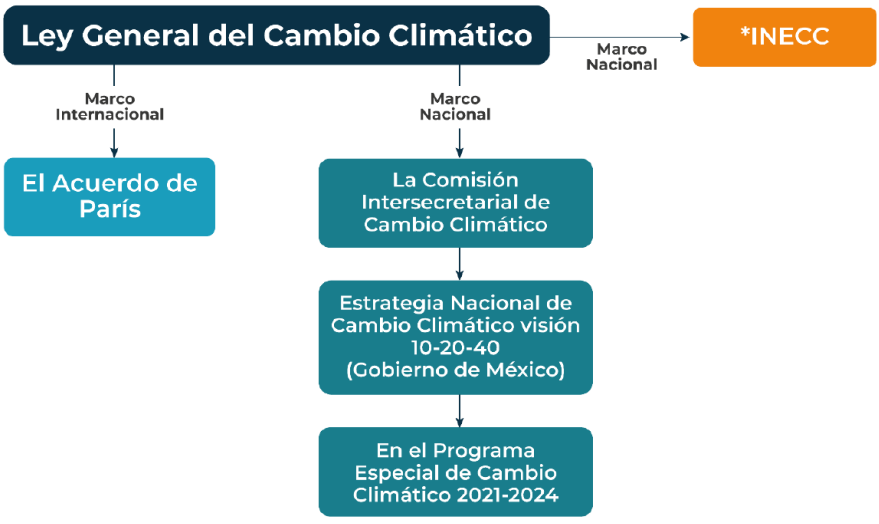

Figura 2. Estrategias nacionales de investigación y desarrollo en Cambio Climático..

- **Mediciones de balance de CO_2 en humedales costeros y ecosistemas oceánicos costeros.** Estas son parte de las acciones que realiza el Programa Mexicano del Carbono (http://pmcarbono.org/pmc/); uno de sus seis temas es evaluar los flujos de carbono en los ecosistemas acuáticos, incluídos los costeros y el océano abierto.
- **Cambio en el nivel del mar y mareas.** Estas observaciones han sido registradas, procesadas y publicadas por el Servicio Nacional de Mareas (http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=tiposMarea) desde los años 40 por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La ampliación de la línea de tiempo del Servicio Nacional de Mareas permite predecir mejor los cambios con marejadas, tormentas y huracanes. Los esfuerzos de colaboración han reforzado su capacidad.
- **Temperatura del océano.** Las temperaturas costeras y de la superficie del mar a largo plazo se han registrado a través de monitoreos con el apoyo de sensores remotos, planeadores y otros vehículos autónomos. La temperatura ha sido medida sistemáticamente durante una década en tres localidades costeras por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM. La temperatura de la superficie se ha registrado desde mediados de 1970, en conjunto con la comunidad internacional de observadores del océano; el uso de sensores remotos ha sido una gran herramienta. Varias instituciones y sus programas observan sistemáticamente el océano, y la mayoría de las bases de datos son de acceso abierto. [CICESE, SIMAR de la CONABIO (https://simar.conabio.gob.mx/), LANOT de la UNAM (http://www.lanot.unam.mx/) y BITSMEX de la UNINMAR (http://uninmar.icmyl.unam.mx/),

CENDO de la UABC, EPOMEX)].

El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la UNAM ha medido sistemáticamente la temperatura durante una década en tres lugares costeros. La temperatura de la superficie se registra desde mediados de los años 70, cuando México se asoció con la comunidad internacional de observadores del océano; el uso de sensores remotos ha sido una gran herramienta

El Programa Sectorial de Medio Ambiente derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 reconoce estrategias prioritarias (EP) y acciones específicas (AE) que integran la importancia del conocimiento derivado de la investigación en temas de cambio climático, desarrollo, educación y desarrollo de capacidades (EP 2.5, AE 2.5.1) para la toma de decisiones; sin embargo, éstas no son específicas de los ecosistemas marinos del océano.

Desafíos

El estrés ambiental causado por el cambio climático define el océano costero de este siglo. Un desafío importante reconocido es el mantenimiento de los principios rectores de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, a pesar de la reciente cancelación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. La resiliencia de los ecosistemas marinos a los efectos del cambio climático y la vulnerabilidad de su diversidad biológica requiere un mecanismo nacional de coordinación, así como la cooperación y armonización entre los actores involucrados en los océanos y el cambio climático. Otros posibles desafíos incluyen la implementación de un sistema de gobernanza nacional de cambio climático visible en los océanos y la integración de un sistema de gobernanza fragmentado con todos los sectores participantes.

Oportunidades y vacíos

El océano y su importancia para el cambio climático deben estar claramente definidos en las estrategias nacionales de investigación y desarrollo de México. Los resultados de la observación de los océanos que se entregarán en el marco del ODS 14 de la Agenda 2030 deben ampliarse a otros indicadores además del cambio en la cobertura de las áreas protegidas (Objetivo 14.5.1) y la proporción del presupuesto federal para la investigación científica y el desarrollo experimental asignado a la Marina[8] (Objetivo 14.a.1).

Se requiere un mayor esfuerzo para garantizar que el océano se integre en los programas nacionales de cambio climático y los instrumentos climáticos nacionales, reconociendo al océano como una solución al crecimiento económico nacional. Entre las brechas se encuentran la observación oceánica y la investigación oceánica en cuanto a cambio climático para abordar a nivel nacional los cambios en la acidificación y la desoxigenación. Se requieren estrategias de comunicación para explicar cómo los servicios de los ecosistemas costeros, los alimentos sostenibles y el bienestar social cambiarán con el cambio climático; también es importante abordar la compleja sinergia del cambio climático con la entrada de basura, contaminantes, sobrepesca,

[8] Promover la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el ámbito naval busca asegurar la autonomía técnica institucional y logística, proyectos que satisfagan las demandas en materia de comunicaciones, mando y control, inteligencia, sistemas de armas, navegación y monitoreo de máquinas, entre otros, que buscan mejorar las capacidades de los buques, aeronaves y unidades terrestres (DOF: 03/07/2020 Programa Sectorial de la Armada 2020-2024, Objetivo 5).

pérdida de hábitat y nuevas actividades oceánicas y costeras.

Ante la creciente crisis del cambio climático, las pérdidas y los daños ambientales, se necesitan medidas significativas para apoyar la toma de decisiones informadas y brindar a la sociedad mejores oportunidades para mitigar y adaptarse al cambio climático y oceánico.

Estrategias nacionales para la investigación y el desarrollo: el Programa Oceanográfico

El cambio ocurre con el tiempo, por lo cual se deberán de preveer éstos cambios, en cómo México ha usado y está usando su territorio y sus recursos, o cómo cambian sus océanos con este uso y cuánto se ha invertido, y se estará invirtiendo en conocimiento oceánico. Mejorar los procesos de planificación y gestión de los océanos para que estén oportunamente informados por el mejor conocimiento científico disponible ayudan a que la toma de decisiones y el crecimiento nacional sean compatibles con la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales. La mayoría de los riesgos derivados del océano para las comunidades locales tienen su origen en fenómenos hidrometeorológicos, geológicos y biológicos. La observación sistemática de los océanos, la inversión en el fortalecimiento institucional a largo plazo, el desarrollo de la capacidad para llevar a cabo investigaciones y los desarrollos tecnológicos contribuyen a la adquisición de datos, lo que resulta en pronósticos más precisos para prevenir y minimizar las amenazas.

La última versión del Programa Nacional de Investigación Oceanográfica (PNIO)[9] reconoce mecanismos de coordinación en investigación por tres comités con diferentes niveles de organización (figura 3):

- La Comisión Intersecretarial de Investigaciones Oceanográficas (CIIO) coordina las actividades de investigación oceanográfica, rescate y exploración submarina.
- La Comisión Nacional Coordinadora de la Investigación Oceanográfica (CONACIO) incluye la investigación oceánica independiente. CONACIO analiza, propone, y coordina acciones para lograr el uso sostenible de los recursos y evitar la duplicación de esfuerzos y gastos financieros, prepara el Programa Nacional de Investigación Oceanográfica e integra los datos en el Archivo Nacional de Información Oceanográfica (AION) con el apoyo de un Comité Técnico.
- La Comisión para el Manejo Sustentable de Mares y Costas (CIMARES) de la Administración Pública Federal se enfoca en los temas transversales oceánicos prioritarios y está estrechamente vinculada a la CONACIO. Sus prioridades temáticas son la contaminación, la pesca, el turismo y la infraestructura. Se reconocieron necesidades de investigación en oceanografía geológica, física, química y biológica, observación y modelación, riesgos oceánicos y cambio climático.

La estrategia coordinada que prevé las necesidades de investigación oceánica reconoce los programas y proyectos prioritarios de investigación científica, el desarrollo de tecnología y el desarrollo de capacidades asociadas. Se trata de una política nacional de mares y costas que se estructura conjun-

[9] Publicado en el Diario Oficial de la Federación 06/05/2016.

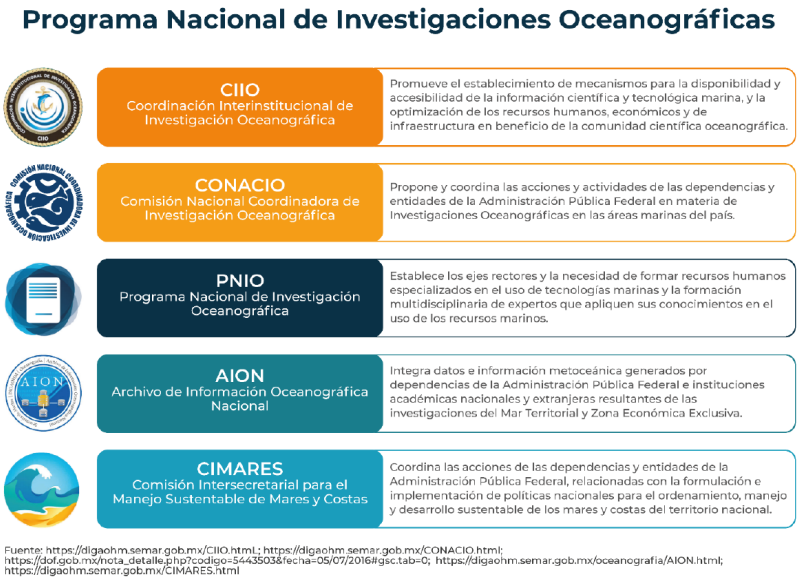

Figura 3. Mecanismos y comités de coordinación de investigación en diferentes niveles de organización. Fuente: SEMAR

tamente con la CIMARES. Esta política oceánica define y coordina acciones utilizando la mejor información científica y tecnológica disponible para planificar, formular e implementar políticas de gestión y desarrollo sostenible de los mares y costas para la seguridad nacional y la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad marina. En esta comisión participan instituciones de investigación proporcionando los conocimientos y la experiencia de los científicos para interactuar con los ministerios federales. Entre sus principales acciones, esta Comisión trabaja en la estrategia nacional para la atención de la biodiversidad marina y costera, las necesidades de infraestructura y equipamiento oceanográfico, y explora opciones de cooperación internacional.

Desafíos y vacíos

Los mecanismos de coordinación de la investigación oceanográfica consideran tres niveles estructurales: la Comisión Intersecretarial de Investigación Oceanográfica (CIIO), la Comisión Nacional Coordinadora de Investigación Oceanográfica (CONACIO) y la Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas (CIMARES) en el que los diferentes sectores participan y se involucran las instituciones de investigación de los diferentes sectores. Esto conlleva desafíos que incluyen el financiamiento del Programa Oceanográfico, la coordinación de acciones para lograr objetivos a escala nacional y la integración del archivo nacional de información oceanográfica.

Oportunidades

La comunidad oceanográfica es diversa. La investigación oceánica es llevada a cabo por instituciones de investigación y educativas y por algunas agencias del gobierno federal. Esto genera una gran cantidad de datos y conocimiento e información científica marina, la mayoría de los cuales no están concentrados, lo que requiere que un gestor garantice su calidad y acceso abierto.

México preparó la Estrategia de Implementación para una Economía Oceánica Sostenible 2021-2024 que requiere la recopilación de datos que puedan apoyar la toma de decisiones en la economía azul. Una vez que se publique esta estrategia, deberá incorporarse el Programa Oceanográfico.

Biodiversidad marina

Los impactos humanos han crecido más rápido que los arreglos institucionales nacionales que registran cómo cambia el océano o supervisan los efectos en los ecosistemas marinos y la biodiversidad. El programa nacional de biodiversidad fue iniciado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) hace 30 años con el compromiso de aumentar, proteger, y utilizar de manera sostenible el conocimiento de la diversidad biológica en México en varias líneas estratégicas. La biodiversidad marina ha sido una inclusión importante y el Programa es bien reconocido por sus sólidas bases de datos, sus estrechos esfuerzos de colaboración con las instituciones de investigación y el apoyo continuo para la toma de decisiones.

La biodiversidad marina no se cita explícitamente en la estrategia 2018-2024 de la CONABIO, pero, a lo largo del documento, está vinculado con el Programa Sectorial de Medio Ambiente derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 publicado en 2020. La Estrategia Nacional sobre la biodiversidad marina y costera en México estableció que, para finales de 2018, las áreas naturales protegidas federalmente debían cubrir un total de 90.8 millones de hectárea; el 22 % de esas áreas debían estar en la Zona Económica Exclusiva de México (es decir, áreas marinas). A pesar de este alto porcentaje, aún quedan grandes desafíos, como lograr una conservación efectiva y a largo plazo, actualizar el conocimiento de cambios en la biodiversidad, el financiamiento para implementar acciones, la gestión y la visión general de las iniciativas de conservación en el diseño conjunto con instituciones de investigación. Se necesita mucho para garantizar que los planes de conservación cumplan su propósito y funcionen de manera sobresaliente.

Desafíos y vacíos

Se requiere una mejor infraestructura, una capacidad técnica continua y un aumento de los presupuestos nacionales de investigación asignados a la ciencia oceánica para sufragar los altos costos de la exploración y la investigación en los ecosistemas marinos. Esto para cerrar las brechas existentes en el conocimiento de la biodiversidad marina. Las alianzas con la comunidad científica internacional han ayudado a documentar la biodiversidad marina en ecosistemas más profundos de México. Un mecanismo de intercambio de información equitativo podría ayudar a mapear la referencia nacional de colecciones marinas, bases de datos de biodiversidad, expertos y laboratorios en instituciones de investigación.

Oportunidades

Una opción que puede ayudar a prevenir la pérdida de biodiversidad es crear un programa nacional para evaluar, monitorear y proteger la biodiversidad marina respaldado por un programa de creación de capacidad utilizando nuevas herramientas de monitoreo, por ejemplo, sonido submarino y e-DNA. Esto podría ayudar a México a alcanzar sus objetivos de conservación y tener éxito en sus esfuerzos de restauración.

Agenda 2030 y Objetivo de Desarrollo Sostenible 14

Se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) un plan nacional de desarro-

llo, la "Agenda 2030 para 2013-2018". En el caso del Objetivo de Desarrollo Sostenible 14 (ODS14), una consulta con científicos oceánicos orientó las posibles acciones. Uno de los objetivos nacionales se centra en una nación próspera: Objetivo 4.4 "*Promover y orientar un crecimiento verde incluyente y facilitador que preserve nuestro patrimonio natural al tiempo que genere riqueza, competitividad y empleo*"; la estrategia 4.4.1 "*Implementar una política de desarrollo integral que vincule la sustentabilidad ambiental con los costos y beneficios para la sociedad*" determina, entre otras líneas de acción "*... estimular una política en mares y costas que fomente las oportunidades económicas, promueva la competitividad, la coordinación y atienda los efectos del cambio climático protegiendo los bienes y servicios ambientales*." La comisión interministerial para la gestión sostenible de los océanos y las costas desarrolló en 2012 su política nacional para los océanos y costas. Este programa informó la estrategia nacional 2013-2018 que ofrece los resultados de una evaluación del estado y las tendencias en las zonas costeras y marítimas del país en diferentes niveles de la organización; presenta la biodiversidad del ecosistema, los aspectos ambientales, las actividades económicas, la legislación y la gobernanza.

Desafíos y vacíos

Los vacíos existentes a escala nacional se deben a la accesibilidad de los datos. Se necesitan datos oceánicos para evaluar los cambios de los indicadores y la consecución de las metas. La comunidad investigadora nacional dispone de datos adquiridos sistemáticamente en lugares específicos para hábitats y especies basados en proyectos de investigación. Aunque éstos pueden ayudar a informar sobre el cambio, representan un pequeño universo de lo que se necesita para informar sobre las metas del ODS14.

Oportunidades

La creación de observatorios a largo plazo con métodos estandarizados para el diagnóstico, la transferencia y la investigación conjunta vincularía a las instituciones de investigación con el gobierno federal. Esto ayudaría a adquirir datos para medir el cambio y evaluar el ODS14 en la inmensa diversidad de ecosistemas marinos. Estos observatorios requerirán el desarrollo de capacidades y financiamiento para infraestructura, equipo, creación de bases de datos y administración.

La participación de los sectores asociados con la comunidad científica será crucial para integrar la información disponible en los formatos de presentación de informes de la Agenda 2030. Los observatorios costeros existentes responden a los intereses y necesidades de los grupos de investigación. Por ejemplo, las observaciones costeras para el cambio climático incluyen la medición de temperatura, oxígeno y pH en amarres en los laboratorios costeros de la UNAM y la información de acceso abierto disponible en la base de datos de UNINMAR. Este ejemplo podría replicarse ampliamente en cada lugar donde la marina, la Secretaría de Pesca y las escuelas de educación técnica y las universidades y centros públicos tienen una ubicación costera. La cantidad de información obtenida enriquecería nuestro conocimiento del océano costero. Los registros oceanográficos existentes están disponibles en bases de datos y atlas; estos podrían ser útiles para cumplir con la Agenda 2030. Algunos registros responden a eventos únicos como la llegada masiva y varamiento de sargazo en la costa del caribe mexicano cada año desde 2015 o el estudio de línea base del golfo de México del Consorcio de Investigación del Golfo de Mé-

xico (CIGOM) liderado por CICESE ante el derrame de petróleo de Deep-Water Horizon en 2010. Estos esfuerzos han integrado muchas de las instituciones oceanográficas nacionales en México. Otro ejemplo es el consorcio CEMIE-Oceano liderado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que ha estado trabajando en opciones de energía oceánica y ha generado datos para la futura toma de decisiones sobre energía limpia.

Estudios de caso. Contribuciones de México a las iniciativas internacionales de ciencias oceánicas, incluido en la Década de los Océanos

Programa Mexicano del Carbono en la Década de los Océanos

J. M. Hernández-Ayón, C. Chapa-Balcorta, O. Norzagaray, R. Sos, L. Espinosa-Carreón

El conocimiento del ciclo del carbono a nivel nacional es fundamental por su relación con el cambio global. Se requiere comprender la dinámica del sistema de CO_2 de diferentes ecosistemas a lo largo de México y resolver preguntas de gran importancia tanto para la ciencia como para la sociedad. La información permite generar predicciones sobre la vulnerabilidad al cambio global y estrategias de mitigación y adaptación para reducir los efectos adversos.

En los últimos años, los científicos se han preocupado por estudiar los factores que influyen en el calentamiento global y su efecto en la química del carbono dentro del océano y a lo largo de las costas. El estudio del sistema de CO_2 en las costas de México aún tiene mucho trabajo por hacer, a pesar de los avances que se han realizado en los últimos diez años. El Programa Mexicano de Carbono (PMC) ha estado coordinando esfuerzos de investigación relacionados con el ciclo del carbono en México desde 2005. Uno de los objetivos establecidos por el PMC es generar un conocimiento oportuno y sistemático de los flujos y reservorios dentro del ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos, terrestres, atmosférico-sociales y ecosistemas bioenergéticos.

En 2019, el Programa Mexicano del Carbono publicó el primer Estado del Conocimiento del Carbono. Su análisis incluyó nuevas investigaciones orientadas a mejorar la comprensión del ciclo del carbono en los diferentes almacenes (agua, tierra y atmósfera). Esto para anticipar escenarios, a mediano y largo plazo, sobre el comportamiento de este ciclo de cara a futuras intervenciones; proponer estrategias para llenar los vacíos de información detectados; e intensificar los esfuerzos para generar conocimiento en las regiones menos estudiadas del país.

Se sabe que cuatro parámetros describen el sistema de CO_2: (1) pH, (2) Alcalinidad total, (3) Carbono inorgánico disuelto y (4) Presión parcial de CO_2. Hay un interés notablemente creciente en cuestiones de investigación caracterizadas por problemas de pequeña y mediana escala de tiempo y espacio en los estudios del carbono; un sistema de flujo continuo es esencial para dicha investigación a pequeña escala. Esto promueve sistemas modernos para la captura rápida de datos, como boyas oceanográficas con sensores que realizan mediciones continuas. Los desafíos de mapeo son el uso de técnicas analíticas de alta resolución para realizar mediciones químicas, biológicas y físicas para monitorear los cambios en el tiempo y el espacio.

Desafíos y vacíos

Es indudable que existen retos en el desarrollo de técnicas que aún no están disponibles, y también en la incorporación

de nuevas tecnologías como planeadores y perfiladores Argo. La necesidad de utilizar técnicas de vanguardia se debe a que, además del interés en estudiar la dinámica del carbono y su variación en los procesos biogeoquímicos, también existe la necesidad de medir los cambios en el océano debido a las emisiones antropogénicas de CO_2 a la atmósfera, que ocurren a un nivel de 1µmol yr^{-1} (Keeling *et al.,* 2004). Por lo tanto, será fundamental para México contar con equipos de alta resolución y, sobre todo, de alta calidad.

Oportunidades

En los años noventa, se propuso utilizar nuevas herramientas en las que algunos parámetros del sistema de CO_2 pudieran estimarse a partir de imágenes satelitales, estableciendo la relación entre sus valores medidos en el campo y las temperaturas superficiales derivadas del satélite. Actualmente, el novedoso desarrollo de datos satelitales de salinidad y temperatura abre nuevas posibilidades para estudiar las variables de carbono en nuestros océanos; se propuso generar algoritmos para estimar la presión parcial de CO_2 (pCO_2) a partir de imágenes satelitales mediante mediciones continuas de superficie de pH, salinidad y alcalinidad específica. Hoy en día, la ciencia ha avanzado y los sistemas satelitales tienen mejor resolución y están más ampliamente disponibles. Además, se han logrado avances en la automatización de sistemas de medición de flujo continuo para variables del sistema de CO_2 como el CO_2 total y pCO_2. Así, simples y automáticos "paquetes de instrumentos con sensores de fluorescencia, pCO_2, pH, temperatura y salinidad" podrían instalarse en "naves de oportunidad", sin la necesidad de un cuidado especial. Esto podría proveernos con la información especial y temporal necesaria para monitorear el CO_2 a un bajo costo.

Desde 2008 el PMC ha venido desarrollando un Plan Científico (http://pmcarbono.org/pmc/documentos/plan_cientifico.php), este documento y el Primer Reporte del Estado del Carbono de 2019 (Paz-Pellat *et al.,* 2019) destacan elementos clave como:

- La instalación de boyas en los siguientes localidades: golfo de México con boyas en Tamaulipas, Veracruz y Tabasco; el golfo de California con boyas en el Alto Golfo, en Grandes Islas y la Parte Central. En la costa del Pacífico Mexicano se encuentra una boya en la parte norte de Baja California y se instalará una más en la costa de Baja California Sur;
- Realización de programas como el de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) y el Consorcio del Golfo de México (CIGOM) en regiones de las costas de cabo Corrientes, golfo de California y región de Tehuantepec;
- Instalación de paquetes de sensores de flujo continuo en "naves de oportunidad" que permiten la generación de mapas de variables de carbono con valiosa información espacial y temporal;
- Capacitación y preparación de recursos humanos de calidad en los diferentes programas de posgrado en el país con enfoque en personal capacitado en estudios de carbono en sistemas marinos; y
- Promoción de colaboraciones para estancias sabáticas de investigadores y estancias postdoctorales de jóvenes profesionales de doctorado.

La colaboración con la Secretaría de Marina (SEMAR) y el Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura (INAPESCA) ha sido fundamental para generar conocimiento

en el golfo de California y el Pacífico mexicano de las variables del sistema de CO_2. Por lo tanto, es escencial continuar con la participación en cruceros oceanográficos con SEMAR, para obtener información para comprender la química del carbono, la acidificación de los océanos y su efecto en el cambio climático. La colaboración con instituciones federales que tienen la infraestructura y el financiamiento para llevar a cabo muestreos en mar abierto es un área de oportunidad para ampliar los estudios de carbono en regiones donde hay vacíos de información. También funcionaría para replicar estudios previos y comprender la dinámica del carbono en estas regiones con mayor claridad, ya que los estudios existentes muestran que existen diferencias entre las zonas y que no es posible extrapolar y caracterizar toda la región con base en la información generada en una sola zona.

A nivel internacional, existen iniciativas de vigilancia a escala mundial que podrían proporcionar información pertinente. Estas iniciativas incluyen programas globales como el WOCE (World Ocean Circulation Experiment), el programa Argo y el establecimiento de redes de anclaje y boyas oceanográficas. El programa Argo cuenta con sensores distribuidos globalmente (http://www.argo.ucsd. edu/About_Argo. html), y actualmente incluye sensores de pH y nitrato en algunos de sus prototipos; además de las variables tradicionalmente medidas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto). A partir de estas mediciones es posible obtener datos sobre del sistema de CO_2 y calcular la concentración de carbono inorgánico disuelto en las regiones de mayor interés, regiones de vacíos de información y regiones de difícil acceso.

Participación de México en la Red Global de Acidificación Oceánica (GOA-ON)

La Red Global de Acidificación Oceánica (GOA-ON por sus siglas en inglés) es una red internacional colaborativa, de la que México es miembro, cuyo objetivo es detectar y comprender todo lo que genera la acidificación de los océanos en ambientes estuarinos, costeros y marinos. La red busca comprender los impactos en los diferentes ecosistemas marinos y poner a disposición la información generada para optimizar los estudios a través de modelos. La red también tiene como objetivo proporcionar una alerta temprana de los impactos de la acidificación de los océanos en los ecosistemas naturales, la pesca silvestre y acuícola, la protección costera, el turismo y las economías locales. Al hacerlo, la red podrá proporcionar información clave a las comunidades, la industria y los gobiernos que buscan desarrollar planes de acción, mejores prácticas, y generar estrategias de mitigación o adaptación para abordar los impactos de la acidificación de los océanos. La red y sus miembros de diferentes países forman ocho "Hubs" o regiones para facilitar la comunicación y el trabajo entre los 860 miembros de 105 países. Uno de ellos es el Hub de América del Norte, en el que participa México junto con Canadá y Estados Unidos. Además, México también forma parte del Hub Latinoamericano conocido como "LAOCA".

En el verano de 2021, el Gobierno de Australia generó una propuesta titulada «Investigación sobre la acidificación de los océanos para la sostenibilidad (OARS)» para proporcionar a la sociedad las pruebas científicas y observacionales necesarias para

identificar, supervisar, mitigar y adaptarse de manera sostenible a la acidificación de los océanos; desde escalas locales hasta globales. Esta propuesta fue aprobada como un programa de la Década de los Océanos. El programa OARS, en el que participa México, se basará en el trabajo de GOA-ON para desarrollar aún más la ciencia de la acidificación de los océanos. Esto se logrará mediante la mejora en la capacidad de detección de la acidificación de los océanos, el aumento de las observaciones de los cambios en la química de los océanos, la identificación de los impactos en los ecosistemas marinos a escala local y global, y el suministro a la sociedad y a los tomadores de decisiones con la información necesaria para mitigar y adaptarse a la acidificación de los océanos. El programa abordará la meta 14.3 de los ODS, "Reducir al mínimo y hacer frente a los efectos de la acidificación de los océanos, mediante una mayor cooperación científica a todos los niveles", en la que algunos investigadores mexicanos han recibido capacitación. El programa OARS tiene como objetivo proporcionar evidencia de los impactos de la acidificación de los océanos en la sostenibilidad de los ecosistemas marinos, mejorar la capacidad de reaccionar ante la acidificación de los océanos, aumentar las observaciones de los cambios en la química oceánica, mejorar la comunicación con los formuladores de polítcas y las comunidades al proporcionar la información necesaria para mitigar y adaptarse a la acidificación de los oceános, y facilitar el desarrollo y la evaluación de estrategias para compensar los futuros impactos.

La visión de la OARS en la Década de los Océanos para 2030, en la que México tendrá que actuar, tiene estos objetivos principales:

- Proporcionar una plataforma para que científicos, formuladores de políticas, industrias, administradores costeros, comunidades locales y usuarios de recursos oceánicos accedan a los datos generados y al conocimiento necesario para desarrollar e implementar soluciones aplicables.
- Diseñar estrategias de monitoreo de la acidificación de los océanos para incorporar y ampliar las bases de datos a fin de contribuir a las observaciones mundiales.
- Identificar formas de abordar las necesidades de los usuarios finales para reducir los impactos locales, regionales y globales de la acidificación de los océanos y apoyar a los tomadores de decisiones en el establecimiento e implementación de estrategias eficientes para ayudar a mitigar y adaptarse a la acidificación de los océanos a nivel mundial, regional y local.
- Aumentar la capacidad de los científicos oceánicos de todo el mundo para realizar y sintetizar la investigación sobre la acidificación de los océanos a escala local y regional.
- Identificar las áreas geográficas de mayor vulnerabilidad a la acidificación oceánica para dirigir de manera más eficiente los recursos humanos, técnicos, financieros y humanos a donde más se necesitan.
- Proporcionar los datos e información necesarios para identificar y verificar formas innovadoras de mitigar la acidificación de los océanos.
- Apoyar la conciencia pública y política basada en la evidencia y la acción hacia la acidificación de los océanos, sus fuentes y los impactos logrados a través de la difusión de información.

Como parte de GOA-ON y a través de OARS los investigadores de México tendrán la tarea de contribuir en diferentes aspectos alentando a la comunidad científica a proporcionar datos sobre la acidificación de los océanos y evidencia de calidad divulgada a través del desarrollo de capacidades. Además de la tutoría de investigadores de carrera temprana y aumentar la comunicación a través de reuniones y talleres, permitiendo un análisis holístico que considere las perspectivas de todas las partes interesadas. Otros aspectos pueden incluir la identificación de las necesidades de información y evidencia necesarias para generar estrategias de mitigación y adaptación, desde lo local hasta lo global, al tiempo que se asumen compromisos para comunicar estas necesidades a la comunidad científica y de políticas científicas para garantizar que se priorice la ciencia para garantizar la implementación eficiente y rápida de las acciones.

Participación de México en la Red Global de Oxígeno Oceánico (GO_2NE)

H. Maske, C. Chapa-Balcorta, R. Sosa Avalos, J. M. Hernández-Ayón

La Red Global de Oxígeno Oceánico (GO-2NE) es una red internacional que cuenta con la participación de investigadores comprometidos a brindar una visión global y multidisciplinaria de la desoxigenación, con un enfoque en comprender sus múltiples aspectos e impactos. Esto debe a que hay una pérdida documentada de oxígeno y una tendencia general de disminución en el oxígeno disuelto (OD) en los océanos. Hay pocos conjuntos de datos a largo plazo que documenten los cambios decenales en el OD en la columna de agua independientemente de las Zonas Mínimas de Oxígeno (OMZ); sin embargo, se han reportado disminuciones en la concentración de oxígeno en lugares ecológicamente diferentes, incluso en la "Estación P" en el Pacífico subártico (Whitney *et al.,* 2007) y en la Corriente de California (Bograd et al., 2008). Investigaciones recientes sugieren que las ZMO se están expandiendo tanto horizontal como verticalmente (Keeling y García, 2002; Stramma *et al.,* 2008). Los autores han informado que se han producido disminuciones en las concentraciones de oxígeno disuelto en los últimos 50 años entre profundidades de 300 m y 700 m. En contraste con estas observaciones, algunos modelos predicen un aumento en las concentraciones de OD en la termoclina tropical con una disminución asociada en las áreas subóxicas (Bopp *et al.,* 2002; Matear y Hirst, 2003). Sin embargo, ahora se informa que debido al calentamiento de los océanos, la acidificación y la desoxigenación actuarán sinérgicamente entre sí y con los aumentos de temperatura como factores estresantes en los ecosistemas marinos (Keeling *et al.,* 2010; Gruber, 2011) y esto impulsa la necesidad de comprender el funcionamiento de las ZMO.

En México, la zona núcleo de la Zona Mínima de Oxígeno (ZMO) se centra cerca de Acapulco y se extiende hacia el este-sureste a lo largo de 1500 km. Al sur y al norte de esta zona núcleo hay intrusiones de capa delgada de baja concentración de oxígeno, típicamente < 20 moles L^{-1}. Pero hasta ahora no hay datos suficientes en la ZMO para definir los límites del núcleo y las partes periféricas de la zona subóxica. La ZMO frente a México se extiende desde la costa de Cabo Corrientes (Jalisco) hasta la costa de Guatemala. Cerca de la costa, la oxiclina puede elevarse hasta menos de 20 m (Santana-Vega *et al.,* 2018). Teniendo en cuenta que el espesor vertical de la ZMO está a más de 500m cerca de la costa, la plataforma continental lejana a la costa desde Cabo Corrientes hasta Guatemala es permanentemente subóxica. La plataforma continental es estrecha y alcanza aproximadamente 50 km afuera de la costa y, debido a su extensión latitudinal de 1 500 km, es probablemente una de áreas subóxicas contiguas más grandes del mundo. Breitburg *et al.* (2018) distinguen entre zonas muertas y ZMO; ambas se encuentran en el fondo marino, pero las primeras son generadas antropogénicamente. Comúnmente las zonas muertas se encuentran cerca de las desembocaduras de los ríos debido a la eutrofización facilitada por el uso excesivo

de fertilizantes en la agricultura (Rabalais *et al.,* 2010). Las ZMO incluyen la parte bentónica subóxica de la plataforma continental, y sus mecanismos de formación no son de origen antropogénico directo y se sabe que existieron antes del período de industrialización.

La información que se desconoce para evaluar el impacto ecológico y climatológico de las Zonas Mínimas de Oxígeno son:

- Los mecanismos oceanográficos físicos que inician y mantienen la ZMO.
- El impacto ecológico de la capa subóxica en la plataforma continental y la costa.
- El equilibrio del intercambio de carbono y otros gases entre el océano y la atmósfera.
- Los mecanismos que mantienen una alta productividad pesquera sobre la ZMO.
- Observaciones de alta frecuencia y a largo plazo que permiten análizar las tendencias relativas a la extensión e intensidad regional de las ZMO.

La pérdida de oxígeno en el océano está relacionada con el calentamiento actual de los océanos, lo que conduce a una reducción de la concentración de saturación de oxígeno disuelto (figura 4). Esto también conduce a una mayor estratificación en la capa superior debido al calentamiento de la superficie. Esta estratificación reduce el transporte de agua superficial oxigenada a mayores profundidades. Un segundo proceso relacionado es una tasa acelelerada de respiración aeróbica de materia orgánica en profundidad. Este puede ser el resultado de un posible aumento en la producción orgánica como resultado de la fertilización oceánica global. Estos dos procesos son los principales responsables de la desoxigena-

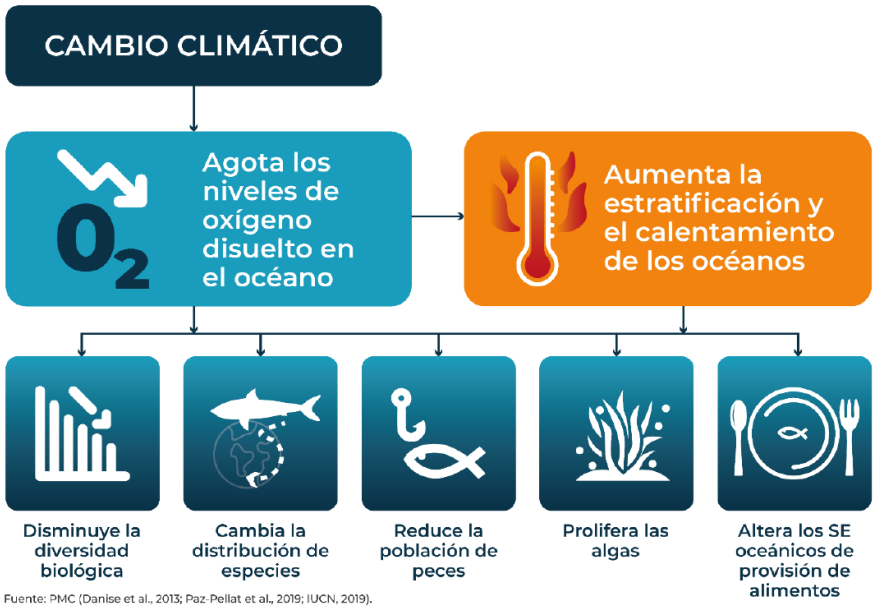

Figura 4. Procesos de pérdida de oxígeno del océano como resultado del calentamiento y una reducción en la concentración de saturación de oxígeno disuelto. Fuente: PMC

ción de los océanos y la expansión de regiones en aguas intermedias (< 1000m) que tienen concentraciones muy bajas de oxígeno (cerca del límite de detección de oxígeno), es decir, zonas mínimas de oxígeno (ZMO). La ZMO más grande del mundo se encuentra en el Pacífico mexicano, que también es una de las menos estudiadas. Los procesos de desoxigenación de los océanos en general también se aplican a las ZMO, sin embargo, no se entiende bien cómo funciona la relación entre los diferentes procesos y es por eso que la ZMO mexicana no ha sido bien representada con modelos numéricos. No obstante, es evidente que las variaciones del ciclo del carbono y el oxígeno en la ZMO están vinculadas, y que la ZMO representa un importante reservorio de carbono en los mares mexicanos.

Desafíos y vacíos

La ZMO frente a México es la más grande y menos investigada. El número de publicaciones de investigadores nacionales y el número de campañas oceanográficas dedicadas a describir la zona central de la ZMO son limitados. A la fecha, existen datos de diversas campañas de investigadores nacionales a bordo de embarcaciones mexicanas y extranjeras. Sin embargo, la mayoría de estas campañas oceanográficas se han llevado a cabo en las regiones periféricas al norte y sur del núcleo de la ZMO. Se requiere un mayor esfuerzo para hacer uso de diversas técnicas para responder a las grandes preguntas que quedan sin respuesta en la ZMO. En la actualidad, una gran parte de los datos oceanográficos se toman con perfiladores autónomos Argo (http://www.argo.ucsd.edu/About_Argo.html). Si miramos la distribución de los 4 000 Argos en el mundo, podemos ver que sólo unos pocos de ellos están instalados en las aguas de la zona económica exclusiva mexicana.

Oportunidades

La ZMO no es solo un tema de investigación relacionado con estudios sobre oceanografía física y biogeoquímica, sino que también ofrece interesantes oportunidades de investigación sobre temas como las adaptaciones de organismos procariotas y eucariotas a la ZMO. Por ejemplo, la capacidad de la fauna para entrar en aguas hipóxicas y anóxicas y hacer un uso temporal de estas zonas en el sedimento o en la interfaz sedimento-agua. Tampoco se sabe cuál será el impacto de los cambios en la ZMO sobre la productividad primaria y las pesquerías nacionales.

Para describir la estructura vertical de las ZMO se requieren mediciones con tecnología que detecte bajas concentraciones de oxígeno, así como instrumentos que midan los procesos microbiológicos que controlan el ciclo de otros elementos como el azufre y el nitrógeno. También se necesitan estudios de carbono y oxígeno para identificar su papel en la variabilidad biogeoquímica de las ZMO. Por otro lado, la presencia de la plataforma continental subóxica y su gestación son factores de gran interés para el país. La capacidad predictiva de los modelos muestra que la ZMO se expandirá horizontal y verticalmente. Sin embargo, queda la tarea de confirmar con datos in situ los procesos identificados por los modelos para comprender mejor los procesos responsables de la persistencia de la ZMO. Esto facilitaría la planificación y la generación de propuestas estratégicas que propongan formas de mitigar los impactos económicos. Esto requiere una colaboración multidisciplinaria y el uso de la tecnología. Para el estudio de estas zonas, es necesario hacer uso de todas las tecnologías disponibles, como la adquisición a largo plazo de datos generados por sensores remotos, a través de campañas

oceanográficas, por perfiladores autónomos (es decir, Argos), por vehículos programados (es decir, planeadores), por anclajes, y por ROV (Remote operated vehicle); pero se requiere que incluyan instrumentación con resolución suficiente (< 4 nM) para detallar la estructura vertical interior de las ZMO.

GO$_2$NE y sus socios son parte de la Década de los Océanos y de 2021 a 2030, el programa GOOD de la Década Oceánica - Década Global del Oxígeno Oceánico - propone aumentar la conciencia global sobre la desoxigenación de los océanos, proporcionar conocimientos para comprender las causas, atribuir cambios y desarrollar acciones para medidas de mitigación y generar acciones de adaptación a través de esfuerzos locales, regionales y globales, incluido el monitoreo intensificado, investigación transdisciplinaria, transferencia bidireccional de conocimiento entre partes interesadas y científicos, divulgación innovadora y educación oceánica. El objetivo de alto nivel del Programa Decadal es proporcionar datos, conocimientos y personal altamente calificado a través del desarrollo de capacidades y las mejores prácticas para permitir que la sociedad, las partes interesadas y los científicos diseñen y desarrollen conjuntamente medidas que puedan mitigar los impulsores e impactos de la desoxigenación del océano y proporcionar medidas de adaptación apropiadas donde la mitigación no sea posible. El desarrollo de enfoques de mitigación y / o adaptación a la desoxigenación es de suma importancia para garantizar la provisión de servicios ecosistémicos, abordar las amenazas al sistema climático y minimizar el impacto de la desoxigenación de los océanos en la economía oceánica.

Red de Monitoreo y Predicción de los Oceános para el Desarrollo Sostenible del Golfo de México y el Caribe" (OMPNETGC).

Proyecto ID 37 aprobado por la Década de los Océanos

J. C. Herguera, J. Scheinbaum, P. Pérez Brunius, E. Peters, A. Uribe, L. Aguirre Macedo, V.M. Vidal-Martinez, C. Enríquez, I. Mariño Tapia, H. García Nava, X. Flores Vida, T. Salgado, R. Romero Centeno, J. Zavala, L. Pardo López, R. M. Gutiérrez Ríos, E. Amir Cuevas Flores, L. Carrillo, M. A. Martínez Arroyo, M. Caso , V. G. Toro Valencia, J. Carranza

CIGOM es el Consorcio Nacional de México para la investigación científica, la integración tecnológica y servicios de consultoría, especializado en proyectos multidisciplinarios para evaluar y gestionar los impactos ambientales causados por la industria del petróleo y el gas en los ecosistemas marinos del golfo de México (https://cigom.org/en/). La red del CIGOM reúne el trabajo de más de 300 investigadores en múltiples disciplinas de más de una docena de instituciones de investigación mexicanas e internacionales líderes. El CIGOM está financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México y la Secretaría de Energía (SENER). Los principales objetivos del CIGOM son:

- Establecer una plataforma sostenida de observaciones oceanográficas en tiempo real basada en datos recopilados por boyas, estaciones de radar costero de alta frecuencia, planeadores e imágenes satelitales que cubren la Zona Económica Exclusiva de México.
- Establecer la línea base ecológica y biogeoquímica del gran ecosistema marino del golfo de México, integrando resultados de las muestras de agua, biológicas y sedimentos recolectadas y analizadas durante más de 20 cruceros en un Atlas Base del golfo de México.
- Modelado computacional de la circulación y la biogeoquímica de esta región para establecer la vulnerabilidad ecológica bajo diferentes escenarios de derrame de petróleo en el golfo de México.

CIGOM fue el primer paso para desarrollar enfoques que contribuyeron a la generación de conocimiento en los últimos siete años, que servirán de base para desarrollar políticas que impactarán la salud y sostenibilidad de los océanos. El consorcio también brindó apoyo para la coordinación e integración de soluciones que permiten la sinergia entre la academia, el gobierno, la sociedad y la industria.

El esfuerzo multiinstitucional y multidisciplinario del CIGOM ha sido una gran experiencia de aprendizaje sobre cómo organizar y liderar grandes grupos científicos para alcanzar objetivos comunes. Es este tipo de experiencia la que CIGOM ofrece con el objetivo de promover el desarrollo sostenible del océano en colaboración con las partes interesadas, las comunidades y los gobiernos estatales y nacionales de la región del Caribe. Este enorme esfuerzo por comprender la oceanografía y la ecología

del Golfo de México ha sido posible gracias al esfuerzo concertado de numerosos expertos, postdoctorados, estudiantes graduados y técnicos en todas las instituciones asociadas con la red del CIGOM, así como a la red colaborativa nacional e internacional desarrollada en los últimos siete años.

El proyecto "Red de Vigilancia y Predicción Oceánica para el Desarrollo Sostenible del Golfo de México y el Caribe" (OMPNETGC) fue avalado por la Década de los Océanos al consorcio CIGOM con los siguientes objetivos:

- Desarrollar una red de sistemas de observación oceánica y modelos regionales de pronóstico de la circulación oceánica en el golfo de México y el Caribe.
- 2Proporcionar información de línea base sobre el estado del gran ecosistema del golfo de México y las principales variables oceanográficas, biogeoquímicas y ecológicas de la región para informar a las políticas públicas y a los actores sobre cómo adaptarse y mitigar sus cambios y tendencias.
- Evaluar la vulnerabilidad de especies clave y hábitats marinos de este gran ecosistema a eventos naturales extremos, presiones de desarrollo económico (como grandes derrames de petróleo) y las tendencias emergentes a largo plazo de disminución del contenido de oxígeno en las regiones costeras, acidificación de los océanos, floraciones de algas nocivas y calentamiento de la superficie del océano.
- Proporcionar información, conocimientos y herramientas para la mitigación y adaptación a estos cambios.
- Ampliar la red interdisciplinaria de observación, predicción y monitoreo.
- Mejorar el desarrollo de capacidades para la próxima generación de científicos, formuladores de políticas y partes interesadas en la región del Gran Caribe para el desarrollo sostenible de los océanos.

Los principales resultados esperados de este proyecto son:

- Una base de datos interdisciplinaria para el gran ecosistema del golfo de México y el Caribe de las principales variables físicas, biogeoquímicas y ecológicas intercalibrada
- Una red de observación del océano sobre el golfo de México y el Caribe que incluye una red de estaciones de radar costeras, boyas y planeadores para proporcionar información confiable sobre variables físicas, biogeoquímicas y ecológicas esenciales para caracterizar las condiciones oceánicas.
- Pronosticar modelos de circulación a diferentes resoluciones capaces de asimilación de datos de las plataformas de observación oceanográfica que abordarán los problemas de circulación costera, incluyendo el oleaje, el transporte de sedimentos, las fuentes y sumideros de contaminación, las floraciones de algas nocivas y sargazo. Así también se considera el impacto local de eventos extremos como huracanes y tormentas tropicales para mejorar la seguridad de las comunidades que viven en las costas.
- Mapas del estado de riesgo y vulnerabilidad de las especies clave y de las reservas y hábitats costeros marinos frente a diferentes vectores antropogénicos y estrategias de biorremediación bajo diferentes eventos extremos antropogénicos como eventos de derrames de petróleo, floraciones de algas nocivas, arribos masivos de sargazo y tendencias emergentes de acidificación y calentamiento global de sus aguas superficiales.

- Estrategias de biorremediación para eventos de derrame de petróleo y contaminación plástica utilizando consorcios sintéticos de bacterias marinas nativas, distribuidos con un prototipo de vehículo autónomo submarino, probado en sistemas de microcosmos y mesocosmos, emulando condiciones similares de derrame de petróleo.
- Desarrollo de repositorios digitales y páginas web para facilitar el acceso y visualización de información y datos generados en tiempo real.
- Desarrollo de protocolos locales, regionales y nacionales basados en estándares internacionales para mejorar la mitigación de grandes desastres ambientales, como los grandes derrames de petróleo y floraciones dañinas.
- Actividades educativas en todos los niveles, así como procedimientos de capacitación para comunidades locales, el personal técnico y tomadores de decisiones para desarrollar y mantener políticas sostenibles con bases científicas para las comunidades costeras.
- Desarrollo de diferentes estrategias de comunicación para llegar a los diferentes actores políticos y socioeconómicos, partes interesadas, público en general y comunidad científica.

El proyecto facilitará el acceso abierto a los resultados de la investigación científica marina, las tecnologías marinas y el conocimiento oceánico utilizando las mejores prácticas y siguiendo los principios de ser encontrable, accesible, interoperable y reutilizable (FAIR, por sus siglas en inglés). CIGOM utiliza tecnologías estándar que permitirán a múltiples usuarios acceder a bases de datos desde diferentes plataformas digitales. Los datos son archivos de metadatos adecuadamente descritos y construidos siguiendo metodologías compatibles de descubrimiento, extracción y transmisión. La interoperabilidad y transparencia de las operaciones permiten el almacenamiento descentralizado de datos. La arquitectura del sistema integrado de gestión de datos (ISDM) de CIGOM sigue los principios de transparencia, responsabilidad, orientación al usuario y sostenibilidad (TRUST). Esto permite disponer de catálogos indexados con opciones de búsqueda facetadas, visualización de datos y servicios de descarga desde cualquier servidor local o remoto con protocolos API REST que ofrecen un catálogo de representaciones gráficas, series temporales, perfiles, vectores, histogramas y mapas geográficos. La descarga de los datos permite múltiples tipos de formato. Este sistema permite una federación de bases de datos y procedimientos de conversión entre diferentes formatos de metadatos estándar.

Este proyecto está parcialmente financiado por los siguienes 18 meses por el Fondo de Hidrocarburos CONACYT-SENER y CIGOM continuará buscando activamente financiamiento para todas las actividades descritas previamente con el apoyo de la Década de los Océanos de la COI. Una infraestructura sustancial en equipos y recursos humanos ya está financiada por proyectos nacionales anteriores, y CIGOM buscará financiamiento para continuar con las operaciones después del segundo año.

Retos y vacíos

Se necesita con urgencia adquirir datos sobre: los sistemas continuos de observación oceánica, el monitoreo periódico y el modelado e investigación oceánicos sobre el calentamiento climático para abordar los cambios y tendencias en todo el océano emergentes en la acidificación, la desoxigenación, la proliferación de algas nocivas y

las llegadas masivas de sargazo, el aumento del nivel del mar, el calentamiento de la parte superior del océano y la interrupción funcional de la estructura de la red ecológica en el océano; Esto debido a que se necesitan sentar las bases racionales de las estrategias de mitigación y adaptación que el país tiene que diseñar para el bienestar de sus ciudadanos. Se requieren estrategias de comunicación para explicar cómo los servicios de los ecosistemas costeros, los alimentos sostenibles y el bienestar social cambiarán con el calentamiento climático y la compleja sinergia entre el calentamiento climático, los contaminantes orgánicos e inorgánicos, la sobrepesca y la pérdida de hábitat.

Oportunidades

La gran oportunidad de la Década de los Océanos es reducir las brechas de información y conocimiento sobre los océanos mediante programas de alfabetización oceánica, desarrollo de capacidades, y el acceso a programas tecnológicos. Las acciones emprendidas a través de la Década de los Océanos deben defender y promover la importancia de realizar observaciones sistemáticas y sostenidas de los océanos para la sociedad, junto con el apoyo al desarrollo de capacidades y la garantía de acceso a tecnologías e instrumentos oceánicos rentables y fáciles de usar, para ofrecer soluciones viables que puedan ajustarse a las necesidades científicas y sociales de los usuarios e informar la toma de decisiones a todos los niveles. La planificación, el diseño, la promoción y la implementación de la investigación científica oceánica y los sistemas de información ambiental para la toma de decisiones son acciones que crearán nuevos empleos en muchas áreas, incluido el tratamiento del agua, la restauración y la conservación de los ecosistemas marinos y costeros que beneficiarán a la economía azul, el desarrollo sostenible y el crecimiento, además del secuestro de carbono y otros servicios ecosistémicos. Ante la creciente crisis del calentamiento climático y las pérdidas y daños ambientales, se necesitan medidas significativas para apoyar la toma de decisiones informadas y brindar a la sociedad mejores oportunidades para mitigar y adaptarse al calentamiento del clima y los océanos. Se requiere un esfuerzo muy grande a nivel nacional para garantizar que el océano se integre en los programas nacionales de clima y calentamiento, al tiempo que se reconoce el océano como una solución para el crecimiento económico nacional sostenible.

Perspectivas locales, perspectivas de las ciencias marinas en México, en el contexto del Decenio de los Océanos 2020-2030

por la Asociación de Oceanólogos de México (ASOCEAN)

L. F. Navarro Olache

Durante el XXI Congreso Nacional de Oceanografía se llevó a cabo el Foro-Taller 'Perspectivas de las Ciencias del Mar en México, en el Contexto de la Década de los Océanos 2020-2030'. En el foro, los ponentes discutieron las diferentes actividades que se han llevado a cabo en los océanos mexicanos, destacando los principales objetivos que son conocer el inventario de lo que existe en términos de datos en los mares de México, qué problemas se han abordado, cuáles tienen solución y cuáles necesitan estrategias urgentes hacia la misión del Decenio de los Océanos 2020-2030.

ASOCEAN es una asociación civil nacional que reúne a egresados de Oceanología de la Universidad Autónoma de Baja California, la Universidad de Colima y la Universidad del Mar (Oaxaca) apoyándolos en su desarrollo profesional y promoviendo el conocimiento integral de los océanos, así como el uso racional de los recursos marinos mexicanos. Durante el XXI Congreso Nacional de Oceanografía, en septiembre de 2021, miembros de ASOCEAN participaron como ponentes en el Foro-Taller 'Perspectivas de las Ciencias del Mar en México, en el Contexto de la Década de los Océanos 2020-2030'. La discusión general se centró en el presente, los resultados ya alcanzados, el posicionamiento de México en la evaluación de los procesos oceanográficos y la interacción inter e intradisciplinaria de los océanos profundos y costeros. Todos los participantes coincidieron en que se necesitan más datos y que, si bien ha habido avances y se ha obtenido información del océano, gran parte de ella sigue siendo desconocida, especialmente su dinámica y reacción a los cambios naturales y antropogénicos, que son notables. Se necesitan más datos porque con más información, la capacidad de predecir, reaccionar y protegerse contra eventos catastróficos mejorará.

El programa de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL), que es un extenso proyecto de investigación con más de 26 años y cientos de expediciones de recolección de datos oceanográficos en la franja de la Corriente de California del Océano Pacífico mexicano, ha desarrollado una línea de base donde ahora se pueden determinar los procesos físicos, químicos y biológicos. Esta línea de base representa el promedio y la variabilidad de las características oceánicas estacionales y no estacionales claramente relacionadas con la circulación del Océano Pacífico. Acontecimientos como El Niño, La Niña (ENSO), y las oscilaciones en periodos grandes se expresan en esta completa base de datos. Una línea de base sólida vale la pena para tener mejores pronósticos y mayor preparación para contingencias.

Sin embargo, a medida que se recopilaron, analizaron e incorporaron más datos y se desarrollaron mejores metodologías e instrumentación con nuevas tecnologías y un aumento acelerado de la potencia de

cómputo, surgieron nuevas preguntas sobre el comportamiento de las corrientes costeras y sus conexiones con numerosas variables químicas y biológicas. Por lo tanto, la base de datos se inició utilizando mediciones de instrumentos rudimentarios como batitermógrafos y botellas reversibles. A medida que avanzaba la tecnología, la base de datos incorporó mediciones de instrumentación de alta precisión y volumen de datos (ADCP, LADCP), sensores remotos (satélite), autoanalizadores continuos, boyas oceanográficas, radares de alta frecuencia y, sobre todo, un enorme aumento en la potencia de cómputo que, hasta la fecha, permite resolver la circulación de la superficie del océano con una resolución numérica asombrosa incluso mayor que algunas observaciones de imágenes satelitales.

Toda esta nueva información fue presentada en varios volúmenes, en publicaciones, y en una base de datos robusta que responde a este esfuerzo y que pronostica más estudios en el área. Luego se preguntó si la cantidad de datos generados en el océano Pacífico y el golfo de México son suficientes o si se necesitan más campañas y programas nacionales; se acordó que se necesitan más observaciones, y el claro ejemplo de ello fue el conocimiento que se generó más allá de una línea de base donde se analizan las condiciones promedio y las variaciones temporales. Los participantes enfatizaron la importancia de conocer las vías de nutrientes tanto en el golfo de México como en el océano Pacífico, así como los esfuerzos continuos para diagnosticar la acidificación de los océanos y modelar escenarios de procesos contaminantes como los derrames de petróleo. Las interacciones costeras y las cargas continentales y su alcance no nos permiten conocer actualmente el destino y el daño de los afluentes con contaminación plástica y química, así como las rutas de interacción. Tampoco conocemos la carga máxima de contaminantes en la costa que debería preocuparnos, así como las posibles fuentes de energía sostenible a través de extracciones limpias de procesos que ocurren en el mar como corrientes, olas y mareas entre otras fuentes potenciales como disociaciones químicas.

Conclusiones

Comprender las funciones básicas del océano mexicano y comprender cómo proteger y restaurar la abundancia de los recursos oceánicos de México son importantes para el futuro del país y su población. Entre las oportunidades para la participación de México en el Decenio de los Océanos y el Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas 2021-2030 se encuentran las contribuciones de la investigación científica oceánica internacional, nacional y regional. La co-ocurrencia de esta iniciativa de dos décadas puede impulsar la creación de programas nacionales a largo plazo orientados al océano en México.

Las necesidades de información, ciencia y tecnología de Investigación y Desarrollo Experimental para la Innovación de México pueden provenir de, o estar alineadas con, la participación en la Década de los Océanos. Estas necesidades pueden ser identificadas y la comunidad científica oceánica de México puede avanzar en su comprensión de las mismas. Además, esa comunidad puede fomentar la aplicación pragmática de dicha información, ciencia y tecnología para elaborar soluciones innovadoras que satisfagan las necesidades y prioridades de los pueblos de México que dependen del océano y los recursos de los que dependen. El resultado debería ser un océano limpio y saludable, con productividad y abundancia restauradas para la seguridad alimentaria, así como resiliencia costera natural para proteger vidas y medios de subsistencia. En otras palabras, servicios ecosistémicos robustos que fomenten una economía azul sostenible que fortalezca a México económica, ecológica y socialmente.

El océano es fundamental para la economía mexicana (pesca, navegación, turismo), las comunidades locales y la salud y el bienestar de la sociedad, sin embargo, apenas está presente en la vida política cotidiana. Por lo tanto, el destino del océano debe ser parte del debate político apoyado por el conocimiento y el resultado de la investigación científica. Mantener el futuro del océano a la vanguardia de la vida política es una de las oportunidades para los próximos diez años. Esto aseguraría que los impactos en el océano se documenten, mapeen, se consideren las soluciones y se tomen decisiones oportunas. La Década de los Océanos puede ser una influencia importante que desencadene el cambio requerido en México.

Referencias

Bograd, S. J., Castro, C.G., Di Lorenzo, E., Palacios, D.M., Bailey, H., Gilly, W., Chavez, F.P. . 2008. Oxygen Declines and the Shoaling of the Hypoxic Boundary in the California Current. *Geophysical Research Letters,* 35(12) https://doi.org/10.1029/2008gl034185.

Bopp, L., Le Quéré, C., Heimann, M., Manning, A.C., Monfray, P. 2002. Climate-Induced Oceanic Oxygen Fluxes: Implications for the Contemporary Carbon Budget. *Global Biogeochemical Cycles* 16(2). https://doi.org/10.1029/2001gb001445.

Breitburg, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Grégoire, M.E., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garçon, V. *et al.* 2018. Declining Oxygen in the Global Ocean and Coastal Waters. *Science* 359(6371). https://doi.org/10.1126/science.aam7240.

Delgado, M. 2021. Día Mundial de Los Océanos. Grupo Milenio. Retrieved May 31, 2022, from https://www.milenio.com/opinion/martha-delgado/columna-martha-delgado/dia-mundial-de-los-oceanos

Gruber, N. 2011 Warming up, Turning Sour, Losing Breath: Ocean Biogeochemistry under Global Change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1943) 1980–96. https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0003.

Keeling, C. D., H. Brix, N. Gruber. 2004. Seasonal and Long-Term Dynamics of the Upper Ocean Carbon Cycle at Station Aloha near Hawaii. Global Biogeochemical Cycles 18(4). https://doi.org/10.1029/2004gb002227.

Keeling, R. F., Garcia, H. E. 2002. The change in Oceanic O 2 inventory associated with recent Global Warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12): 7848–7853. https://doi.org/10.1073/pnas.122154899

Keeling, R. F., Körtzinger, A., Gruber, N. 2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual Review of Marine Science*, 2(1): 199–229. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163855

Matear, R.J., Hirst, A. C. 2003. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations in the ocean caused by protracted global warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4). https://doi.org/10.1029/2002gb001997

Paz-Pellat, F., Hernández-Ayón, J.M., Sosa-Ávalos , R., Velázquez-Rodríguez, A.S. (Editores). 2019. Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: 978-607-96490-7-4. 716 p.

Rabalais, N. N., Díaz, R. J., Levin, L. A., Turner, R. E., Gilbert, D., Zhang, J. 2010). Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences*. Retrieved June 1, 2022, from https://doi.org/10.5194/bg-7-585-2010

Rivera- Arriaga, E., Villalobos, G. 2001. The Coast of México: Approaches for its management. *Ocean and Coastal Management*, 729-756.

Santana-Vega, Z., Hernández-Becerril, D. U., Morales-Blake, A. R., Varona-Cordero, F., Merino-Ibarra, M. 2018. Prokaryotic picoplankton distribution within the oxygen minimum zone of the central Mexican pacific across environmental gradients. *Brazilian Journal of Oceanography,* 66(2): 157–171. https://doi.org/10.1590/s1679-87592018004806602

Whitney, F.A., Freeland, H.J., Robert, M. 2007. Persistently Declining Oxygen Levels in the Interior Waters of the Eastern Subarctic Pacific. *Progress in Oceanography,* 75(2): 179–99.

https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.08.007.

Anexos

Anexo I. De acuerdo con el PNIO existen 5 zonas marinas y costeras en México:

Rivera y Villalobos (2001), proponen una zonificación costera de México en cinco vertientes que constituyen regiones oceánicas con características propias: Región I Pacífico Norte; Región II Mar de Cortés; Región III Pacífico Sur, Región IV Golfo de México, y Región V Caribe Mexicano. En cada una de estas áreas las instituciones que realizan investigación oceanográfica son:

Región I Pacífico Norte:

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior en Ensenada, Baja California (CICESE); Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, s.c., en La Paz, BCS. (CIBNOR); Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, en La Paz, BCS. (CICIMAR); Universidad Autónoma de Baja California (UABC); Universidad Autónoma de Baja California Sur, en La Paz, BCS. (UABCS); Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Investigación Oceanográfica de Ensenada (EIO-SEMAR) y Centros Regionales de Investigación Pesquera del INAPESCA, en Ensenada, BC. (CRIP).

Región II Mar de Cortés:

El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE); Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, s.c., en La Paz, BCS. (CIBNOR); Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, en La Paz, BCS. (CICIMAR); Universidad Autónoma de Baja California (UABC); Universidad Autónoma de Baja California Sur, en La Paz, BCS. (UABCS); Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Estación Investigación Oceanográfica de Topolobampo (EIOT-SEMAR); Universidad de Sonora, en Hermosillo, Sonora. (UNISON); Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa. (UAS); Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional, en Guasave, Sinaloa. (CIIDIR) y los Centros Regionales de Investigación Pesquera del INAPESCA en La Paz, BCS., Mazatlán, Sinaloa., Guaymas, Sonora. y Bahía de Banderas, Nayarit. (CRIP).

Región III Pacífico Sur:

El Instituto Politécnico Nacional; la Universidad Autónoma Metropolitana; la Universidad de Colima; la Universidad del Mar; la Universidad Nacional Autónoma de México; el Instituto Oceanográfico del Pacífico en Manzanillo, Colima. (SEMAR) y la Estación de Investigación Oceanográfica de Salina Cruz, Oaxaca (EIO-SEMAR); así como los Centros Regionales de Investigación Pesquera del INAPESCA en Manzanillo, Colima y Salina Cruz, Oaxaca.

Región IV Golfo de México:

El Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en Ciudad Victoria, Tamaulipas. (CINVESTAV); Universidad Autónoma de Tamaulipas, en Tampico, Tamaulipas. (CTU); Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en Mérida, Yucatán. (CINVESTAV); Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, en México, Ciudad de México. (ENCB); Universidad Autónoma Metropolitana (UAM); Universidad Veracruzana (UV); Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de Los Garza, NL. (UANL); Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, en Villahermosa, Tabasco (UJAT); Universidad Autónoma de Campeche, en Campeche, Campeche (UACAM); Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe en Antón Lizardo, Veracruz (IOGMC-SEMAR); Estaciones de Investigación Oceanográfica de la Secretaría de Marina, en Tampico, Tampaulipas y Ciudad del Carmen, Campeche., así como los Centros Regionales de Investigación Pesquera del INAPESCA, en Tampico, Tamaulipas., Veracruz, Veracruz., Cd. del Carmen, Campeche., Lerma, Campeche. y Yukalpeten, Yucatán.

Región V Caribe Mexicano:

El Colegio de la Frontera Sur, en Chetumal, Quintana Roo (ECOSUR); Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, en Ciudad de México (ENCB); Universidad Autónoma Metropolitana (UAM); Universidad Veracruzana (UV); Universidad de Quintana Roo, en Chetumal, Cozumel y Playa del Carmen (UQROO); Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Estación de Investigación Oceanográfica de Progreso (EIOPROG-SEMAR), en Progreso, Yucatán. y el Centro Regional de Investigación Pesquera del INAPESCA, en Puerto Morelos, Quintana Roo. Centro interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) del Insituto Politécnico Nacional CDMX.

Anexo II: Una propuesta de I+D para México de cara al futuro

México está bien equipado para diseñar y definir una Estrategia Nacional de Investigación Experimental y Desarrollo para la Innovación (ERDI) que aporte innumerables beneficios a su población y a los ecosistemas costeros y oceánicos (figura 5). Esto puede abarcar la planificación, el fomento del éxito de la economía azul del sector privado, la colaboración multisectorial y la accesibilidad. A continuación se presenta una una adaptación del modelo estadounidense.[10]

Entre las principales recomendaciones para implementar una Estrategia Nacional de Investigación y Desarrollo Experimental (ERDI) se encuentran:

Mantener una planificación y coordinación de la ERDI sólida e integrada

- Adoptar una definición cohesiva de la ERDI que abarque las infraestructuras experimentales y de observación, así como las de conocimiento y las ciber-

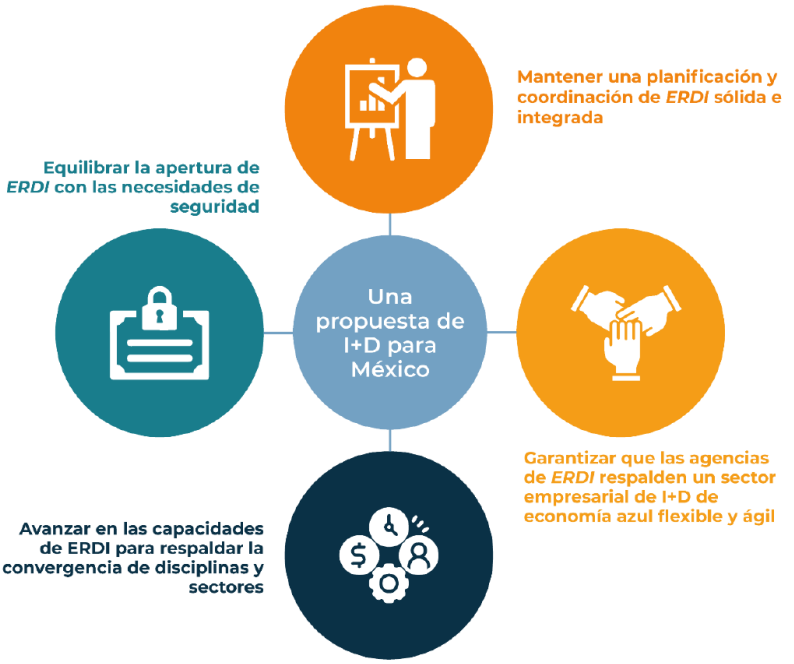

Figura 5. Estrategia Nacional de Investigación y Desarrollo Experimental para la Innovación (ERDI)

[10] https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/NSTC-NSO-RDI-_REV_FINAL-10-2021.pdf

néticas, en los procesos de planificación federal.
- Identificar las agencias ministeriales de ERDI complementarias -y sus capacidades- en todo el Gobierno Federal y las comunidades externas de I+D para informar los procesos de establecimiento de prioridades de las agencias.
- Planificar, invertir y desplegar la infraestructura de conocimiento y la ciberinfraestructura de investigación necesarias para seguir el ritmo de crecimiento de la adquisición de datos en la investigación, así como de los datos de investigación publicados, para garantizar la eficiencia y la fiabilidad de las vías y conductos científicos.
- Garantizar capacidades de ERDI consistentes, suficientes y oportunas, abordando estratégicamente los esfuerzos episódicos que pueden socavar la capacidad de satisfacer las necesidades a largo plazo.
- Revisar y documentar periódicamente las necesidades de ERDI y desarrollar procesos de planificación que incluyan la reutilización o el desmantelamiento de ERDI de baja prioridad.
- Garantizar una comunicación y una consulta coherentes para involucrar e integrar los conocimientos indígenas y locales.

Garantizar que las agencias de ERDI apoyen un sector empresarial de I+D de la economía azul flexible y ágil

- Fomentar el compromiso de la comunidad de I+D para informar sobre la planificación y priorización de la ERDI federal, por ejemplo, mediante evaluaciones y coordinación intersectorial.
- Recabar las aportaciones de los comités de la Ley de Comités Consultivos Federales (FACA) y del NSTC, ya que estos comités pueden proporcionar una valiosa información sobre las futuras necesidades de ERDI y las posibilidades de coordinación .
- Integrar procesos ágiles de diseño y decisión en la planificación y el mantenimiento de las Agencias ERDI para que las capacidades sigan el ritmo del crecimiento de los datos y los avances en informática y análisis.
- Apoyar el acceso remoto a las capacidades, herramientas y plataformas de ERDI, cuando sea necesario.
- Construir relaciones estratégicas a largo plazo con contratistas y proveedores para permitir la agilidad en la adquisición, el desarrollo, el diseño y la portabilidad de los sistemas ERDI.
- Incorporar consideraciones sobre el ciclo de vida, como los costes iniciales de construcción, funcionamiento y mantenimiento, y anticipar las futuras necesidades de modernización de las Agencias ERDI planificadas y existentes.
- Incorporar consideraciones de recursos del ciclo de vida para garantizar que las Agencias ERDI mantengan o mejoren la privacidad y otras protecciones legales
- Garantizar que los proyectos de ERDI grandes o complejos sean gestionados por personal con la experiencia adecuada en materia de diseño y gestión de proyectos para garantizar la entrega en el plazo y dentro del presupuesto.
- Seguir creando y promoviendo programas de educación STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, por sus siglas en ingles) que se comprometan directamente con el uso de las Agencias ERDI como plataformas de educación y formación y las apoyen.

- Garantizar procesos que permitan que las empresas de I+D de la Nación prosperen, fomentando la participación de talento que refleje la diversidad de México.

Avanzar en las capacidades de la ERDI para apoyar la convergencia de disciplinas y sectores

- Invertir en ERDI que complementen las necesidades disciplinarias básicas, identificando al mismo tiempo las oportunidades de mejorar las conexiones entre disciplinas y sectores.
- Considerar el uso potencial de las ERDI más allá del contexto de la misión de una sola agencia en el desarrollo de los esfuerzos de coordinación, especialmente para las mayores inversiones en ERDI de la nación.
- Garantizar que las ERDI fomenten la convergencia a través de asociaciones e intercambio de información sobre investigación.

Equilibrar la apertura de la ERDI con las necesidades de seguridad

- Buscar colaboraciones internacionales para el desarrollo de la ERDI según convenga para fomentar la cooperación internacional.
- Operar las Agencias ERDI utilizando marcos de seguridad en la investigación que equilibren la ciencia abierta con niveles adecuados de vigilancia y que defiendan los principios mexicanos de integridad.
- Garantizar las protecciones adecuadas para la ERDI que son vitales para la competitividad, la salud y la seguridad públicas, la resiliencia y la seguridad nacional (por ejemplo, la propiedad intelectual, ciertas clases de datos de investigación, las implicaciones del cambio climático).

Anexo III. Diagnóstico de investigación sobre mares y costas en México

La Red Internacional de Costas y Mares (RICOMAR) colabora con el cumplimiento del ODS 14, conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para el desarrollo nacional, a través de la formación de alianzas a nivel regional para la gestión y conservación con una visión ecosistémica.

Para ello, RICOMAR promueve una iniciativa con los siguientes objetivos:

- Elaborar un diagnóstico e identificar las necesidades de investigación en los mares y costas de México.
- Generar conocimiento científico y promover el interés por la investigación en los mares y costas de México.

La Fundación del Océano (TOF) participó en la integración de este documento, mediante el diseño y aplicación de una encuesta en línea a 308 centros de investigación en México (30 con perfil marino costero).

Asimismo, el Grupo de Cooperación Científica y Tecnológica México-Estados Unidos invitó a las instituciones de educación superior y de investigación que realizan investigaciones en el golfo de México, así como a las agencias del Gobierno Federal, a participar en el Foro de Prioridades de Cooperación Científica México-Estados Unidos con el objetivo de establecer las prioridades nacionales en materia de ciencia en el golfo de México para establecer una agenda de cooperación científica bilateral México-Estados Unidos.

A continuación, se presentan los principales resultados de ambos ejercicios:

Figura 6. Resumen de las principales líneas de acción de la Cooperación Científica México-Estados Unidos para el Golfo de México. Fuente: Resultados del Foro de Prioridades de Cooperación Científica México-Estados Unidos, 2021.

Figura 7. Principales líneas de investigación de instituciones académicas y centros de investigación en los mares y costas de México. Fuente: Resultados de la encuesta de diagnóstico del TOF, 2021.

Figura 8. Necesidad de mejorar el desarrollo de capacidades en ciencias oceánicas. Fuente: Resultados de la encuesta de diagnóstico del TOF, 2021.

Figura 9. Principales contribuciones de la investigación a la conservación y el uso sostenible de los mares y las costas. Fuente: Resultados de la encuesta de diagnóstico del TOF, 2021.

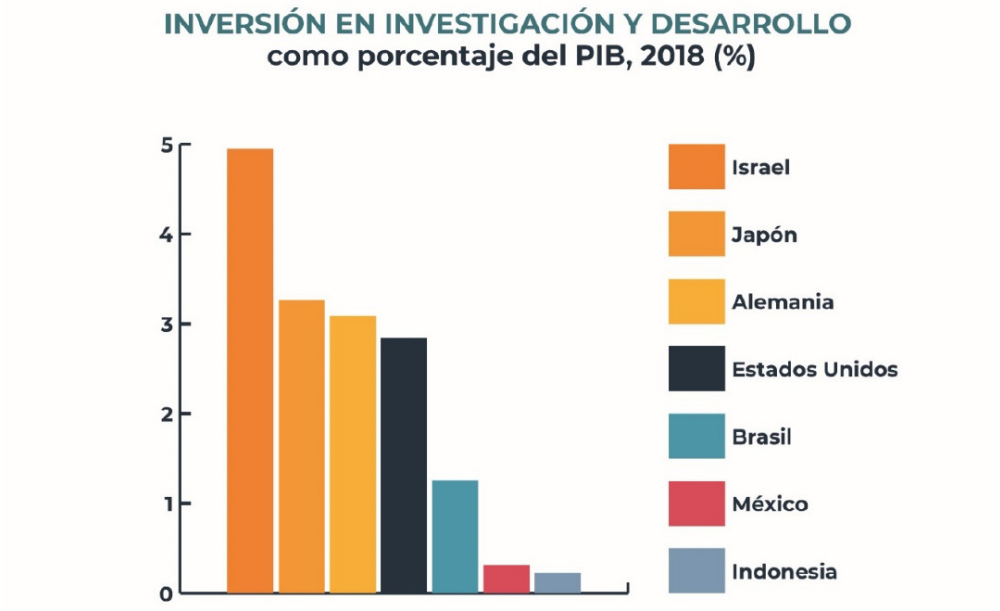

Figura 10. Gasto en investigación como porcentaje del PIB, 2018 (%). UNESCO, 2021.

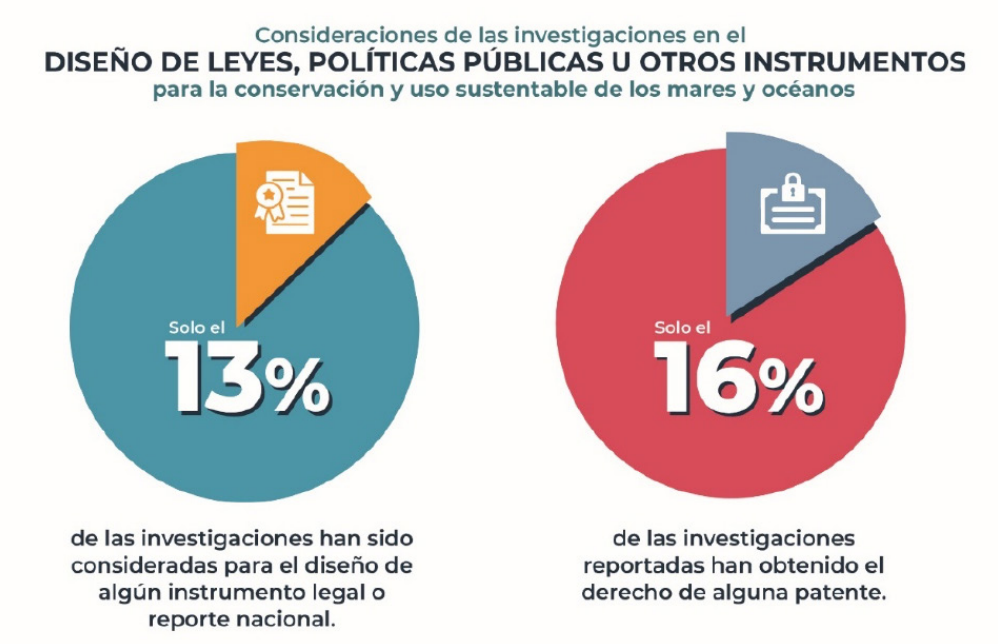

Figura 11. Consideración de la investigación en el diseño de leyes, políticas públicas y otros instrumentos para la conservación y el uso sostenible de los mares y océanos.
Fuente: Resultados de la encuesta de diagnóstico del TOF, 2021.

Figura 12. Requisitos para involucrar a las nuevas generaciones en las ciencias oceánicas.
Fuente: Resultados de la encuesta de diagnóstico del TOF 2021.

LA DÉCADA DEL OCÉANO EN MÉXICO 2021-2030:
LA CIENCIA QUE NECESITAMOS

Se realizó en el Departamento de Difusión y Publicaciones
del Instituto EPOMEX-Universidad Autónoma de Campeche.
Composición, diseño y proceso editorial a cargo de Jorge Gutiérrez Lara
Diseño de la portada Juan M. Matú

2023

ISBN 978-607-8907-12-0

doi 10.26359/EPOMEX012023