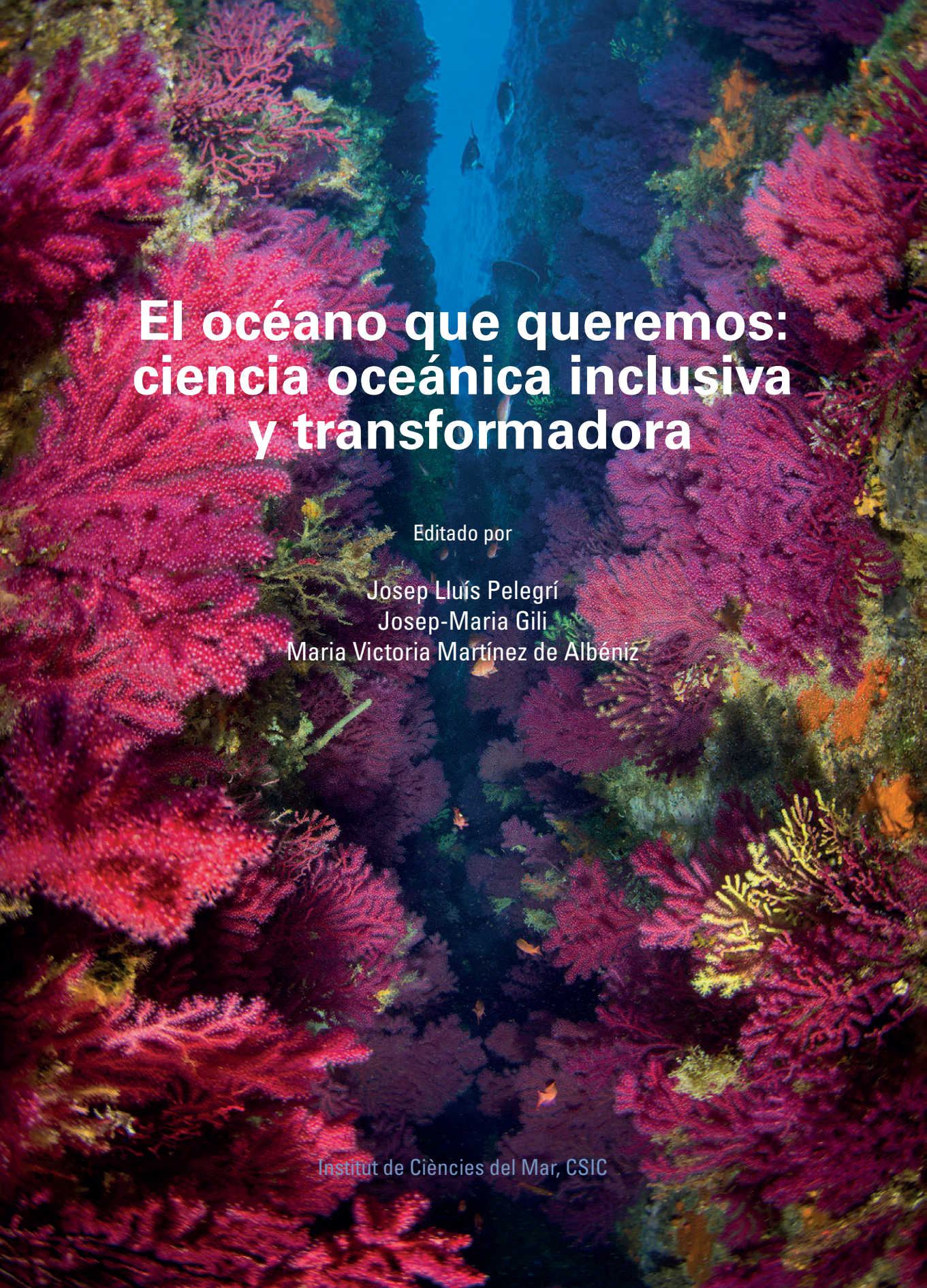


El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora

Editado por

Josep Lluís Pelegrí
Josep-Maria Gili
Maria Victoria Martínez de Albéniz

Institut de Ciències del Mar, CSIC

El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora

Editado por

Josep Lluís Pelegrí
Josep-Maria Gili
Maria Victoria Martínez de Albéniz

Capítulos coordinados por

Silvia G. Acinas, Laura Arin, Vanessa Balagué, Rafael Bartolomé, Mercedes Blázquez, Andrea G. Bravo, David Casas, Pedro Cermeño, Marta Coll, Blanca Figuerola, Carolina Gabarró, Jordi Isern, Enrique Isla, Ramiro Logares, Joan Navarro, Cristina Romera, Clara Ruiz-González, Gonzalo Simarro, Carine Simon, Jordi Sorribas, Marco Talone, Arantza Ugalde

Institut de Ciències del Mar, CSIC
Barcelona, 2022

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones

2021 2030 Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible

OceanCities

Institut de Ciències del Mar

EXCELENCIA SEVERO OCHOA

Instituto de Investigaciones Pesqueras
Siete décadas de investigaciones marinas

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

EDITORIAL CSIC

Citación recomendada:

Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.). 2022. *El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora*. Institut de Ciències del Mar, CSIC, Barcelona.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado: https://cpage.mpr.gob.es

Editorial CSIC: http://editorial.csic.es (correo: publ@csic.es)

© CSIC, 2022 Esta es una obra que se distribuye bajo Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
© J. L. Pelegrí, J. M. Gili y M. V. Martínez de Albéniz (eds.), y de cada texto, su autor

Diseño gráfico y maquetación: Jordi Corbera
Fotografía de la cubierta: Jordi Regàs
Impresión y encuadernación: Tórculo

ISBN: 978-84-00-10965-3
e-ISBN: 978-84-00-10966-0
NIPO: 833-22-043-8
e-NIPO: 833-22-045-9
Depósito Legal: M-9639-2022

Impreso en España / Printed in Spain

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.

Tabla de contenidos

Los setenta años de historia del Institut de Ciències del Mar y la Unitat de Tecnologia Marina marcan el inicio de la Década de los Océanos: hacia una ciencia oceánica inclusiva y transformadora
Josep L. Pelegrí, Maria Victoria Martínez de Albéniz, Josep-Maria Gili, Jordi Sorribas 9

El Institut de Ciències del Mar al que aspiramos: investigación marina de excelencia con compromiso social
Valentí Sallarès, Josep L. Pelegrí, Josep M. Gasol, Sònia Sagristà 15

1. **Océano limpio**
Andrea G. Bravo, Silvia G. Acinas, Cristina Romera 19

1.1. Microorganismos marinos y biotecnología azul
Josep M. Gasol, Ramon Massana, Maria Montserrat Sala, Marta Sebastián, Ramiro Logares, Pablo Sánchez, Silvia G. Acinas 20

1.2. Historia de la contaminación de metales pesados en los sedimentos del mar Catalán
Albert Palanques, Pere Puig, Jorge Guillén 24

1.3. El mercurio en un océano cambiante
Andrea G. Bravo, Isabel Sanz-Sáez, Amina T. Schartup 27

1.4. Ruido de fondo
Cristina Romera-Castillo, Lorenzo Bramanti 30

1.5. Basura marina, la nueva plaga de mares y océanos
Eve Galimany, Elena Marco-Herrero, Montserrat Ramón 33

1.6. Estrategias internacionales y los retos de la sociedad: hacia un mar sin plástico
Cristina Romera-Castillo, Vanessa Sarah Salvo 36

2. **Océano saludable y resiliente**
Clara Ruiz-González, Enrique Isla, Joan Navarro 39

2.1. El organismo planetario
Josep L. Pelegrí 40

2.2. El impacto del océano Austral en el clima
Anna Olivé Abelló, Josep L. Pelegrí 44

2.3. La vida en los océanos: de la magia de las estrellas al conocimiento científico del plancton
Magda Vila, Vanessa Balagué 47

2.4. Microorganismos en un océano cambiante
Maria Montserrat Sala, Josep M. Gasol, Ramon Massana, Dolors Vaqué 50

2.5. Un océano microbiano sin fronteras: conectando microorganismos dentro y fuera del ecosistema marino
Clara Ruiz-González, Marta Sebastián, Josep M. Gasol 53

2.6. Proliferaciones de organismos fotosintéticos: cara y cruz de los pilares de los ecosistemas marinos
Elisa Berdalet, Laura Arin, Magda Vila, Laia Viure 56

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.7. Simbiosis: una fuente de innovación para sobrevivir a un océano desafiante
Francisco M. Cornejo-Castillo, Lucía Pita 59
2.8. Los peces en un escenario de cambio global: la importancia de los primeros estadios del ciclo vital para la conservación de las poblaciones naturales
Ana Sabatés, M. Pilar Olivar, Vanesa Raya, Joan Mir-Arguimbau, Ainhoa Bernal 62
2.9. Carismáticos, amenazados y desconocidos: los depredadores marinos en el Antropoceno
Joan Giménez, Francisco Ramírez, Marta Coll, Joan Navarro 65
2.10. Integridad ecológica de los fondos marinos: conciliar conservación y explotación
Montserrat Demestre, Silvia de Juan, Alfredo Garcia-de-Vinuesa..... 68
2.11. Los colores cambiantes de la vida marina antártica
Enrique Isla, Julian Gutt..... 71
2.12. Restauración de ecosistemas profundos del margen catalán
Jordi Grinyó, Maria Montseny, Patricia Baena, Stefano Ambroso, Andreu Santín, Marina Biel, Guillem Corbera, Janire Salazar, Josep-Maria Gili 74
2.13. Pescadores y científicos: sinergias para la exploración, conservación y sostenibilidad del medio marino
Andreu Santín, Jordi Grinyó, Stefano Ambroso, Patricia Baena, Marina Biel, Guillem Corbera, Janire Salazar, Maria Montseny, Josep-Maria Gili 77
2.14. Observando desde la distancia: nuevas tecnologías para una mejor gestión del océano
Francisco Ramírez, Isabel Afán, Nixon Bahamon, Marta Coll, Joan Giménez, Joan Navarro, Jeroen Steenbeek..... 80
2.15. Hacia un transporte marítimo renovable para un océano resiliente y saludable
Jordi Solé, Antonio García-Olivares..... 84
2.16. Adaptando las playas para el futuro
Jorge Guillén, Ruth Durán, Gonzalo Simarro..... 87

3. **Océano productivo**
Mercedes Blázquez, Laura Arin, Blanca Figuerola 91
3.1. El sistema océano-atmósfera como colector y distribuidor de calor
Dorleta Orúe-Echevarría, Ignasi Vallès-Casanova, Josep L. Pelegrí..... 93
3.2. Base física de la producción primaria en los océanos
Josep L. Pelegrí, Dorleta Orúe-Echevarría, Anna Olivé Abelló, Ignasi Vallès-Casanova..... 96
3.3. Controles de la dinámica del fitoplancton en el mar Catalán
Marta Estrada, Miquel Alcaraz, Laura Arin..... 99
3.4. El poder de los productores primarios unicelulares
Pedro Cermeño, Carmen García-Comas, Caterina R. Giner, Ramiro Logares, Cèlia Marrasé, Ramon Massana, Carlos Pedrós-Alió, Maria Montserrat Sala, Rafel Simó, Javier Tamames, Sergio Vallina 102
3.5. Herramientas ómicas para la gestión de los recursos vivos y la protección de la biodiversidad de los océanos
Francesc Piferrer 105
3.6. Bienestar animal en ciencias marinas
Mercedes Blázquez, Guiomar Rotllant, Roger Villanueva 108
3.7. Contribución de los bivalvos a los servicios ecosistémicos del litoral
Montserrat Ramón, Eve Galimany 111

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.8. Hacia el seguimiento y la recuperación de las especies afectadas por la pesca en ecosistemas marinos de aguas profundas: un esfuerzo conjunto entre biología y tecnología
Jacopo Aguzzi, Joan Navarro, Maria Vigo, Ivan Masmitja, Nixon Bahamon, José Antonio García, Guiomar Rotllant, Laura Recasens, Jordi Grinyó, Marc Carreras, Joaquín del Río, Spartacus Gomariz, Joan B. Company 114
3.9. Ciencia y recursos marinos vivos: hacia un futuro diferente
Francesc Sardà, Isabel Palomera 117
3.10. La primera cogestión pesquera en Cataluña: el caso de la pesca del sonso
Pilar Sánchez, Montserrat Demestre, Ana I. Colmenero 120

4. **Océano predecible**
Marta Coll, Carolina Gabarró, David Casas 123
4.1. De mar para arriba: océanos, aire, nubes y clima
Rafel Simó, Martí Galí, Manuel Dall'Osto 124
4.2. Descifrando la recurrencia de los procesos sedimentarios marinos
Belén Alonso, David Casas, Gemma Ercilla, Ferran Estrada 127
4.3. Cartografiando el fondo marino: la resolución es la solución
Ferran Estrada, Gemma Ercilla, David Casas, Belén Alonso 130
4.4. *Mare salis intellegere*. Comprender la sal de los océanos
Nina Hoareau, Mikhail Emelianov, Joaquim Ballabrera, Carolina Gabarró, Verónica González-Gambau, Maribel Lloret, Estrella Olmedo, Marcos Portabella, Jordi Salat, Joaquín Salvador, Marta Umbert, Antonio Turiel 133
4.5. Observatorios microbianos: centinelas del cambio global
Ramon Massana, Dolors Vaqué, Maria Montserrat Sala, Josep M. Gasol 136
4.6. Turbulencia y dinámica del plancton en un océano más cálido
Miquel Alcaraz, Marta Estrada 139
4.7. Tendencias de la clorofila oceánica en tiempos de cambios globales
Francesc Peters 142
4.8. El fitoplancton y los elementos de la vida
Mariona Segura-Noguera, Elisa Berdalet, José Manuel Fortuño 145
4.9. ¿Qué papel jugará el zooplancton en un océano futuro?
Albert Calbet, Enric Saiz 148
4.10. El océano recicla materia orgánica y secuestra carbono
Miguel Cabrera-Brufau, Pedro Cermeño, Cèlia Marrasé 151
4.11. Estudiar el litoral. Entender la frontera
Jordi Camp, Eva Flo, Albert Reñé, Nagore Sampedro, Esther Garcés 154
4.12. ¿Por qué estudiamos las zonas polares?
Clara Cardelús, Vanessa Balagué, Magda Vila 156
4.13. La acidificación oceánica: tendencias, efectos y qué nos queda por aprender
Carles Pelejero, Blanca Figuerola, Eva Calvo 158
4.14. Utilidad y retos de los modelos de ecosistemas marinos para una mejor comprensión y gestión del océano
Marta Coll, Jeroen G. Steenbeek 161
4.15. Reconstruyendo el clima del pasado para entender el de hoy y el de mañana
Eva Calvo, Carles Pelejero 164

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

5. **Océano seguro**
Rafael Bartolomé, Gonzalo Simarro, Marco Talone 167
5.1. Descubriendo las geoformas submarinas peligrosas
Gemma Ercilla, David Casas, Ferran Estrada, Belén Alonso 168
5.2. Deslizamientos submarinos: el fondo marino en movimiento
Roger Urgeles 171
5.3. Cuando el océano tiembla: presente y futuro en el estudio de terremotos y tsunamis
Valentí Sallarès 174
5.4. Sinergias para una gestión costera efectiva frente a las proliferaciones de organismos marinos
Macarena Marambio, Ainara Ballesteros, Josep-Maria Gili 177
5.5. Extremo, o no tan extremo, esa es la cuestión
Marcos Portabella, Federica Polverari, Wenming Lin, Ad Stoffelen, Albert S. Rabaneda, Joe Sapp, Paul Chang, Zorana Jelenak, Giuseppe Grieco, Ana Trindade, Eugenia Makarova, Federico Cossu..... 180

6. **Océano accesible**
Jordi Sorribas, Arantza Ugalde, Jordi Isern, Ramiro Logares 185
6.1. De la libreta a la nube de datos: setenta años de ciencia marina
Savitri Galiana, Lucía Quirós, Elisa Berdalet, Xavier García, Emilio García-Ladona, Jordi Isern-Fontanet, Laia Viure..... 186
6.2. Del soporte técnico a la ciencia
Joel Sans, Arturo Castellón, Jordi Sorribas 190
6.3. Colecciones Geológicas: una herencia científica
David Casas, Gemma Ercilla, Belen Alonso, Ferran Estrada 192
6.4. Las Colecciones Biológicas de Referencia: un referente del pasado y el presente, útil para el futuro
Pere Abelló, Elena Guerrero, Ricardo Santos-Bethencourt 194
6.5. El compromiso del ICM con la igualdad de género en la investigación marina
Esther Garcés, Silvia Donoso, Elena Torrecilla, Janire Salazar, Sara Soto, Clara Cardelús, Maria Gracia Puga, Queralt Güell Bujons, Cristina González Haro, Josep L. Pelegrí, Andrea G. Bravo, Pere Puig, Mercedes Blázquez, Belén Alonso 196
6.6. La nueva generación de buques oceanográficos
Jordi Sorribas, Arturo Castellón..... 198
6.7. Observando la evolución de una partícula de agua
Joaquín Salvador, Josep L. Pelegrí 201
6.8. Las plataformas autónomas y sus aplicaciones en oceanografía
Pablo Rodríguez, Núria Pujol, Jordi Sorribas 204
6.9. Gestión de datos de campañas oceanográficas para una información accesible
Susana Diez, Jordi Sorribas..... 207
6.10. Auscultando el fondo oceánico con cables submarinos de telecomunicaciones
Arantza Ugalde..... 210
6.11. Herramientas de prevención y post-picaduras de medusas basadas en estrategias de I+D+i
Ainara Ballesteros, Macarena Marambio, Josep-Maria Gili 212

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

6.12. El surgimiento de la *iEcology* y la culturómica de la conservación para el desarrollo sostenible de los océanos
Valerio Sbragaglia, Lucía Espasandín Soneira, Jeroen Steenbeek, Karen Soacha Godoy, Jaume Piera, Marta Coll 214
6.13. Contribución de la ciencia ciudadana y los sistemas de monitoreo participativo al conocimiento y la conservación de los océanos
Karen Soacha Godoy, Jaume Piera, Sonia Liñán, Carlos Rodero, Xavier Salvador, Raúl Bardají, Valerio Sbragaglia 217

7. **Océano inspirador y estimulante**
Pedro Cermeño, Vanessa Balagué, Carine Simon 221
7.1. Una oportunidad para un desarrollo armónico con la naturaleza
Josep L. Pelegrí 222
7.2. *Mission Starfish 2030:* una ciencia integradora y que entusiasma para recuperar nuestros océanos y ríos en el marco del *Horizon Europe*
Sònia Sagristà, Elena Torrecilla 225
7.3. *Ocean Decade*. Un decenio hacia la gobernanza participativa de los océanos
Vanessa Sarah Salvo 228
7.4. Una sociedad civil comprometida con el medio marino
Carine Simon, Magda Vila, María Vicioso, Maravillas Abad, Josep L. Pelegrí 231
7.5. El corazón azul de la Tierra: conocerlo para protegerlo
Elena Martínez Batalla, María Vicioso 234
7.6. Cultura oceánica: hacia una sociedad científicamente informada y comprometida con el océano
Janire Salazar, Josep-Maria Gili, Begoña Vendrell 236
7.7. El mar explicado desde las campañas oceanográficas
Vanessa Balagué, Clara Cardelús, Josep-Maria Gili, Carine Simon, María Vicioso, Magda Vila 239
7.8. Observadores del Mar: ciencia ciudadana marina como motor transformador
María Vicioso, Paula López, Sandra Espeja, María García, Gemma Agell, Macarena Marambio, Joaquim Garrabou 242
7.9. Rigurosidad artística y creatividad científica
Vanessa Balagué, Anna Rierola, María Vicioso 245

Índice de autores 249

Índice temático 255

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Eduardo Drapier en Unsplash

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Los setenta años de historia del Institut de Ciències del Mar y la Unitat de Tecnologia Marina marcan el inicio de la Década de los Océanos: hacia una ciencia oceánica inclusiva y transformadora

Josep L. Pelegrí [1], Maria Victoria Martínez de Albéniz [2], Josep-Maria Gili [3], Jordi Sorribas [4]

El Institut de Ciències del Mar (ICM) es uno de los centros punteros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), dedicado al estudio interdisciplinar del medio marino. Bajo el lema «Ciencia oceánica para un planeta saludable», el ICM conecta estudios de procesos y ecosistemas locales con la complejidad e inteligencia de nuestro planeta océano, fomentando la transferencia de ciencia y tecnología en tópicos relacionados con la interacción entre océano y clima, la conservación y uso sostenible de los ecosistemas marinos y la mitigación del impacto de las perturbaciones naturales y antropogénicas. Por sus logros científicos y su compromiso con la sociedad, el ICM ha sido reconocido como un centro de excelencia Severo Ochoa, formando parte de una treintena de centros españoles que actualmente tienen esta acreditación y convirtiéndose en el primer y único centro marino en alcanzarla hasta la fecha.

La Unitat de Tecnologia Marina (UTM) tiene como objetivo principal el prestar servicios y apoyo técnico a toda la comunidad española de ciencia y tecnología marinas y polares. Con este fin, es un actor principal en la gestión de dos grandes infraestructuras científico-técnicas singulares (ICTS) del Ministerio de Ciencia e Innovación de España –la ICTS FLOTA que agrupa a diez buques de investigación oceanográfica y la ICTS BAEs compuesta por un campamento internacional y dos bases antárticas– además de todo el equipamiento e instrumentación científica y tecnológica de primera línea. La UTM es además un centro nacional de datos oceanográficos y polares, formando parte de la infraestructura europea de datos marinos e internacional de datos polares.

En el 2021, el ICM y la UTM cumplen setenta años de historia, con veinte años ya en su actual sede frente a la playa del Somorrostro de Barcelona. El 24 de noviembre de 1939 se creó el CSIC con José Ibáñez como presidente y José María Albareda como su ideólogo y primer secretario general. De acuerdo a Guerra y Prego (2003), fue Albareda quien consiguió que el 10 de abril de 1943 naciese en Barcelona, adscrito al CSIC pero con sede en la Universitat de Barcelona, el Instituto de Biología Aplicada (IBA), cuyo primer director fue Francisco García del Cid. El 18 de febrero de 1949, el IBA creó la Sección de Biología Marina, que en ese mismo año ya disponía de laboratorios en Blanes, Castelló y Vinaròs.

El 14 de enero de 1949, Buenaventura Andreu escribió un informe titulado «Proyecto para la creación de un centro de investigaciones pesqueras dependiente del CSIC» que conduciría a que el 3 de octubre de 1951, por resolución de la Junta de Gobieno del CSIC, la Sección de Biología Marina del IBA pasase a convertirse

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Los siete grandes logros del Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible

Logro 1: Un océano limpio, donde se detectan y se reducen o eliminan las fuentes de contaminación. La sociedad genera una gran variedad de contaminantes y basura marina –como son los compuestos orgánicos tóxicos y persistentes, los metales pesados y los plásticos– y ocasiona diversas alteraciones físicas y biogeoquímicas del medio acuático –desde la eutrofización por exceso de nutrientes hasta el ruido subacuático de origen antropogénico, entre otras. Estas alteraciones provienen de una amplia variedad de fuentes contaminantes terrestres y marinas, que incluyen fuentes localizadas y no localizadas. Sus efectos ponen en peligro los ecosistemas, la salud humana y los recursos naturales. Es esencial colmar las lagunas de conocimientos interdisciplinarios sobre las causas y las fuentes de contaminación y sus efectos en los ecosistemas y la salud humana. Estos conocimientos apuntalarán la formulación conjunta de soluciones compartidas para eliminar la contaminación en origen, mitigar las actividades nocivas y contribuir a la transición de la sociedad hacia una economía circular.

Logro 2: Un océano saludable y resiliente, donde se entienden, protegen, restauran y gestionan los ecosistemas marinos. La degradación de los ecosistemas marinos se está acelerando debido a las actividades insostenibles llevadas a cabo en tierra y mar. Para gestionar los ecosistemas marinos y costeros de forma sostenible, y protegerlos o restaurarlos cuando sea necesario, hace falta mejorar nuestro conocimiento sobre los ecosistemas y sus reacciones a factores múltiples de perturbación. Esto se aplica tanto a la degradación local del medio litoral y marino como a los efectos globales sobre el medio marino asociados al cambio climático. Este conocimiento es imprescindible para desarrollar herramientas que permitan poner en práctica acciones que creen resiliencia, evitando situaciones de no retorno y garantizando así que los ecosistemas sigan prestando sus servicios para la salud y el bienestar de la sociedad y del planeta en su conjunto.

Logro 3: Un océano productivo, que sustente de forma sostenible un suministro de alimentos y una economía oceánica. El océano es un pilar clave en el desarrollo económico mundial y el bienestar y la salud del ser humano en el futuro, entre otras cosas en cuanto a la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia para cientos de millones de personas de las más pobres del mundo. Son esenciales los conocimientos y las herramientas para apoyar la recuperación de las poblaciones marinas explotadas, con prácticas de pesca y acuicultura sostenibles, al tiempo que se protege la diversidad biológica esencial y los ecosistemas. El océano también proporciona bienes y servicios fundamentales a una amplia variedad de industrias, como la industria extractiva, la energética, el turismo, el transporte y la farmacéutica. Cada uno de estos sectores tiene necesidades específicas en conocimientos, tecnología e innovación, así como en instrumentos de apoyo a la toma de decisiones que minimicen los riesgos y optimicen el desarrollo de una economía oceánica sostenible. Los gobiernos también necesitan información e instrumentos a fin de orientar el desarrollo de economías oceánicas sostenibles y promover los sectores marinos.

Logro 4: Un océano predecible, que permita a la sociedad comprender y responder a sus condiciones cambiantes. El enorme volumen del océano no se ha cartografiado ni observado adecuadamente, ni se comprende plenamente. Es esencial mejorar la exploración y comprensión de los elementos que controlan los cambios en el océano, incluidos sus componentes

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

físicos, químicos y biológicos, y sus relaciones con la atmósfera y la criosfera, en particular en relación con el cambio climático. Este conocimiento va desde la línea litoral hasta la alta mar y desde la superficie hasta las profundidades oceánicas, incluyendo condiciones oceánicas pasadas, actuales y futuras. La comprensión integral de las interconexiones y respuestas en los ecosistemas oceánicos sustentará las predicciones necesarias para una ordenación dinámica de los océanos, adaptada a los cambios en el entorno y el uso del océano.

Logro 5: Un océano seguro, donde la vida y los medios de subsistencia están protegidos de los peligros relacionados con el océano. Los peligros hidrometeorológicos, geofísicos y biológicos, así como los causados por el ser humano, tienen efectos devastadores, en cascada e insostenibles para las comunidades costeras, los usuarios de los océanos, los ecosistemas y las economías. La frecuencia e intensidad cambiantes de los peligros relacionados con las condiciones meteorológicas y con el clima están exacerbando estos riesgos. Se necesitan mecanismos y procesos para evaluar los riesgos prioritarios, mitigar, predecir y alertar sobre estos peligros, y formular las respuestas flexibles para reducir los efectos a corto y largo plazo en la tierra y el mar. Esto implica disponer de datos oceánicos de mayor densidad y mejores sistemas de predicción, incluidos los relacionados con el nivel del mar, las condiciones meteorológicas marinas y el clima, en tiempo casi real y a escalas de décadas. Estas mejoras, acompañadas de la educación, divulgación y comunicación, permitirán formular políticas y adoptar decisiones encaminadas hacia una mayor resiliencia individual y comunitaria.

Logro 6: Un océano accesible, con un acceso abierto y equitativo a información, datos y tecnología bajo los principios FAIR, que aseguran que los mismos sean identiFicables, Accesibles, Interoperables y Reutilizables. Las desigualdades formativas en ciencias oceánicas y en el conocimiento de nuestro entorno deben erradicarse y para ello es imprescindible asegurar el acceso a los conocimientos, a la tecnología y a los datos fruto de la experimentación y la observación del océano, junto al conocimiento preciso de sus orígenes y control de calidad. Esto debe ir acompañado de mayores destrezas y oportunidades de colaborar en la recopilación de datos, la generación de conocimientos y el desarrollo tecnológico, en particular en paises menos desarrollados, regiones sin acceso al mar y pequeños estados islas, cuyo bienestar no es ajeno al conocimiento global de nuestro planeta. La gestión, innovación y adopción de estrategias y políticas sostenibles mejorará con una mayor y mejor divulgación de conocimientos oceánicos entre la comunidad científica, los gobiernos, los educadores, las empresas, el sector industrial y el público general, contribuyendo a los objetivos sociales relacionados con el desarrollo sostenible.

Logro 7: Un océano inspirador y estimulante, que la sociedad entienda y valore en relación con el bienestar humano y el desarrollo sostenible. A fin de motivar un cambio de conducta y garantizar la eficacia de las soluciones formuladas en el marco de la Década, es necesario un cambio profundo en la relación entre la sociedad y el océano. Esto se puede lograr mediante enfoques basados en la cultura marina, herramientas tradicionales e innovadoras de educación y sensibilización, y medidas para garantizar un acceso físico equitativo al océano. Estos enfoques, en conjunto, generarán una comprensión más amplia de los valores económicos, sociales y culturales del océano por parte de la sociedad, y de la multitud de funciones que desempeñan para defender la salud, el bienestar y el desarrollo sostenible. Este resultado pondrá de relieve la belleza y el carácter inspirador del océano, influyendo así en la próxima generación de científicos, responsables políticos, funcionarios gubernamentales, administradores e innovadores.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

en un nuevo instituto del CSIC, el Instituto de Investigaciones Pesqueras (IIP). El IIP, cuyo primer director fue Francisco García del Cid, tuvo su sede central en Barcelona, con sus instalaciones iniciales en la Universitat de Barcelona y con laboratorios en Blanes (director Carles Bas), Castelló (director Buenaventura Andreu) y Vinaròs (que dependía de Castelló).

Las tres sedes iniciales del IIP (Barcelona, como sede central, Blanes que dependía de Barcelona, y Castelló-Vinaròs) se ampliaron progresivamente, en septiembre de 1952 con la sede de Vigo y en verano de 1957 con la sede de Cádiz. El 22 de junio de 1963, se inauguró el edificio de la sede del IIP en Barcelona, un edificio de 2 plantas con un amplio acuario en su planta baja, que estuvo localizado en la actual Plaça del Mar, en el barrio marinero de la ciudad, la Barceloneta.

En 1979, el IIP se desgajó en cuatro centros independientes: el instituto sede central de Barcelona, que en 1987 pasó a llamarse Institut de Ciències del Mar, el Instituto de Investigacións Mariñas en Vigo, el Institut d'Aqüicultura Torre de la Sal en Castellón y el Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía en Cádiz (Guerra y Prego, 2011). Ya más tarde, en octubre de 1985, el laboratorio de Blanes se convertiría en el Centre d'Estudis Avançats de Blanes, y en 1992 se creó la Unidad de Gestión de Buques Oceanográficos que, más tarde en el año 2000, se convertiría en la UTM.

Fueron investigadores y técnicos del ICM quienes en 1988 establecieron la primera estación antártica española que finalmente cristalizaría en la Base Antártica Española Juan Carlos I, que desde 1999 es gestionada por la UTM. La UTM también es responsable de gestionar diversos buques oceanográficos, entre ellos el B/O García del Cid (1979, que inicialmente dependía del IIP) y dos grandes buques oceanográficos, el B/O Hespérides (1991) y el B/O Sarmiento de Gamboa (2008). Desde este mismo año 2021, con la integración del Instituto Español de Oceanografía como centro del CSIC, los buques que gestiona el CSIC componen ya el 90% del conjunto de la flota oceanográfica española.

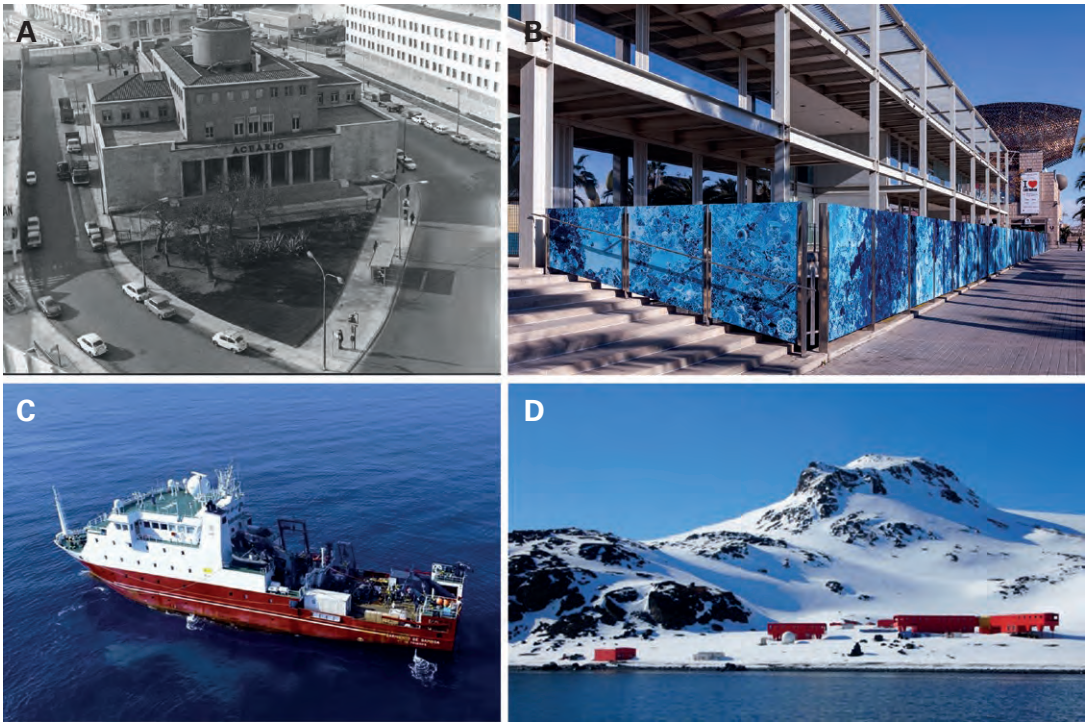


Figura 1. A, antigua sede del Instituto de Investigaciones Pesqueras en la actual Plaça del Mar del barrio de la Barceloneta. B, fachada de la sede actual de ICM, UTM i CMIMA. C, el B/O Sarmiento de Gamboa, uno de los buques de la ICTS FLOTA. D, panorámica de la base antártica Juan Carlos I.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Directores del Instituto de Investigaciones Pesqueras, Institut de Ciències del Mar y de la Unitat de Tecnologia Marina

Instituto de Investigaciones Pesqueras (1951-1979)

1951-1965 Francisco García del Cid (Bas 2011)
1965-1967 Ramon Margalef (Castellví 2012)
1967-1979 Buenaventura Andreu (Guerra 2012)

Instituto de Investigaciones Pesqueras (Barcelona, 1979-1987) - Institut de Ciències del Mar (1987-presente)

1979-1983 Buenaventura Andreu (Guerra 2012)
1983-1987 Carles Bas (Sardà 2012)
1987-1991 Andrés Maldonado (Alonso y Díaz 2012)
1991-1994 Enrique Macpherson (Olivar y Abelló 2013)
1994-1995 Josefina Castellví
1995-1997 Marta Estrada
1997-2001 Rosa Flos
2001-2009 Dolors Blasco
2009-2018 Albert Palanques
2018-presente Josep Lluís Pelegrí

Unitat de Tecnologia Marina (2001-presente)

2000-2012 Juan José Dañobeitia
2012-2013 Enrique Tortosa
2013-2016 Albert Figueras
2016-presente Jordi Sorribas

El ICM y la UTM se trasladaron en el 2001 a su sede actual, un edificio de tres plantas y sótano (15 000 m^2 construidos) localizado al final del Paseo Marítimo de la Barceloneta, y se creó una estructura administrativa y logística para apoyar el funcionamiento de ambas instituciones: el Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals (CMIMA). De este modo se constituyó el principal núcleo de conocimiento científico-técnico marino y polar no solo de España sino también de todo el Mediterráneo, en primera línea de playa y cerca del centro urbano de Barcelona, con un fuerte arraigo en su tejido social. ICM y UTM centran gran parte de sus actividades profesionales en el desarrollo sostenible, y los equipos de coordinación y trabajo de estos centros mantenemos un compromiso personal y vital por la integración harmónica de la sociedad con la naturaleza a la cual pertenecemos.

Coincidiendo con el inicio del Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (UN 2021), este setenta aniversario de la creación del IIP es una excelente oportunidad para exponer cómo la investigación actual del ICM y la tecnología y servicios prestados tanto por ICM como UTM se enfocan plenamente hacia los objetivos del desarrollo sostenible. Es por ello que este libro, escrito en su mayor parte por investigadores y tecnólogos vinculados al ICM y la UTM, se estructura en siete capítulos centrados en los siete grandes logros que persigue la Década: un océano limpio, saludable y resiliente, productivo, predecible, seguro, accesible e inspirador.

Referencias

Alonso B., Díaz J.I. 2012. Andrés Maldonado López. Sci. Mar. 76: 633-636.
Bas C. 2011. Francisco García del Cid Arias. Sci. Mar. 75: 823-826.
Castellví J. 2012. Ramon Margalef López. Sci. Mar. 76: 217-220.
Castellví J. 2017. Antoni Ballester i Nolla. Sci. Mar. 81: 139-140.
Guerra A. 2012. Buenaventura Andreu Morera. Sci. Mar. 76: 221-224.
Guerra A., Prego R. 2003. El Instituto de Investigaciones Pesqueras. Tres décadas de historia de la investigación marina española. Serie de Estudios sobre la Ciencia 33, CSIC, 341 pp.
Guerra A., Prego R. 2011. Origen y desarrollo de la investigación marina en el CSIC. In: Puig-Samper M.A., Rebok S. (eds.), España Explora Malaspina 2010. Lunwerg, pp. 109-117.
Olivar M.P., Abelló P. 2013. Enrique Macpherson Mayol. Sci. Mar. 77: 9-12.
Sardà F. 2012. Carles Bas i Peired. Sci. Mar. 76: 425-428.
UN 2021. Decade of Ocean Sciences for Sustainable Development. www.oceandecade.org

(1) Director ICM y CMIMA, CSIC
(2) Editora administrativa *Scientia Marina*, CSIC
(3) Vicedirector de Cultura Científica Marina ICM, CSIC
(4) Director UTM, CSIC

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14048

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Jordi Regàs

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

El Institut de Ciències del Mar al que aspiramos: investigación marina de excelencia con compromiso social

Valentí Sallarès [1], Josep L. Pelegrí [2], Josep M. Gasol [3], Sònia Sagristà [4]

Los océanos son fundamentales para la vida en la Tierra. Ellos sostienen los ecosistemas, estabilizan el sistema climático y proporcionan los recursos que hacen de la Tierra un planeta habitable para la humanidad. Sin embargo, la actividad humana está provocando rápidos cambios globales que afectan la salud de los océanos, entendida como su resiliencia para mantenerse dentro de ciertos límites. El calentamiento global, las fluctuaciones climáticas, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos y los eventos climáticos extremos perturban las economías de los países costeros y afectan la vida cotidiana de sus habitantes. A estos factores de estrés ambiental se le añaden la invasión de estructuras antrópicas en el litoral, la contaminación marina y la sobrepesca, que alteran las poblaciones marinas, dañan los ecosistemas y amenazan la biodiversidad. Además, los océanos están sujetos a diversos riesgos naturales, que golpean episódicamente las costas causando enormes pérdidas humanas y económicas.

Investigación marina para un planeta saludable

El conocimiento fundamental y aplicado, la acción decidida, el compromiso social y la gestión coordinada son objetivos esenciales para hacer frente a estos retos globales y facilitar el desarrollo sostenible de la humanidad. En los últimos años, el Institut de Ciències del Mar (ICM) ha realizado un gran esfuerzo para adaptar su visión de futuro a esta realidad y contribuir de forma efectiva para alcanzar una relación sostenible con la naturaleza. Así, bajo el lema «Investigación marina para un planeta saludable», el equipo humano del ICM se ha comprometido a abordar estos objetivos a través de la investigación de frontera y la transferencia de conocimiento y tecnología a la sociedad, en torno a tres retos: el conocimiento de las interacciones entre el océano y el clima; la conservación y el uso sostenible de la vida y los ecosistemas marinos; y la comprensión y mitigación del impacto de los riesgos naturales y antropogénicos. El establecimiento de estos retos y de una visión de futuro compartida es fruto de un largo proceso de análisis y reflexión interno que ha permitido diseñar una hoja de ruta que consolide las fortalezas, mitigue las debilidades, y aproveche las oportunidades estratégicas mediante un esfuerzo colectivo.

Este ejercicio colectivo, con una estructura lo más participativa posible, ha supuesto un cambio de paradigma no solo en la visión y la misión del centro, sino también en su organización. Para que todas las voces tengan cabida, al modelo clásico de gobernanza *top-down* (de arriba a abajo: junta, claustro y asamblea) le acompañan ahora distintos comités y grupos de trabajo *bottom-up* (de abajo a arriba) que actúan de forma coordinada en los ámbitos de investigación, servicios, transferencia de conocimiento, igualdad (Garcés *et al.* 2022) y divulgación y comunicación. Se han creado también un comité social externo para acercarnos a la ciudadanía y uno científico para asesorarnos y guiar nuestra evolución. Conscientes de la importancia capital del diálogo social, estos cambios estructurales se han visto reflejados en una renovación de la imagen corporativa y de nuestra proyección externa, como primer paso para acercarnos a la sociedad.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 1. Parte del equipo humano del Institut de Ciències del Mar. Fuente: ICM-CSIC.

De la excelencia científica al compromiso social

La nueva imagen del ICM forma parte de una estrategia institucional guiada por criterios de excelencia en la investigación, compromiso social, voluntad de arraigo al territorio y de proyección y reconocimiento internacional. Este impulso permitió alcanzar en 2020 un gran éxito en la historia del ICM: la obtención de la acreditación de excelencia Severo Ochoa, otorgada por el Ministerio de Ciencia e Innovación a los centros de investigación estatales que son referentes en el escenario internacional. El ICM forma parte de una treintena de centros de todas las disciplinas científicas que tienen esta distinción, siendo el primer y único centro de investigación marina que lo ha conseguido. La obtención de la acreditación Severo Ochoa ha supuesto un impulso decisivo para profundizar en la transformación del instituto, consolidando su condición de referente internacional en investigación marina y de garante de los valores de sostenibilidad y conciencia planetaria ante la sociedad.

La asignación anual de un millón de euros hasta 2023 que acompaña al galardón ha permitido implementar un plan estratégico estructurado en dos pilares: el fortalecimiento de áreas operacionales clave para aumentar el impacto de la investigación, y el refuerzo de la estrategia científica institucional. Por un lado, se ha dotado de recursos humanos y económicos a la Oficina de Apoyo a la Investigación. Esta oficina está concebida como un engranaje entre los grupos de investigación y la administración en gestión de proyectos, divulgación y comunicación, formación del personal, trato personal y ambiente de trabajo, captación de recursos y transferencia de conocimiento. Por otra parte, la consolidación de la estrategia científica se ha materializado en un conjunto de convocatorias competitivas, fundamentadas en los principios de transparencia, fomento del talento joven, implementación de medidas de igualdad, y creación de sinergias científicas. Estas convocatorias han permitido aumentar considerablemente la atracción de talento externo y retener el talento interno, reforzar diversas líneas de investigación estratégicas y mejorar las infraestructuras científicas y técnicas.

Además de los beneficios económicos directos y del prestigio derivado de la acreditación Severo Ochoa, la nueva dinámica de trabajo ha permitido fortalecer la representación institucional del ICM en diversos ámbitos de gran relevancia internacional. Entre los logros más trascendentes cabe destacar la implicación y protagonismo en el marco del Decenio de la Ciencia Oceánica para el Desarrollo Sostenible (2021-2030), impulsada por la UNESCO, donde el ICM lidera y coordina el programa *Ocean Cities*, cuyo objetivo es impulsar unas ciudades costeras más resilientes y hacer más sostenible la relación de

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. Panorámica de uno de los patios que acogieron actividades de la Biennal *Ciutat i Ciència 2021*. Fuente: ICM-CSIC.

sus ciudadanos con el océano. En el marco de este Decenio de los Océanos, el ICM también se ha postulado como centro colaborador de la UNESCO para el Mediterráneo.

En el ámbito local, el ICM ha tejido alianzas con el Ayuntamiento de Barcelona para desarrollar iniciativas que faciliten las interacciones entre ciencia y sociedad y que, al mismo tiempo, fomenten la concienciación de la ciudadanía sobre los límites planetarios, la sostenibilidad y la crisis climática mediante proyectos como *Barcelona Mar de Ciència* o participando como actor relevante en la *Biennal Ciutat i Ciència 2021*.

Un proyecto común

Al margen de estas metas institucionales, la progresiva consolidación del ICM en los últimos años se manifiesta también en los numerosos éxitos científicos, individuales y colectivos, que incluyen la coordinación de varios proyectos europeos dentro del programa *Horizon 2020*, la consecución de la primera *European Research Council Advanced Grant*, el aumento continuado de publicaciones de alto impacto, y los numerosos premios y reconocimientos a miembros del instituto.

Las perspectivas actuales parecen pues bastante favorables para el crecimiento del ICM, pero entrañan también riesgos notables en un contexto político inestable y una dinámica socioeconómica compleja y cambiante. La consolidación del ICM como protagonista destacado en el escenario local e internacional requerirá ahondar en la continua transformación del centro para, por un lado, mantener y seguir mejorando la capacidad formativa y la investigación innovadora de excelencia y, por otro, responder de forma efectiva al creciente compromiso social y ambiental. Consideramos que este doble reto, que solo será alcanzable mediante el esfuerzo colectivo, debe guiar las decisiones y acciones institucionales del ICM en el futuro próximo.

Referencias

Garcés E., Donoso S., Torrecilla E., *et al.* 2022. El compromiso del ICM con la igualdad de género en la investigación marina. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 196-197.

(1) Vicedirector de Estrategia Científica ICM, CSIC
(2) Director ICM y CMIMA, CSIC
(3) Director científico Severo Ochoa ICM, CSIC
(4) Coordinadora Oficina de Apoyo a la Investigación. ICM, CSIC

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14049

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Enric Badosa

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

1. Océano limpio

Andrea G. Bravo, Silvia G. Acinas, Cristina Romera

Nuestro planeta azul está rodeado en un 70% de su superficie por océanos y mares. La revolución industrial supuso un gran avance en el desarrollo de la economía y bienestar de nuestra especie humana, pero a la vez conllevó a un aumento drástico de la contaminación en nuestros mares y océanos. Nuestra sociedad genera una gran variedad de residuos contaminantes, como la basura marina, los plásticos, las sustancias químicas peligrosas y los metales pesados. Incluso, el ruido subacuático antropogénico se considera ya un tipo de contaminación. Estos contaminantes provienen de una amplia variedad de fuentes terrestres y marinas, que incluyen fuentes localizadas y no localizadas. Las actividades humanas han provocado también un aumento de nutrientes (eutrofización) en el océano con graves implicaciones como proliferación excesiva de fitoplancton, que puede liberar toxinas o disminuir la concentración de oxígeno disuelto en el océano.

La contaminación resultante y creciente será insostenible para el océano y pone en peligro los ecosistemas, los medios de subsistencia y por lo tanto la salud humana a nivel global. Es esencial mejorar el conocimiento sobre las fuentes de contaminantes, sus posibles transformaciones y sus efectos en los ecosistemas y la salud humana. La investigación y desarrollo de soluciones para evitar que los contaminantes sigan llegando al mar debe ser una prioridad en las agendas de política medioambiental. Entre las soluciones propuestas están la mejora de infraestructuras para evitar que los residuos urbanos lleguen a la costa, la neutralización química de los contaminantes antes de que lleguen al mar o el uso de microorganismos, que tengan un papel principal en las transformaciones de los contaminantes. Muchos de los procesos de detoxificación que utilizan los microorganismos pueden ser potencialmente implementados en futuros procesos de biorremediación. Estos conocimientos apuntalarán la formulación conjunta de soluciones compartidas para eliminar la contaminación en el origen, mitigar las actividades nocivas, reducir los niveles de los contaminantes en el océano y contribuir a la transición de la sociedad hacia una economía circular. Por último, es imprescindible concienciar a la población de la importancia del océano en la vida humana y de los problemas que le afectan para lograr un esfuerzo colectivo que reduzca la fuerte presión antropogénica a la que ahora está sometido.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.1. Microorganismos marinos y biotecnología azul

Josep M. Gasol, Ramon Massana, Maria Montserrat Sala, Marta Sebastián, Ramiro Logares, Pablo Sánchez, Silvia G. Acinas

Probablemente es la historia sobre biotecnología y descubrimiento de biodiversidad que más gente conoce: la que relaciona los científicos Thomas D. Brock y Kary Mullis con el condenado a muerte Kirk Bloodsworth. En los años 60, Thomas Brock estudió en Yellowstone los microorganismos hipertermófilos (procariotas que se desarrollan a temperaturas muy altas). Encontró una bacteria que crece y se divide a temperaturas de hasta 70 °C, y la llamó *Thermus aquaticus*. Trabajó por el placer del conocimiento, para comprender los límites de la vida. Nadie le pidió nunca que hiciera investigaciones «aplicadas». Muchos años después, Kary Mullis recordó que este procariota replica su ADN a altas temperaturas y desarrolló un método para copiar y multiplicar cualquier molécula de ADN mediante una enzima aislada de *Thermus*. Esta técnica, llamada reacción en cadena de la polimerasa (PCR), se ha convertido en una palabra de moda habitual para la mayoría de nosotros y le hizo ganar el premio Nobel de Química, a la vez que él y su empresa ganaban mucho dinero. Y he aquí que unos años después, la primera vez que se utilizó la PCR en un caso judicial, permitió demostrar que Kirk Bloodsworth no era responsable del asesinato del que le habían acusado. Brock, el descubridor de la biodiversidad, nunca pensó que su investigación básica podría llegar a hacer que algunas personas fueran ricas, otras absueltas de asesinato y la mayor parte de nosotros nos hiciéramos pruebas para detectar la COVID19. La investigación básica en diversidad permitió avances y desarrollos biotecnológicos muy significativos.

Muchos microorganismos, y muy diversos

El océano rebosa de microbios. Hasta 10^{29} procariotas y eucariotas unicelulares se reparten en una cantidad estimada de 10^{11} especies diferentes (Locey y Lennon 2016). Por su amplio repertorio metabólico, inmensamente mayor que el de los eucariotas, los procariotas conducen los ciclos biogeoquímicos de la Tierra (Falkowski *et al.* 2008) hasta el punto que un mundo de grandes eucariotas pluricelulares (es decir, plantas y animales) no sería sostenible sin los microorganismos. Cada procariota tiene de 2000 a 7000 genes y cada protista (es decir, un eucariota unicelular) unos 30 000. Aunque la mayor parte de la maquinaria genética de los microbios trata de funciones esenciales comunes a la mayoría de ellos (como la duplicación del ADN, la división celular, etc.), también hay una gran cantidad de «genes funcionales», que codifican funciones y metabolismos específicos y que son los que dirigen los ciclos biogeoquímicos. Para una determinada función específica, hay muchas variantes genéticas distintas de microbios diferentes: a menudo cientos de variantes en una misma ubicación. Con un poco de matemáticas sencillas se puede imaginar la inmensa diversidad en las funciones biogeoquímicas que pueden hacer los microbios. Pueden fijar el nitrógeno atmosférico en forma de amoníaco, pero también convertir el amoníaco en nitrito y volverlo a nitrógeno gas. Pueden oxidar el hierro reducido, pero también reducir el hierro oxidado (y corroer las tuberías y hacer que funcionen mal) y mientras algunos usan el metano como

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

fuente de carbono, otros producen metano. Los metabolismos microbianos son extremadamente versátiles y pueden degradar multitud de sustancias producidas de manera autóctona en el océano, pero también muchas sustancias alóctonas: las que los humanos hemos introducido, como plásticos, petróleo o todo tipo de productos químicos. Y es probable que ejecuten otras muchas funciones que ni siquiera sabemos que existen. En una investigación reciente del océano profundo tropical y subtropical, hemos encontrado más de 600 000 genes microbianos únicos de este hábitat, de los cuales el 58% no se habían observado antes y el 63% de estos tienen una función por ahora desconocida (Acinas *et al.* 2021). Aunque algunas de estas nuevas funciones pueden ser similares a otras descritas anteriormente, algunas pueden ser nuevas para la ciencia.

Microorganismos oceánicos y economía

No es extraño, por tanto, que los genes presentes en los microbios oceánicos sean parte de los fundamentos de la llamada economía azul, la economía que se genera a partir de productos o servicios derivados del océano. El descubrimiento de organismos que contienen moléculas y genes de interés comercial ha crecido paralelo a la exploración de la biodiversidad marina. Para 2025, se prevé que el mercado mundial de biotecnología marina llegará a los 6400 millones de dólares, y que incluirá una amplia gama de supuestos comerciales dentro de las industrias farmacéutica, de biocombustibles y química. Desde 2017, un total de 12.998 secuencias genéticas provenientes de 862 especies marinas han sido patentadas con protección internacional en virtud del Tratado de Cooperación de Patentes (figura 1). La mayor parte de estas patentes se asocian a especies microbianas. Representan más del 73% de todas las secuencias patentadas en las bases de datos (Blasiak *et al.* 2018), a pesar de constituir solo el 19% de las especies recogidas en el Registro Mundial de Especies Marinas (WoRMS). Esto indica el gran potencial de los microbios marinos para aplicaciones biológicas.

Uso biotecnológico de los microorganismos marinos: algunos ejemplos relevantes

¿Cómo se pueden utilizar biotecnológicamente las funciones microbianas? La producción de biomasa es uno de los procesos más antiguos. La biomasa microalgal se ha recolectado como alimento y también se ha utilizado como biocombustible desde hace mucho tiempo. Los polisacáridos (agar y carraginatos son los más conocidos), y otros compuestos de alto peso molecular como los alginatos, se usan en la industria alimentaria y en la industria cosmética, a menudo utilizando el origen oceánico del principio activo microbiano para avalar la utilidad del producto. Los biosurfactantes,

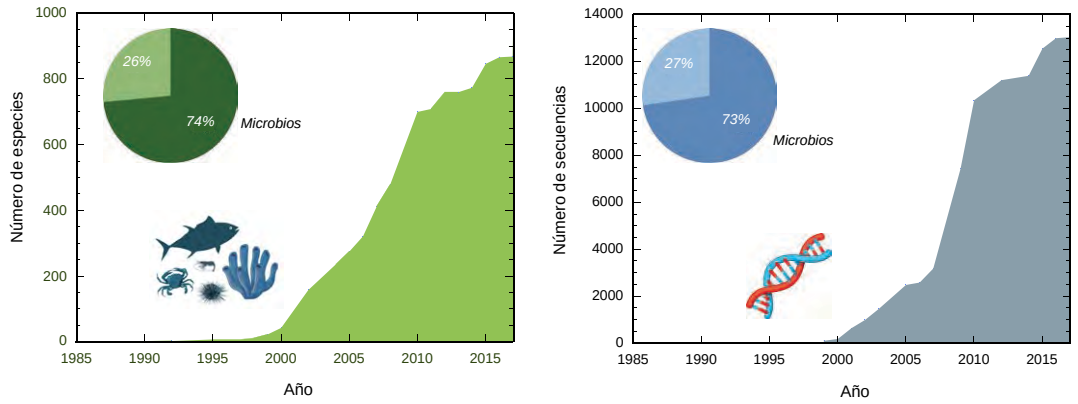


Figura 1. Interés comercial creciente por los recursos genéticos marinos. Número acumulado de especies marinas con secuencias patentadas a lo largo del tiempo (1988–2017) (A) y secuencias patentadas de especies marinas (B). En los gráficos esféricos, las proporciones correspondientes a los microbios. Adaptado de Blasiak *et al.* (2018).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

los bioemulsionantes o los exopolisacáridos de origen microbiano también tienen aplicaciones en ingeniería (en perforación de rocas) y las sílices derivadas de bacterias, en forma de nuevos biosilicatos con propiedades eléctricas, ópticas y catalíticas únicas, también tienen un gran potencial en la ciencia de nanomateriales (OECD 2013). A pesar de que la mayoría de los antibióticos utilizados actualmente se aislaron de organismos terrestres, se cree que las bacterias y los hongos marinos son fuentes prometedoras para la bioprospección y para nuevos descubrimientos.

Además de la aplicación de subproductos del crecimiento microbiano, podemos destacar el papel de los microbios en la degradación de sustancias. Bacterias degradadoras de hidrocarburos como *Alcanivorax*, *Cycloclasticus* o *Marinobacter* se utilizan junto con agentes tensioactivos para la biorremediación de los derrames de petróleo en el océano. Se ha demostrado que algunas bacterias son capaces de subsistir solo degradando hidrocarburos, y se han encontrado en todos los océanos, incluso en los puntos más profundos de la fosa de las Marianas, a 11.000 metros de profundidad. Los compuestos inorgánicos, como el metil-mercurio, son tóxicos para la mayoría de organismos, incluidos los humanos, pero no para muchos microbios. Ya se sabía que las bacterias metanotróficas, que se han especializado en la degradación de sustratos reducidos de un solo carbono en presencia de oxígeno, son capaces de desmetilar y, por tanto, desintoxicar, este compuesto tóxico, pero hemos encontrado una gran diversidad y una amplia distribución de microbios con este potencial genético en el océano profundo. Se está haciendo un esfuerzo para utilizar estas bacterias marinas en la degradación de metil-mercurio y en la biorremediación de sedimentos marinos contaminados.

Los plásticos se están convirtiendo en uno de los contaminantes más prevalentes en el océano y afectan a los organismos marinos de todo tipo. Pero los plásticos están formados principalmente por hidrocarburos y algunos microbios han desarrollado la capacidad de degradar el PET (tereftalato de polietileno, un componente principal del plástico), e incluso se ha descrito un aislado, *Ideonella sakaiensis*, que degrada el PET y lo asimila como fuente única de carbono y energía

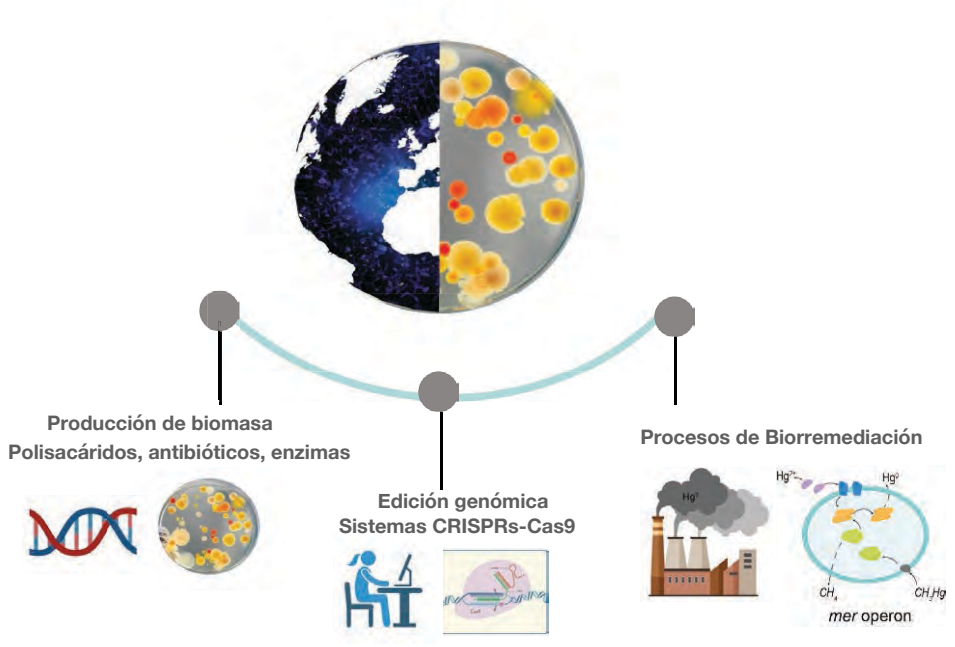


Figura 2. Una visión general de la presencia y la relevancia de los microbios en el océano (panel superior, izquierda), la recuperación de la biodiversidad marina en cultivo puro (panel superior, derecha) y las aplicaciones biotecnológicas discutidas en el texto a partir de la biomasa, de las secuencias y de los genes de estos microbios marinos.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

(Yoshida *et al.* 2016). En un estudio reciente de la expedición Malaspina, hemos observado varias decenas de variantes de esta enzima, que son particularmente abundantes en el océano profundo (Alam *et al.* en revisión): parece que estas bacterias han evolucionado y se han diversificado hace relativamente poco, lo que indicaría que la contaminación por plásticos se está convirtiendo en una fuente de carbono para los microbios del océano profundo que contribuyen a eliminar el plástico presente en el medio marino. Las bacterias oceánicas se adaptarían a los contaminantes que nosotros, los humanos, vertemos en el medio marino.

Otro gran ejemplo de avance biotecnológico basado en la investigación básica es el descubrimiento de las repeticiones cortas palindrómicas intercaladas regularmente, conocidas como CRISPR. Estas secuencias fueron observadas por Francisco Mojica y colaboradores durante la década de 1990 cuando estudiaban arqueas halófilas en salinas. Mojica acuñó el término CRISPR y sugirió que estaban implicadas en la inmunidad bacteriana contra elementos genéticos extraños (Mojica *et al.* 2005). Los sistemas CRISPR-Cas son sistemas de respuesta inmune adaptativa que protegen los procariotas de los bacteriófagos y otros agentes externos. El sistema CRISPR-CAS9 ha sido usado como una herramienta robusta de edición del genoma para eliminar, editar o introducir nuevos genes y regular la expresión génica. Este es probablemente el descubrimiento científico más relevante del siglo y con un impacto enorme en la biomedicina y la biotecnología. Si bien Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier ganaron el premio Nobel de Química en 2020 por desarrollar la tecnología CRISPR de edición del genoma, las primeras observaciones de Mojica fueron esenciales y abrieron el camino a los estudios posteriores. De nuevo, la investigación básica fue por delante. En un análisis reciente de muestras de la expedición Malaspina hemos identificado nuevas arquitecturas del sistema CRISPR-Cas y nuevas variantes CAS9 provenientes del océano profundo que, tras la validación en organismos modelo, podrían ser aprovechadas en investigaciones biológicas, biotecnológicas y aplicaciones clínicas.

Aunque los microorganismos tienen mucho menos glamour que otros organismos marinos, como ballenas, tortugas o peces de colores, son esenciales para el funcionamiento del sistema Tierra y representan una fuente inexplotada de enzimas y compuestos que cada vez aparecen en más iniciativas de economía azul (figura 2). Es esencial que se continúe haciendo esfuerzos para determinar la diversidad microbiana y la de sus genes, para aislar bacterias, arqueas, hongos, pequeños protistas y virus, para caracterizar sus genomas y las enzimas y compuestos que producen, y para explorar su potencial biotecnológico, de forma que la gran cantidad de funciones útiles que utilizan para dirigir la biogeoquímica oceánica se utilicen también industrialmente para mejorar la vida humana.

Referencias

Acinas S. G., Sánchez P., Salazar G. *et al.* 2021. Deep ocean metagenomes provide insight into the metabolic architecture of bathypelagic microbial communities. Comm. Biol. 4.

Blasiak R, Jouffray J.B., Wabnitz C.C.C., *et al.* 2018. Corporate control and global governance of marine genetic resources. Science Advances 4, 6: eaar5237.

Falkowski P.G., Fenchel T., Delong E.F. 2008. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. Science 320: 1034-1039.

Locey K. J., Lennon J.T. 2016. Scaling laws predict global microbial diversity. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113: 5970-5975.

Mojica F.J., Díez-Villaseñor C., García-Martínez J. *et al.* 2005. Intervening sequences of regularly spaced prokaryotic repeats derive from foreign genetic elements. J. Mol. Evol. 60: 174-182.

OECD. 2013. Marine Biotechnology: Enabling Solutions for Ocean Productivity and Sustainability, OECD Publishing. http://dx.doi.org/10.1787/9789264194243-en

Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., *et al.* 2016. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351: 1196-1199.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14051

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.2. Historia de la contaminación de metales pesados en los sedimentos del mar Catalán

Albert Palanques, Pere Puig, Jorge Guillén

Los metales pesados son contaminantes habituales que generan las actividades domésticas e industriales y que se vierten al mar a través de ríos, efluentes residuales y emisiones atmosféricas. En varios países, la distribución de metales pesados en el medio marino se estudia de manera sistemática para estimar su impacto y sus efectos económicos y sociales, y tomar medidas preventivas y correctivas. Muchos estudios han detectado y datado el impacto de la actividad antropogénica en los sedimentos, donde quedan registrados los aportes históricos y las tendencias de estos contaminantes. Estos trabajos generalmente muestran un enriquecimiento antropogénico continuo de metales pesados en las áreas costeras durante el último siglo debido al aumento de la industria, el desarrollo urbano, la población, la agricultura y la minería.

En general, la aplicación de regulaciones ambientales, nuevas plantas depuradoras y otras medidas de protección han ayudado a reducir la descarga de metales pesados en áreas costeras durante las últimas décadas. Sin embargo, los efectos de estas reducciones son todavía difíciles de identificar porque pueden pasar varios años hasta que queden registrados en los sedimentos costeros y también porque dichos registros pueden verse afectados por diversos efectos como fuertes tormentas, la construcción y los dragados de puertos, el desvío de desembocaduras de ríos o los cambios en las emisiones de contaminación.

Una vez vertidos al mar, los contaminantes se ven afectados por varios procesos físico-químicos y son dispersados por corrientes y olas. En el mar Mediterráneo, la capacidad de transporte de estos procesos es menor que en los grandes océanos, por lo que una gran parte de la carga de partículas contaminantes puede asentarse rápidamente en el fondo marino cercano a la costa, generando concentraciones persistentes y anómalas en los sedimentos. Solo los eventos hidrodinámicos extremos, como fuertes tormentas, fuertes corrientes inducidas por el viento o acciones erosivas de origen antropogénico, pueden resuspender estos sedimentos contaminados y transportarlos mar adentro.

El mar Catalán

Durante las décadas de 1980 y 1990, los investigadores del ICM estudiaron la contaminación de metales en sedimentos de áreas específicas del mar Catalán, incluida la costa, plataforma y los cañones submarinos cercanos a Barcelona, la costa y plataforma del río Llobregat y la costa y plataforma del delta del Ebro, que muestran una contaminación significativa de metales pesados en diversos lugares (figura 1).

En el año 2000, investigadores del ICM participaron en un programa de vigilancia de la contaminación por metales pesados en sedimentos marinos de la plataforma interior catalana liderado por la Agencia Catalana del Agua (ACA), siguiendo la Directiva Marco del Agua (DMA, DIR 2000/60/CE). Establecieron una red de monitoreo que priorizó el control de sedimentos en las inmediaciones de las desembocaduras de los ríos, donde se acumulan los sedimentos con una mayor contaminación

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

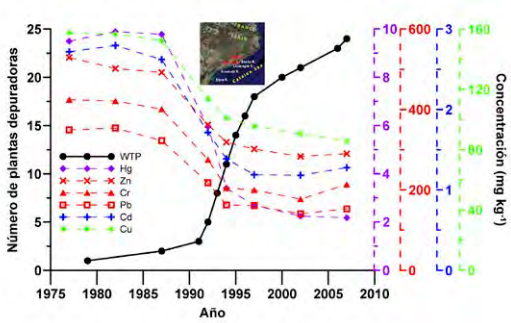


Figura 1. Número anual de plantas depuradoras en funcionamiento desde 1979 hasta 2010 en la cuenca del Besòs y registro de concentraciones de metales traza en los sedimentos del litoral de la ciudad de Barcelona durante este período de tiempo. PD: plantas depuradoras. Las concentraciones de metales traza se corresponden con el eje Y de la línea discontinua del mismo color (Palanques *et al.* 2017). Mapa que muestra la ubicación del área de estudio.

de metales pesados. Como continuación de este trabajo, la ACA puso en marcha en 2006 un segundo programa para determinar los niveles de metales traza y contaminantes orgánicos en los sedimentos del litoral catalán, dando prioridad a las zonas de control más afectadas según los resultados del proyecto 2000.

Estos estudios identificaron tres sectores: 1) La costa norte catalana, desde la frontera francesa hasta la localidad de Mataró, donde la contaminación por metales pesados era muy baja o nula con solo contaminación aislada en algunos puntos; 2) el litoral de la ciudad de Barcelona, que presentaba una contaminación muy elevada para la mayoría de los contaminantes estudiados, especialmente Hg y Cd, y 3) el litoral sur catalán con una contaminación significativa decreciente hacia el sur y con valores máximos aislados de Hg frente a la desembocadura del río Francolí (Palanques *et al.* 2016).

Además, las investigaciones llevadas a cabo por científicos del ICM entre los años ochenta y 2010 identificaron la evolución histórica de la contaminación de metales pesados en el litoral de la ciudad de Barcelona, frente y al sur de la desembocadura del río Besòs, que es la zona más contaminada del litoral catalán. Los sedimentos de esta zona mostraron un aumento moderado de la contaminación durante los años veinte y treinta y un fuerte aumento desde los años cuarenta hasta finales de los ochenta, que se correlacionan con el desarrollo industrial y la evolución de la población en Cataluña. Desde finales de la década de los ochenta, los niveles de contaminación por metales pesados disminuyeron como consecuencia de la normativa ambiental y las infraestructuras desarrolladas en los ríos y la costa catalana. La máxima disminución de la contaminación por metales pesados fue durante la década de 1990, cuando se produjo el máximo aumento en el número de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como restauraciones ambientales y regeneración de playas, especialmente en el área del Besòs (figura 1) (Palanques *et al.* 1998, 2017).

A pesar de que se ha producido una drástica reducción de la contaminación de metales, los niveles en la zona de la costa de Barcelona siguen siendo elevados. De hecho, la tendencia descendente de la contaminación se detuvo durante la década de los dos mil, lo que indica un límite en la efectividad de las medidas aplicadas. La cuenca del río Besòs y el área metropolitana de Barcelona están muy pobladas e industrializadas y aún producen una carga contaminante importante. Aunque esta contaminación es tratada por las plantas depuradoras, durante eventos ocasionales de lluvias extremas e inundaciones, la capacidad de estas plantas no es suficiente y el exceso de agua se vierte sin tratar directamente al mar formando grandes plumas de agua contaminada (figura

Figura 2. Plumas de agua turbia y contaminada sin tratar vertidas durante lluvias extremas e inundaciones en la costa de la ciudad de Barcelona. En amarillo perfiles verticales de concentraciones de metales pesados en el sedimento que muestran su evolución histórica (Palanques *et al.* 2017).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2). Estas plumas permanecen varias horas hasta que el material contaminado se dispersa y se deposita en el lecho marino, lo que contribuye a mantener los niveles de contaminación aun relativamente altos en el sedimento (Palanques *et al.* 2017).

Además, las tormentas excepcionales pueden erosionar parte de la capa altamente contaminada acumulada hasta la década de 1980 en el fondo marino, provocando algunos aumentos de los niveles de metales traza en los sedimentos superficiales hasta que se entierran nuevamente y se mezclan con sedimentos menos contaminados (Palanques *et al.* 2020).

Por tanto, si bien la normativa y los planes medioambientales desarrollados en Cataluña a partir de los años ochenta han sido muy eficaces para reducir los niveles de contaminación de los metales traza, en las zonas más contaminadas del litoral de Barcelona, sigue siendo necesario avanzar en el desarrollo de nuevas estrategias e implantar nuevas mejoras para reducir los impactos, especialmente durante lluvias extremas y tormentas.

Referencias

Palanques A., Sanchez-Cabeza J.A., Masqué P., Leon L. 1998. Historical record of heavy metals in a highly contaminated Mediterranean deposit: the Besòs Prodelta. Mar. Chem. 61: 209-217.

Palanques A., Caixach J., Belzunces M., Bartolomé A. 2016. Evolution of chemical pollution in Catalan coastal sediments. In: Munné A., Ginebreda A., Prat N. (Eds), Experiences from Ground, Coastal and Transitional Water Quality Monitoring. The EU Water Framework Directive Implementation in the Catalan River Basin District 2. Springer, Switzerland, pp. 271-300.

Palanques A., López L., Guillén J., Puig P., Masqué P. 2017. Decline of trace metal pollution in the bottom sediments of the Barcelona City continental shelf (NW-Mediterranean). Sci. Total Environ. 579: 755-767.

Palanques A., López L., Guillén J., Puig P. 2020. Trace metal variability controlled by hydrodynamic processes in a polluted inner shelf environment (Besòs prodelta, NW Mediterranean). Sci. Total Environ. 735: 139482.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14052

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

1.3. El mercurio en un océano cambiante

Andrea G. Bravo, Isabel Sanz-Sáez, Amina T. Schartup

El mercurio (Hg) plantea un problema ambiental reconocido a nivel mundial con preocupantes impactos ambientales y de salud pública (UNEP 2019). Si bien siempre han existido fuentes naturales de Hg como erupciones volcánicas, actividad geotérmica y meteorización de rocas ricas en Hg en la corteza terrestre, en el siglo pasado las actividades humanas como la minería de oro artesanal y en pequeña escala, la combustión de carbón, la producción de metales no-ferrosos, la producción de cemento y la eliminación de desechos que contienen Hg han superado a las fuentes naturales. Alrededor del 80% del Hg emitido a la atmósfera de fuentes naturales y antropogénicas se deposita en el océano, lo que ha resultado en una triplicación de las concentraciones de Hg en las aguas marinas superficiales en comparación con los niveles preindustriales. Por ello, la Organización Mundial de la Salud ha colocado al Hg entre las diez principales sustancias químicas de mayor preocupación para la salud pública. España es uno de los 130 signatarios de un tratado global, el Convenio de Minamata, que busca proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del Hg y que entró en vigor en agosto del 2017. Algunas de las acciones propuestas del convenio incluyen una eliminación del uso de Hg en una serie de productos y procesos industriales, la prohibición de nuevas minas de Hg y la eliminación de las existentes, el monitoreo de las emisiones de Hg al aire y las liberaciones a la tierra y el agua, y la regulación del sector informal de minería de oro artesanal y en pequeña escala. En este contexto, la Unión Europea ha establecido políticas ambientales para monitorear y modelar la distribución global de Hg, un ejemplo es el Sistema Global de Observación de Mercurio. Comprender el ciclo biogeoquímico global del Hg en los océanos es clave para predecir los niveles de Hg en las redes alimentarias acuáticas y evaluar el impacto de las estrategias de reducción en la exposición humana.

El ciclo del mercurio en el océano

En los ecosistemas marinos, el Hg está presente en diferentes formas químicas que son sensibles a las condiciones ambientales y biológicas. Las formas son mercurio elemental, Hg^0, mercurio inorgánico divalente, Hg^{II}, mono- y di-metilmercurio, CH_3Hg^+ y $(CH_3)_2Hg$, respectivamente. El Hg^0 es volátil y puede transportarse a grandes distancias en la atmósfera y depositarse lejos de su fuente (incluido el océano). Además, el Hg^0 se puede oxidar a Hg^{II} y llegar al océano. En el agua de mar, el Hg^{II} puede: i) reducirse a Hg^0 y volver a emitirse a la atmósfera o ii) metilarse bióticamente en la forma orgánica CH_3Hg^+, y iii) unirse a materia orgánica y partículas inorgánicas y sedimentar (figura 1). El CH_3Hg^+ que se forma en los ecosistemas acuáticos puede exportarse al sedimento, ser absorbido por la red trófica, degradarse biótica o abióticamente a Hg inorgánico, o metilarse para formar dimetilmercurio, $(CH_3)_2Hg$. Parte del $(CH_3)_2Hg$ puede volver a emitirse a la atmósfera y/o degradarse a CH_3Hg^+. Muchas de estas transformaciones están mediadas por microorganismos que portan los genes *hgcAB* (metilación de Hg^{II}), *merA* (reducción de Hg^{II}) y *merB* (desmetilación de CH_3Hg^+). Pese a que los microorganismos tienen un papel central en el ciclo del mercurio, poco se sabe de su presencia, diversidad y actividad en el océano.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

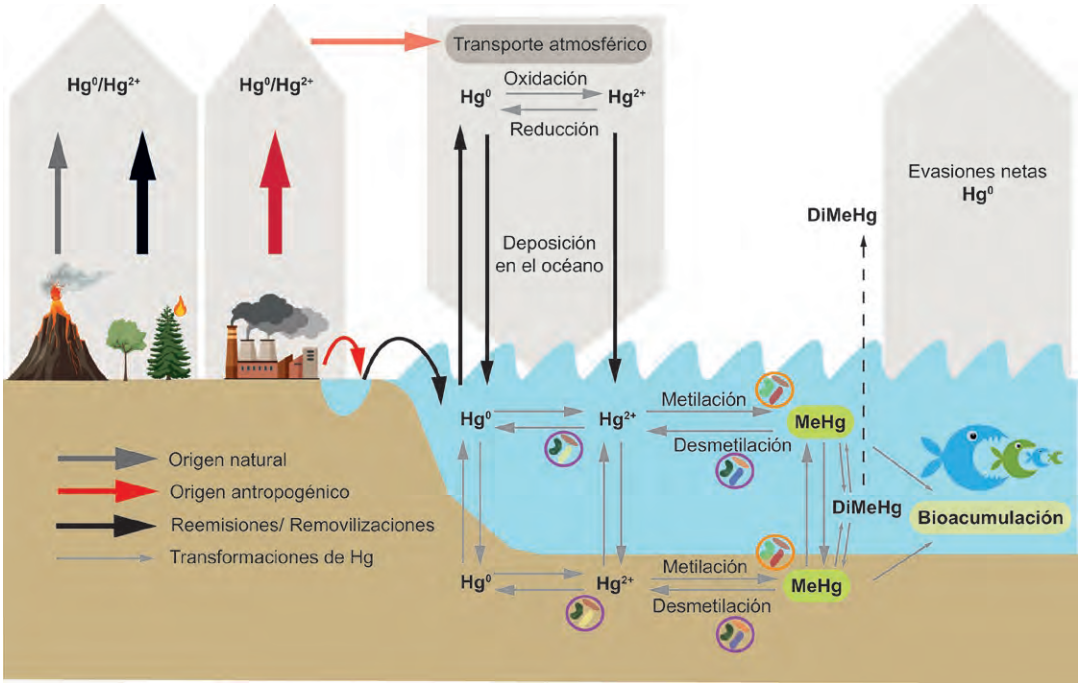


Figura 1. El ciclo del mercurio y los presupuestos mundiales de mercurio liberados a la atmósfera y recorridos por los océanos y la atmósfera. Las transformaciones de mercurio indicaron que se centran en las que ocurren principalmente en los ecosistemas marinos, incluida la columna de agua (área azul) y los sedimentos (área marrón). Hg^0: mercurio elemental; Hg^{2+}: mercurio iónico; MeHg: metilmercurio.

El estudio de la forma química CH_3Hg^+ es fundamental porque se bioconcentra y biomagnifica en las redes tróficas acuáticas, alcanzando del 80% al 100% del Hg total medido en algunos tejidos de los peces. Teniendo en cuenta que más de tres mil millones de personas dependen del pescado y del marisco para su nutrición y que las concentraciones de Hg en el pescado a menudo exceden las pautas de calidad ambiental incluso en ausencia de fuentes locales, el consumo de pescados y mariscos contaminados con Hg es la principal vía de exposición humana. De hecho, un estudio reciente realizado en 175 países mostró que el 38% de las poblaciones estudiadas (principalmente países insulares y en desarrollo) estaban expuestas a niveles de CH_3Hg^+ por encima de los umbrales gubernamentales (Lavoie *et al.* 2018). El CH_3Hg^+ es neurotóxico y puede dañar el sistema nervioso central, provocando temblores, distorsión del habla, cambios en la función renal y hepática, insuficiencia respiratoria, mareos, visión borrosa, alucinaciones e incluso la muerte en personas gravemente expuestas.

A pesar de los esfuerzos globales para reducir las emisiones de Hg en los últimos años, las concentraciones de Hg observadas en los peces marinos de varios mares europeos no han disminuido sustancialmente (OSPARCOM). Al problema del incremento del Hg en los océanos se suman el cambio climático y la sobrepesca. Recientemente, un modelo basado en datos de treinta años simuló cómo los factores ambientales, incluido el aumento de la temperatura del mar y la sobrepesca, impactan en los niveles de Hg en los peces, en particular el bacalao del Atlántico, la mielga y el atún rojo del Atlántico (Schartup *et al.* 2019). El estudio concluyó que, si bien la regulación de las emisiones de Hg está reduciendo los niveles de Hg en los peces, la temperatura del agua de mar y la disponibilidad de presas también son controles importantes sobre las concentraciones de Hg en los depredadores marinos pelágicos. Por ejemplo, la sobre-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

pesca de presas con una concentración baja de Hg puede obligar a algunos depredadores a consumir presas ricas en Hg y, por lo tanto, aumentar las concentraciones de Hg de los principales depredadores. Además, el aumento de la temperatura del agua de mar puede aumentar la tasa metabólica de algunas especies de peces, lo que también resulta en una mayor acumulación de Hg. Otro posible impacto que debería explorarse en investigaciones futuras es el papel del hábitat cambiante, a medida que las especies tropicales y templadas se desplazan hacia el norte a temperaturas más frías. Este movimiento hacia los polos podría resultar en un aumento en la concentración de MeHg en biotas porque el MeHg llega a las profundidades más superficiales de la columna de agua en aguas de latitud alta (Zhang *et al.* 2015, Heimbürger *et al.* 2015). Finalmente, un aumento de temperatura puede potenciar el número y volumen de las zonas de mínimo de oxígeno, propensas a formar CH_3Hg^+.

Una acción directa y urgente es necesaria para disminuir los niveles de Hg en el océano

En conclusión, los esfuerzos globales para reducir las emisiones y liberaciones de Hg en nuestros océanos pueden conducir a reducir el Hg y posiblemente a reducir el CH_3Hg^+ en el océano (Zhang *et al.* 2016). Sin embargo, los cambios impulsados por el clima, como el aumento de la temperatura del agua de mar, la expansión de las zonas mínimas de oxígeno, la estratificación de la columna de agua y los cambios en las estructuras de la red alimentaria, pueden contrarrestar algunos de los beneficios proyectados de los controles de emisiones (Zhang *et al.* 2021). Además, los retrasos en la acción política (Selin 2018) dan como resultado una reducción más lenta de los niveles de Hg en el medio ambiente. Por lo tanto, debemos actuar ahora para frenar las emisiones y liberaciones de Hg y actuar de manera más agresiva. Finalmente, se necesita más investigación para comprender cómo el cambio climático impacta la producción de CH_3Hg^+ en el océano y la biomagnificación en las redes tróficas marinas.

Referencias

Heimbürguer L.-E., Sonke J.E., Cossa D., *et al.* 2015. Shallow methylmercury production in the marginal sea ice zone of the central Arctic Ocean. Sci. Rep. 5: 1-6.

Schartup A., Thackray C.P., Qureshi A., *et al.* 2019. Climate change and overfishing increase neurotoxicant in marine predators. Nature 572: 648-650.

Selin N.E. 2018. A proposed global metric to aid mercury pollution policy. Science 360 (6389): 607-609.

UN Environment Programme (UNEP). 2019. Global mercury assessment 2018. Technical report, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland.

Zhang Y., L. Jaeglé, L. Thompson 2015. Natural biogeochemical cycle of mercury in a global three-dimensional ocean tracer model. Global Biogeochem. Cycles. 28: 553-570.

Zhang Y., Jacob D.J., Horowitz H.M. *et al.* 2016. Observed decrease in atmospheric mercury explained by global decline in anthropogenic emissions. Proc. Natl. Acad. Sci. 113: 526-531.

Zhang Y., S. Dutkiewicz E.M. Sunderland 2021. Impacts of climate change on methylmercury formation and bioaccumulation in the 21st century ocean. One Earth 4: 279-288.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14053

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.4. Ruido de fondo

Cristina Romera-Castillo, Lorenzo Bramanti

El documental «El mundo del silencio» en el que el comandante Jaques Cousteau nos mostraba los secretos de la vida submarina, no hacía honor a su nombre. Lejos de ser silencioso, el mundo submarino se caracteriza por ser un concierto sonoro, un ruido de fondo provocado por animales marinos y fenómenos geológicos, de la misma forma que en la selva terrestre se mezclan los sonidos de animales con los de la tierra y la meteorología. Sin embargo, el concierto equivalente que tiene lugar bajo el mar no es tan conocido, probablemente, porque cuando buceamos, el ruido de nuestras propias burbujas neutraliza casi todo lo demás. El sonido en el agua se transmite cinco veces más rápido que en el aire, por lo que los ruidos de algunos animales marinos pueden viajar miles de kilómetros. Además, se transmite más rápido en agua caliente que en agua fría.

La coral del mar

La mayoría de animales marinos emiten sonidos entre <20 Hz (infrasonidos) y >20 kHz (ultrasonidos), por lo que son audibles por un amplio rango de especies. Algunos como invertebrados, cetáceos, peces y reptiles, son capaces de percibir sonidos de baja frecuencia (<5 kHz) mientras que los cetáceos, sobre todo delfines y orcas (odontocetos), también emiten y detectan a alta frecuencia (hasta 200 kHz). Algunos animales, como las ballenas, son capaces de comunicarse a larga distancia utilizando sonidos de baja frecuencia (Duarte *et al.* 2021). La ballena azul *(Balaenoptera musculus)* y el rorqual común *(Balaenoptera physalus)* se sumergen hasta encontrar la corriente de agua con la temperatura apropiada desde la que lanzar sus cantos cuyo sonido puede llegar a otras cuencas oceánicas y ser escuchado por sus congéneres hasta a 4000 km de distancia, como si de un cable de fibra óptica se tratara (Tsuchiya *et al.* 2004).

Los animales emiten sonidos por diversos motivos, por ejemplo, para orientarse en la navegación, al alimentarse, para defender su territorio, atraer a una pareja o para alejar a un competidor en el cortejo. Las ballenas producen llamadas de baja frecuencia con fines reproductivos y sociales. La ballena jorobada *(Megaptera novaengliae)* canta canciones complejas que incluso tienen dialectos regionales y cambian con el tiempo. Y no solo los grandes cetáceos son capaces de comportamientos complejos. Recientemente se ha visto que una especie de cangrejo *(Maja squinado)* emite sonidos cuando percibe la cercanía de alimento, probablemente para avisar a sus compañeros. Algunos animales, como el pez loro, hacen sonidos al alimentarse y rascar la superficie de donde se alimentan. Sorprende el sonido característico que hacen los erizos de mar al pastar las algas en el substrato rocoso y que permite a los investigadores identificarlos individualmente. Y aún es más sorprendente el caso de la vieira *(Pecten maximus)* que hace ruidos diferentes cuando se mueve (nadando a propulsión) de cuando come (filtrando agua) de forma que a través del sonido se puede saber qué está haciendo exactamente (Busson *et al.* 2010).

El sonido de la revolución

A partir de la Revolución Industrial, todos estos sonidos se han visto acompañados de los que provoca la actividad humana, como navegación, pesca, prospecciones sísmicas, dragado, operaciones militares o extracción minera del fondo marino. Toda esta actividad antropogénica ha añadido una contaminación acústica a los soni-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

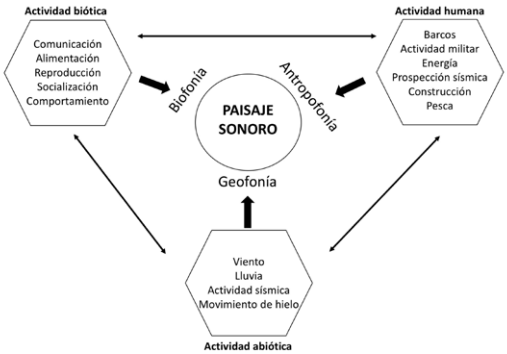


Figura 1. Diferentes componentes del paisaje sonoro marino (soundscape). El *soundscape* es la suma de los ruidos que originan los organismos (biofonía), los fenómenos meteorológicos y geológicos (geofonía) y el hombre (antropofonía).

dos naturales propios del medio marino (figura 1). Diferentes estudios han demostrado que este ruido antropogénico afecta negativamente a los animales marinos (Duarte *et al.* 2021). En muchos casos, la frecuencia de banda a la que se emite el ruido antropogénico solapa con aquella a la que los animales pueden oír pudiendo enmascarar los sonidos que sus congéneres usen para comunicarse. El ruido de navegación perturba la actividad de los mamíferos marinos como la alimentación, socialización, comunicación, navegación y el descanso. También puede atenuar el comportamiento anti-predadores de los juveniles de algunos peces, aumentando su mortalidad y reduciendo su capacidad de aprender a evitar predadores en el futuro (Duarte *et al.* 2021). Es capaz de perturbar el asentamiento y desarrollo de los invertebrados, como el de las larvas y juveniles de algunas especies que habitan los arrecifes y utilizan los sonidos de su alrededor para localizar un lugar apropiado donde asentarse (Lillis *et al*. 2018).

La degradación de los hábitats marinos, como los bosques de kelp, las praderas de plantas marinas o los arrecifes de coral, provoca la disminución del paisaje sonoro de dichos ecosistemas debido a que disminuye la presencia de animales que producen sonidos. Además, hábitats como las praderas de posidonia o los bosques de gorgonias, cuando gozan de buena salud, pueden tener una función de atenuación del ruido creando oasis de tranquilidad para las especies que se refugian en ellas.

En los últimos cincuenta años, el aumento de la navegación ha multiplicado por treinta el ruido de baja frecuencia a lo largo de las principales rutas de navegación (figura 2). Por otro lado, la sobrepesca ha disminuido la población de muchos peces y mamíferos, disminuyendo el paisaje sonoro al que estos contribuían. El cambio climático también afecta a los sonidos del fondo marino. El aumento de la temperatura del agua que aumenta la estratificación y modifica las corrientes puede alterar la velocidad y distancia a

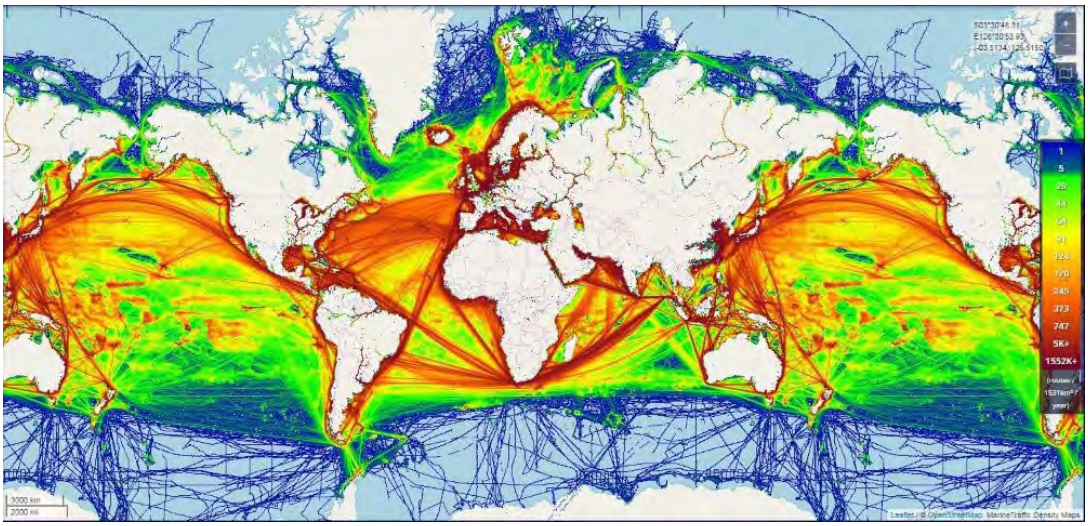


Figura 2. Mapa del tráfico marítimo (https://moverdb.com/shipping-traffic-density/).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

la que se transmite el sonido con consecuencias para los animales marinos. El aumento de CO_2, que causa la acidificación del océano, provoca un océano más ruidoso, dando lugar a una disminución sustancial en la absorción de sonido por el océano a frecuencias por debajo de los 10 kHz. También a causa del cambio climático, han aumentado el número de ciclones y olas de calor, lo que provoca la degradación de hábitats marinos y la alteración de su biofonía (Duarte *et al.* 2021).

Los expertos están proponiendo medidas para mitigar el ruido antropogénico. En algunas áreas marinas protegidas ya se están llevando a cabo. En las zonas protegidas del Área Marina de Cinque Terre (Italia), se dan permisos de navegación en base al ruido, premiando a aquellas que producen menos. En Francia, en la reserva marina de Cerbere / Banyuls, se ha llevado a cabo un estudio de los cantos de meros *(Epinephelus marginatus)* y corvinas *(Sciaena umbra)* para poder regular los buceos nocturnos evitando las temporadas en que estas especies cantan durante la reproducción. En otras áreas marinas, como Cap de Creus y las Islas Medas, la velocidad de navegación se ha limitado para reducir el ruido y el consecuente impacto sobre el paisaje sonoro de las áreas de protección integral. Se ha estimado que la disminución de velocidad en 2 nudos reduce un 50% del ruido de banda ancha provocado por los barcos.

A pesar de algunas iniciativas a nivel local, la contaminación acústica submarina es un hecho al que aún no se ha prestado atención en los objetivos de las políticas medioambientales a nivel nacional e internacional, pero, probablemente, empecemos a oír más de ello en el futuro y el «ruido de fondo» sea escuchado por toda la población.

Referencias

Busson S., Gervaise C., Barazzutti A., *et al.* 2010. Higher-order statistics for bioacoustic click detection. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France.

Duarte C.M., Chapuis L., Collin S.P., *et al.* 2021. The soundscape of the Anthropocene ocean. Science 371: eaba4658.

Lillis A., Apprill A., Suca J.J., *et al.* 2018. Soundscapes influence the settlement of the common Caribbean coral *Porites astreoides* irrespective of light conditions. R. Soc. Open Sci. 5: 181358.

Tsuchiya T., Naoi J., Futa K., Kikuchi T. 2004. Difference in Simulated Low-Frequency Sound Propagation in the Various Species of Baleen Whale. Jpn. J. Appl. Phys. 43: 3193.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14054

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

1.5. Basura marina, la nueva plaga de mares y océanos

Eve Galimany, Elena Marco-Herrero, Montserrat Ramón

Mares y océanos representan la mayor parte del planeta Tierra. La buena salud de sus aguas es determinante para mantener la vida, no solo de los ecosistemas acuáticos sino también de los terrestres. Pero esta salud se ve amenazada por la llamada basura marina, restos de todo tipo de objetos y materiales que constituyen actualmente una de las principales causas de contaminación, creando graves problemas ambientales y económicos en todo el mundo.

La gran mayoría de basura marina proviene de actividades terrestres, donde los residuos se transportan hacia mares y océanos por acción del viento, los ríos, la lluvia y la falta de una gestión adecuada en una Tierra actualmente superpoblada. De los diferentes tipos de basura marina que llegan a mares y océanos, incluyendo telas, papel, baterías y vidrio, la gran mayoría (61-87%) está compuesta por plástico. Este plástico, de dimensiones que van desde las micras (microplásticos) hasta los centímetros y ocasionalmente metros (macroplásticos), acaban en los fondos marinos donde se perpetúan durante años, quizá incluso siglos.

La basura marina y sus efectos

Los efectos de la basura marina son variados y alteran tanto los organismos y las comunidades como las actividades económicas que generan estos ecosistemas. Hasta ahora, se han descrito efectos negativos en 1400 especies distribuidas por todo el mundo (Galgani *et al.* 2019). Entre las secuelas físicas más comunes observadas en la fauna se encuentran el enredamiento al quedar atrapados con basura marina, y la inanición al ingerir basura que se acumula en el sistema digestivo, impidiendo su alimentación e incluso dañando sus órganos. Además, los plásticos a menudo llevan aditivos químicos que pueden ser tóxicos y que se bioacumulan a lo largo de la cadena alimentaria. Económicamente, la basura marina tiene efectos muy negativos, incrementando el gasto que supone la limpieza tanto de la masa de agua como de las playas. También genera perjuicios en sectores económicos marítimos debido a los impactos en los cascos de los barcos y a la rotura de útiles pesqueros, pudiendo llegar a estropear los sistemas de refrigeración y motores.

¿Cómo está el mar Mediterráneo?

El mar Mediterráneo, que cultural y tradicionalmente ha albergado a todas las civilizaciones que han ocupado sus costas, es especialmente vulnerable a los efectos de la basura marina. La geomorfología mediterránea hace que sea un mar muy cerrado, donde los residuos que llegan quedan atrapados sin casi opción de dispersarse y salir. Es por esta gran acumulación de basura marina que actualmente se le considera uno de los mares más contaminados del planeta (Galgani *et al.* 2014).

La cantidad exacta de basura marina en el Mediterráneo es difícil de evaluar debido, entre otros factores, a que la mayoría de las investigaciones se han centrado en profundidades >100m. El primer estudio que cuantificó la cantidad y el tipo de basura en los fondos someros (<70m) se publicó recientemente (Galimany *et al.* 2019). Gracias a la colaboración con los mariscadores que faenan entre los 10 y los 68 m de profundidad en Cataluña, se cuantificó la basura marina presente en las capturas de dos áreas, una urbana situada justo al sur de Barcelona, y una rural en el Delta del Ebro (figura 1). Los resultados mostraron que, en zonas cercanas a áreas muy

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 1. Aspecto de la captura obtenida por los pescadores artesanales en la zona urbana (izquierda) y la zona rural (derecha).

pobladas (zona urbana) y con rutas de navegación muy transitadas, la basura marina puede representar el 37,6% del peso total de la captura pesquera por área muestreada (figura 2). En términos de densidades de masa, supone entre 198 y 393 kg de basura por km². Por el contrario, la basura marina pescada en el litoral de las áreas menos pobladas (zona rural) supuso un 5,2% del total de las capturas, representando unas densidades mucho más bajas (34 y 56 kg de basura por km²).

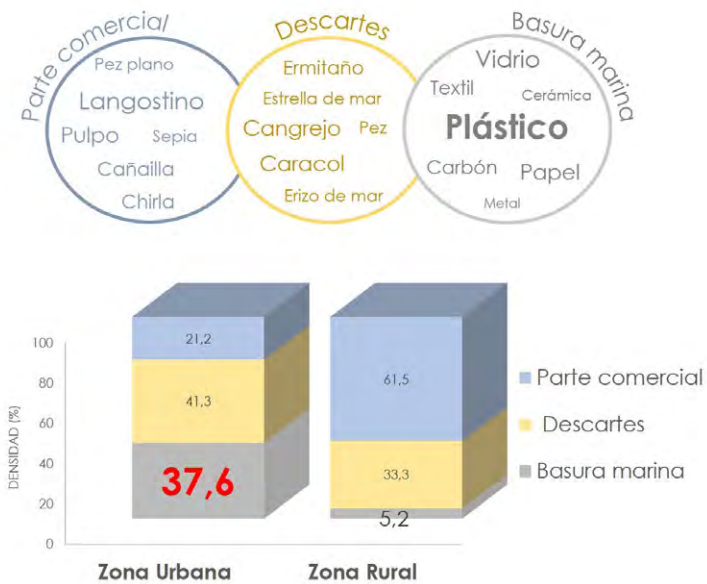


Figura 2. Comparativa entre la zona urbana y la rural de la densidad de masa (kg m^{-2}), en porcentaje, de las capturas de basura marina, descartes (organismos sin valor comercial) y parte comercial obtenidas con el arte de pesca *rastrillo de cadenas*.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Una vez la basura llega a mares y océanos, su eliminación es muy difícil porque la deriva y la inmensidad espacial por donde se mueve, incluyendo las grandes profundidades, dificulta enormemente encontrar una solución efectiva y económica. Además, tampoco existen métodos eficaces ni legislaciones firmes para limpiar los fondos marinos. Así pues, el mejor residuo es el que no se genera y para ello debe haber un esfuerzo común de la población que rompa la tendencia actual de producción de residuos. Actos sencillos como el reciclaje, la reutilización de recursos y un cambio en los hábitos de la población, sobre todo en cuanto al uso excesivo del plástico, pueden ayudar enormemente a reducir la basura que llega al mar. Para aquellos residuos que ya están acumulados en los fondos, se podrían establecer mecanismos de colaboración con los pescadores para que recogieran y depositaran en contenedores los residuos que capturan accidentalmente a diario. Con ello se reducirían los costes de pesca y los peligros potenciales para los ecosistemas marinos.

Referencias

Galgani F., Barnes D., Deudero S., *et al.* 2014. Marine litter in the Mediterranean and Black Seas. CIESM Workshop Monograph 46. In: Briand F. (ed.), CIESM Publisher, Monaco, 180 pp.

Galgani L., Beiras R., Galgani F., *et al.* 2019. Editorial: Impacts of marine litter. Front. Mar. Sci. 6: 208.

Galimany E., Marco-Herrero E., Soto S., *et al.* 2019. Benthic marine litter in shallow fishing grounds in the NW Mediterranean Sea. Waste Manage. 95: 620-627.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14055

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

1.6. Estrategias internacionales y los retos de la sociedad: hacia un mar sin plástico

Cristina Romera-Castillo, Vanessa Sarah Salvo

El Plasticeno o La Edad del Plástico se inició en los años cincuenta debido al continuo incremento de producción y consumo de plástico (Corcoran *et al.* 2014). Desde entonces, este material ha llegado, incluso, a formar conglomerados con rocas formando «plastiglomerados», propuestos como marcador geológico del Antropoceno. De todo el plástico generado en la historia de la humanidad, solo se ha reciclado un 9%, el 12% ha sido incinerado y el 79% se ha ido acumulando en vertederos o en el medio ambiente (Geyer *et al.* 2017). En 2020 se produjeron unas 350 millones de toneladas de plástico, de los cuales, un 5% acaba llegando al mar. Se estima que la producción de plástico aumente anualmente de forma exponencial y, paralelamente, la llegada de este residuo al océano. Por acción de la luz solar, la erosión y la oxidación, el plástico se degrada y se fragmenta en trozos que pueden ir desde <5mm (microplásticos) hasta tamaños microscópicos como partículas o fibras. Los residuos de plástico provocan un impacto estético, físico, químico y biológico en el ecosistema marino, llegando a afectar al ser humano a través del pescado y marisco que ingerimos y del agua que bebemos (figura 1). El problema no se limita a las partículas de plástico sino también a los aditivos que se añaden a sus polímeros, compuestos químicos que hacen el material más resistente y le confieren las cualidades y características deseadas. Los aditivos se liberan al agua de mar alterando el ecosistema marino como, por ejemplo, a nivel del ciclo del carbono y de la cadena trófica microbiana (Romera-Castillo *et al.* 2018). Algunos aditivos son también tóxicos para la salud humana y la de los organismos marinos. En algunos casos son sustancias persistentes que se acumulan en los seres vivos incrementando a lo largo de la cadena trófica (biomagnificación). El plástico además tiene la capacidad de adsorber contaminantes presentes en el medio acuoso y acumularlos hasta alcanzar altas concentraciones de estos. Si el plástico es ingerido por un organismo, los aditivos y/o contaminantes adsorbidos pueden liberarse en el interior de este con potenciales efectos negativos que van desde afecciones al desarrollo neurológico y al sistema endocrino hasta efectos carcinogénicos.

Políticas internacionales

A nivel internacional, la atención sobre las basuras marinas, en particular su componente predominante, el plástico, ha empezado con el pacto voluntario de 1995 del *Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-Based Activities* de la UNEP para la prevención de la contaminación marina de origen terrestre identificando factores de degradación ambiental. Unos años después, *La Estrategia de Honolulu* (2012) propuesta en la Conferencia de Rio 20+ ha representado una de las primeras tomas de decisiones institucionales de acción global frente a este contaminante. Actualmente, la comunidad internacional ha reconocido el plástico como una de las principales amenazas para el planeta. A día de hoy, son innumerables las declaraciones, recomendaciones y decisiones ratificadas. Desde los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 14 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas hasta las llamadas urgentes a la acción del *G7 Action Plan to Combat Marine Litter* (2015) y el *G20 Action Plan on Marine Litter* (2017). En 2018 se adoptó la *European Strategy for Plastics* que incluye una serie de recomendaciones, líneas de acción y medidas para los

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Plástico de un solo uso en ambiente marino. © The Ocean Agency-Ocean Decade.

próximos años, algunas de las cuales se han visto plasmadas en políticas activas para los estados miembros como la DIR (UE) 2019/904 sobre la eliminación de productos de un solo uso. Esta se está implantando a nivel nacional y autonómico, aunque con gran retraso y ralentizada por la pandemia de COVID-19. El primer lugar donde se han implantado en Europa han sido las Islas Baleares (Ley 8/2019 del 19 de febrero), sirviendo de ejemplo para el resto de países europeos por su ambición, superior a la propia directiva. No obstante, en todas estas propuestas y llamadas a la acción siguen quedando muchas preguntas abiertas a las que las investigaciones tendrán que aportar las respuestas adecuadas con datos, nuevos materiales y tecnologías.

Soluciones

Se han propuesto posibles soluciones para «limpiar» el océano de plástico pero son un intento de barrer en el desierto. La primera medida a tomar es «cerrar el grifo» de plástico que llega al mar cada día a través de medidas de prevención. El 80% del plástico que llega al mar lo hace a través de fuentes terrestres, derivado del consumo humano, principalmente a través de ríos. Muchas actuaciones y estudios que se están llevando a cabo son curativos, es decir, medidas aplicadas al final de la cadena de un proceso y no en la fuente del impacto. Algunos ejemplos de medidas curativas son las nuevas tecnologías ligadas a la valorización del residuo, la reutilización, el reciclaje o la sustitución por otros materiales. También hay investigaciones en marcha que van desde la utilización de bacterias especializadas en biodegradación de plástico hasta sistemas potencialmente impactantes, como el reciclado químico, que se propone como una alternativa a la incineración. Todavía faltan datos para obtener una visión detallada del impacto real creado por los plásticos y sus substitutos, considerando las afecciones directas e indirectas. Pero lo que sí está claro es que la salud de nuestro planeta azul y la nuestra propia está en peligro. Es hora de hacer un esfuerzo colectivo entre ciudadanos, gobiernos y científicos para superar el Plasticeno con medidas y acciones contundentes de prevención.

Referencias

Corcoran P.L., Moore C.J., Jazvac K. 2014. An anthropogenic marker horizon in the future rock record. GSA Today 24: 4-8.

Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. E1700782.

NOAA & UNEP. 2012 The Honolulu strategy. A global framework for prevention and management of marine debris. 50 pp.

Romera-Castillo C., Pinto M., Langer T.M., *et al.* 2018. Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean. Nat. Commun. 9: 1430.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14056

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Stefano Ambroso

© 2020 © del autor o autores / Todos los derechos reservados

2. Océano saludable y resiliente

Clara Ruiz-González, Enrique Isla, Joan Navarro

Vivimos rodeados de naturaleza a pesar de que no siempre sepamos apreciar su grandeza. Los océanos, que percibimos como masas de agua homogéneas que nos proporcionan alimento y diversión, esconden infinitos secretos que solo se revelan con la observación y el estudio detallado de sus propiedades, de sus habitantes y de los delicados equilibrios que mantienen su funcionamiento. Nuestras acciones y nuestra forma de vivir contra (y no con) la naturaleza están haciendo peligrar este equilibrio y la salud de los océanos, sin que seamos del todo conscientes de las repercusiones negativas que un océano enfermo podría tener sobre nuestras vidas y sobre la habitabilidad del planeta.

Es urgente que entendamos que es el momento de proteger y cuidar esta grandiosa fuente de vida, así como de promover acciones que permitan su recuperación. La acción humana, que tanto daño puede causar, es capaz también de lograr grandes cambios positivos si los esfuerzos se dirigen a la recuperación y restauración de los ecosistemas o las poblaciones y comunidades de organismos. Esto requiere un profundo conocimiento del funcionamiento del océano y de su capacidad de responder ante los cambios que han sucedido y que se espera que sucedan en los años venideros.

El estudio de los océanos abarca innumerables disciplinas que incluyen desde la ecología de los microorganismos del plancton, que controlan los ciclos globales de los elementos químicos y mantienen las poblaciones de grandes mamíferos marinos o la productividad de las pesquerías, hasta la regulación del clima del planeta a través de los movimientos de corrientes y masas de agua. Sin embargo, a pesar de los enormes avances en nuestro conocimiento de los océanos, todavía estamos lejos de disponer de todas las herramientas necesarias para poder conservarlo, recuperarlo y sobre todo protegerlo de los problemas que nosotros mismos estamos generando. Únicamente si aprendemos a mirar al océano con el respeto, la admiración y la dedicación que merece seremos capaces de dejar de degradarlo y entender que sin él no somos nada.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.1. El organismo planetario

Josep L. Pelegrí

Toda una vida de estudio de los océanos me ha regalado la oportunidad de asomarme a su complejidad e inteligencia. Inicialmente me centré en analizar algunos de sus componentes por separado –como las corrientes, los procesos de mezcla y la producción primaria– pero con los años descubrí que su belleza y riqueza está en la complementariedad, en sus interconexiones, en su rol generador de la complejidad planetaria.

En 2008 presenté una aproximación fisiológica a los océanos que propone que el sistema de circulación oceánico pulsa de forma similar al sistema circulatorio de entidades complejas como los mamíferos (Pelegrí 2008). Un sencillo modelo fisiológico explicaba las variaciones del CO_2 atmosférico entre periodos glaciales e interglaciales durante los últimos tres millones de años. El modelo fue posteriormente ajustado con algoritmos genéticos, demostrando que la oscilación natural del carbono atmosférico se puede justificar como resultado de la transformación entre las formas orgánica e inorgánica de carbono disuelto en los océanos (Pelegrí *et al.* 2013). En términos fisiológicos, el corazón del océano late con periodicidad anual, impulsando cada invierno el flujo circulatorio planetario mediante el hundimiento de las aguas superficiales en latitudes altas. Este circuito es muy activo en épocas interglaciales –con un metabolismo elevado que transforma grandes cantidades de carbono y nutrientes inorgánicos vía fotosíntesis– y se ralentiza durante los periodos glaciales –una fase de reposo con el almacenamiento de materia orgánica disuelta como forma de energía en reserva.

Recientemente, hemos explorado la idea de que océano y atmósfera maximizan el flujo de energía, igual que lo hacen los seres vivos (Roca y Pelegrí 2020). Bajo esta premisa, hemos desarrollado un modelo energético planetario que reproduce correctamente las tendencias climáticas entre el último máximo glacial y la actualidad, y hace predicciones razonables sobre la evolución de la temperatura del planeta para finales de siglo. Un corolario de este estudio es que la Tierra presenta patrones espaciales que son similares a los observados en especies que han evolucionado a lo largo del tiempo, y que estos patrones optimizan el flujo de las propiedades que sostienen la vida –como son el agua, los nutrientes y la energía– (figura 1).

Una nueva mirada a Gaia

Estos estudios conceptuales sobre patrones fisiológicos temporales y espaciales, junto con muchos trabajos oceanográficos observacionales y numéricos en diferentes regiones del planeta, permiten reinterpretar la complejidad del planeta océano. Partiendo de un breve recordatorio de la hipótesis Gaia y apelando a la visión de la vida como proceso, podemos reexaminar el papel fundamental del agua y los océanos en nuestro planeta.

Durante la década de los setenta, James Lovelock y Lynn Margulis propusieron que la vida interviene en la creación del ambiente planetario: se regula el entorno físico de modo que se optimiza el desarrollo de la propia vida (Lovelock y Margulis 1974). Esta propuesta –la teoría Gaia– generó una nueva mirada a nuestro planeta pero no consiguió entusiasmar a gran parte de la comunidad científica debido a la aparente imposibilidad práctica de verificarla. A pesar de algunos valiosos esfuerzos durante esta última década (Stephen Harding, Eileen Crist y Bruce Rinker, Carlos de Castro), el enfoque predominante actual sobre nuestro planeta es sistémico: un conjunto de entidades diferenciadas

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Imagen de satélite que permite atisbar la complejidad de la atmósfera y la superficie de los océanos y continentes del planeta Tierra. Goddard Space Flight Center, NASA.

que interaccionan y se auto-organizan, dando pie a propiedades colectivas más complejas que las de sus partes.

En este momento en que el ideario de Gaia parece haber cedido paso al pragmatismo del *big data* y la inteligencia artificial, sorprende ver cómo muchos programas y organizaciones toman como lema el simbolismo del planeta vivo (p. ej. *Living Earth, Living Planet, Living Ocean*). Estos programas surgen de nuestra nueva capacidad de observar con elevada precisión la casi totalidad de la superficie del planeta (figura 1), aquello que antes era remoto e inaccesible aparece cercano y se transmite la imagen de familiaridad. Sin embargo, estos programas se centran más en diseccionar los bloques (ambiente físico-químico, individuos y comunidades, ecosistemas) y comprender los engranajes entre entidades diferenciadas que en explorar la idea holística de un planeta vivo.

La vida como proceso

La visión clásica de la vida se basa en la sustancia: el ser vivo material desarrolla funciones complejas, en un aparente equilibrio interno, dentro de unos límites físicos delimitados. Este ser vivo –físicamente diferenciado, conexo y

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

atrapado en un espacio limitado– se organiza y autorregula respondiendo y adaptándose a estímulos externos.

Una visión opuesta de la vida se basa en procesos dinámicos que, mediante un flujo continuo de propiedades, conducen a un sistema aparentemente estable (Nicholson y Dupré 2018). Es lo que solemos llamar un sistema homeostático, pero que va mucho más allá de un sistema complejo auto-organizado, por cuanto se encuentra en constante evolución. Materia, energía e información fluyen creando complementariedad y resiliencia, maximizando la complejidad y minimizando el desorden (entropía).

Temporalmente, algunas porciones del sistema exhiben un elevado grado de organización pero estas regiones renuevan completamente su materia en ciclos mucho más cortos… los seres humanos, por ejemplo, renovamos todas nuestras células en períodos mucho más cortos que la extensión de nuestra vida. Desde la perspectiva sustancial de la vida, a estas regiones las llamamos individuos, pero bajo el enfoque procesual desaparece la restricción espacial y temporal del individuo y las entidades diferenciadas se aprecian solo como una imagen estática dentro del continuo flujo de procesos.

La vida como proceso abre una nueva perspectiva a la hipótesis Gaia. Se puede afirmar con certeza que ninguna parte del sistema Tierra, incluidos los seres humanos, está cerrada. Solo la biosfera, con los océanos como elemento esencial y central, es realmente independiente, una entidad de una complejidad inconmensurable que desde hace millones de años funciona y evoluciona utilizando prácticamente solo la energía solar.

Planeta Océano

En el flujo de materia, energía e información –el flujo de la vida– el agua aparece como compuesto químico indispensable. Hace más de un siglo, Lawrence Henderson (1913) destacó sus maravillosas propiedades térmicas y como solvente (de carbono, nutrientes y sales, entre otras). Recientemente, Gerald Pollack (2013) ha enfatizado su ocasional comportamiento cristalino, con sorprendentes afinidades espaciales y temporales.

El agua, que conecta los lugares más alejados del planeta como solvente líquido o como soluto, líquido en el subsuelo y gaseoso en la atmósfera, también llega a los espacios más minúsculos donde tienen lugar los procesos moleculares que posibilitan nuestra existencia. El flujo del agua entre medio y entidades, llámense ecosistemas o individuos, aparece en todas las escalas: desde la formación de los océanos por el impacto de cometas o meteoritos y el reciclado del carbono gracias a la lubricación de las placas tectónicas, hasta la transformación de la energía solar en energía química por medio de la fotosíntesis y los ciclos biogeoquímicos responsables del mantenimiento del volumen de agua planetaria.

Hablar del ciclo hidrológico es hablar de océanos, y hablar de océanos es hablar de vida. Los océanos son medio, estructura y propósito. Los océanos contienen el 97% del agua superficial líquida en nuestro mundo y son el mayor repositorio de las propiedades vitales para la vida, con más del 95% de la actividad metabólica planetaria. Los frentes y corrientes oceánicas establecen el entorno físico y biogeoquímico, caracterizando regiones y definiendo el grado de conexión entre ecosistemas. Como resultado, las diferentes regiones oceánicas tienen roles fisiológicos complementarios que posibilitan el funcionamiento del organismo planetario (Pelegrí 2019).

El océano vivo deja de ser una frase metafórica, se convierte en una realidad formada por mucho más que individuos, comunidades y ecosistemas marinos. Al flujo de materia (agua y propiedades biogeoquímicas) le acompaña el de energía (en todas sus formas, desde interna y mecánica hasta química, almacenada como materia orgánica) e información (genética, ambiental, comunidades). De aquí que la búsqueda de exoplanetas con vida empieza por la identificación de planetas con agua líquida.

Gracias a los océanos, gracias al flujo del agua y sus múltiples propiedades, todos estamos interconectados con nuestro entorno y entre nosotros. La vida como proceso cuestiona la individualidad: materia, energía e información forman parte del flujo universal, así ha sido durante unos 4000 millones de años de vida planetaria. Cada uno de nosotros forma parte del planeta, a pesar de que en cada instante nos manifestamos

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

con un elevado grado de organización en un espacio aparentemente limitado.

El futuro de una humanidad en armonía con su entorno yace en nuestra habilidad para desarrollar una consciencia planetaria. La salud del planeta depende de la salud de cada una de sus partes y viceversa, la salud de todo el organismo planetario es lo que nos traerá salud aquí y ahora. La pandemia COVID-19 y la emergencia climática son claros ejemplos de que salud y consciencia planetaria van de la mano.

Este ensayo es la adaptación de un artículo publicado en *The Conversation* el 3 de septiembre de 2020 bajo el título «Planeta océano: el corazón líquido que nos mantiene vivos» (https://theconversation.com/planeta-oceano-el-corazon-liquido-que-nos-mantiene-vivos-145553).

Referencias

Henderson L. 1913. The Fitness of the Environment. The MacMillan Company, 317 pp.

Lovelock J.E. 1979. Gaia: A New Look at Life on Earth. Oxford, 157 pp.

Lovelock J.E., Margulis L. 1974. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere-The Gaia hypothesis. Tellus, 26: 2-10.

Nicholson D.J., Dupré J. 2018. Everything flows – Towards a Processual Philosophy of Biology. Oxford, 416 pp.

Pelegrí J.L. 2008. A physiological approach to oceanic processes and glacial-interglacial changes in atmospheric CO_2. Sci. Mar. 72: 185-202.

Pelegrí J.L. 2019. Corrents i ecosistemes oceànics com a susbsistemes d'un organisme planetari. Treb. Soc. Catalana Biol. 69: 41-48.

Pelegrí J.L., De La Fuente P., Olivella R., García-Olivares A. 2013. Global constraints on net primary production and inorganic carbon supply during glacial and interglacial cycles. Paleoceanogr. 28: 713-725

Pollack G.H. 2013. The Fourth Phase of Water. Ebner & Sons Publishers, 357 pp.

Roca J.M., Pelegrí J.L. 2020. Analysis of the planetary thermal distribution with a simple three-zone maximum-flux model. Int. J. Heat Mass Transfer 160: 120185.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14058

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.2. El impacto del océano Austral en el clima

Anna Olivé Abelló, Josep L. Pelegrí

El océano Austral se define como la región oceánica que rodea y aísla parcialmente al continente antártico de las cálidas aguas subtropicales. Los intensos vientos del oeste elevan las aguas profundas y densas hacia el sur, lo que tiene dos efectos principales. Por un lado, da lugar a la corriente Circumpolar Antártica (ACC), la corriente más intensa, larga y profunda del planeta, que fluye hacia el este y conecta las tres principales cuencas oceánicas contribuyendo al establecimiento de la cinta transportadora oceánica global (figura 1). Por otra parte, permite la interacción directa entre la atmósfera y las aguas profundas, regulando el intercambio de masa, calor, sal, carbono, oxígeno y otras propiedades entre las capas inferiores y superiores del océano global (figura 2).

Las aguas profundas se forman sobre la plataforma continental antártica. El hundimiento de las aguas densas, junto con el ascenso inducido por el viento (afloramiento) de las aguas subsuperficiales, conduce a la formación de patrones de recirculación vertical, que se conocen como las células verticales subantárticas inferior y superior (figura 2). La rama ascendente de ambas celdas eleva las aguas antiguas y profundas entre el 30° S y el pasaje de Drake –desprovistas de oxígeno y enriquecidas en carbono inorgánico disuelto y macronutrientes– hacia el océano superior. A su vez, las ramas descendentes aportan calor, oxígeno, carbono antropogénico y otras propiedades al interior del océano.

En el océano Austral se desarrollan las polinias, regiones libres de hielo dónde se produce la formación de aguas profundas y un aumento de la producción primaria. De aún mayor importancia es su capacidad de almacenamiento y transporte de importantes propiedades físicas y biogeoquímicas hacia las diferentes cuencas oceánicas, causando una profunda influencia en el clima. La intensidad de la ACC zonal y sus células verticales convierten al océano Austral en un importante regulador del clima.

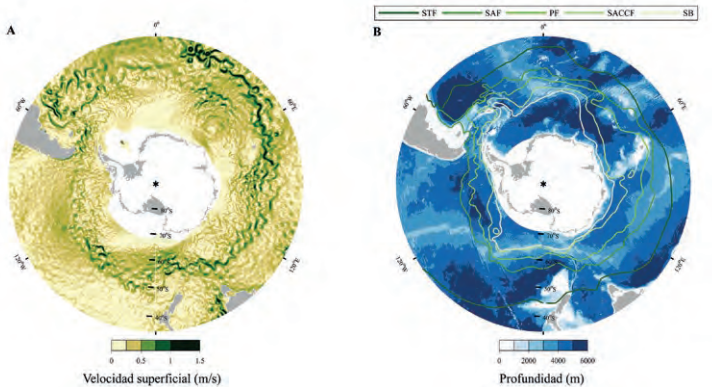


Figura 1. A, instantánea diaria (30 de mayo de 2020) de la estructura rica en remolinos de la superficie del mar en el océano Austral, deducida a partir de un conjunto de datos de 0,25º de resolución que combina datos de satélite con productos de modelos numéricos. B, batimetría y posición de los frentes de la ACC según Orsi *et al.* (1995), de norte a sur: frente Subtropical (STF), frente Subantártico (SAF), frente Polar (PF), frente Sur de la ACC (SACCF) y frente del Límite Sur (SB).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

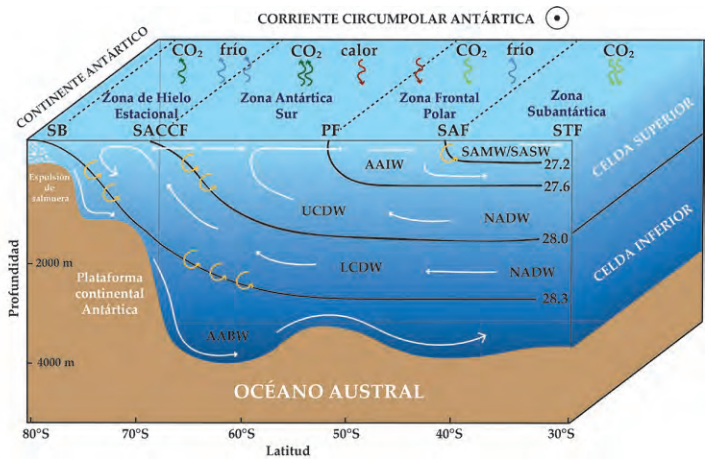


Figura 2. Sección meridional esquemática en el océano Austral que muestra las masas de agua según su densidad neutra (kg m^{-3}), las células meridionales-verticales y las principales zonas de liberación/captación de calor en relación con los frentes circumpolares. Las masas de agua son el agua modal subantártica (SAMW), el agua superficial subantártica (SASW), el agua intermedia antártica (AAIW), el agua profunda circumpolar superior (UCDW), el agua profunda circumpolar inferior (LCDW), el agua antártica de fondo (AABW) y el agua profunda del Atlántico Norte (NADW).

Un regulador térmico regional y global

Durante la formación del hielo marino, la sal es expulsada al agua subyacente en un proceso de formación de salmuera. Esto provoca un aumento de la densidad de las aguas de la plataforma continental que genera mezcla y convección vertical, originando la fría y densa agua antártica de fondo (AABW). Una vez formada, la AABW migra hacia el norte siguiendo la topografía, convertida en un factor clave para mantener frías las regiones abisales (Carter *et al.* 2008).

Los intensos vientos zonales moldean las aguas circumpolares profundas generando los frentes de la ACC, que son regiones con gradientes latitudinales de densidad máximos y corrientes zonales extremas (figura 1). Estos sistemas frontales son también los emplazamientos principales para las ramas de ascenso y descenso de las células verticales superior e inferior (figura 2). Las aguas que afloran entre el frente Sur de la ACC (SACCF) y el frente Polar (PF) se transforman en aguas antárticas superficiales, modales e intermedias más ligeras, que serán transportadas hacia el norte y se hundirán (proceso denominado subducción) entre el PF y el frente Subtropical (STF) (Rintoul 2018).

En verano, una de las consecuencias del proceso de subducción es la liberación de calor atmosférico hacia el interior del océano, lo que equilibra el calor perdido hacia la atmósfera en latitudes más bajas. Se ha estimado que el océano Austral es responsable de absorber aproximadamente el 75% de calor antropogénico desde el período preindustrial, actuando por tanto como un regulador muy eficiente del calentamiento global.

Por otro lado, la subducción de aguas ligeras compensa el transporte hacia el sur de las masas de agua profundas (relativamente cálidas y saladas) originadas en el océano Atlántico Norte. Cuando estas aguas septentrionales llegan al océano Austral, el intenso afloramiento las lleva hacia las capas superficiales. Una de las consecuencias es la fusión del hielo de la plataforma antártica, causando la formación de polinias costeras y la disminución del espesor del hielo de la plataforma.

Interacciones entre el deshielo, el albedo de la superficie y el aumento del nivel del mar

El clima global y el aumento del nivel del mar están regulados en gran medida por las interacciones bidireccionales entre el océano y la criosfera en el océano Austral. El calentamiento del agua del mar es una fuerza impulsora de la fusión del hielo de la plataforma, lo que influye en el balance de agua dulce, repercute en la estabilidad de la capa de hielo antártica y controla la contribución del océano Austral a la cinta transportadora oceánica global.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Los cambios en la extensión del hielo marino también influyen en el albedo de la superficie terrestre, definido como la proporción de radiación solar que es reflejada por la tierra, el océano o el hielo; cuanto más blanca es la superficie, mayor es el albedo. La región antártica presenta una de las mayores variaciones de albedo del planeta, asociada a la gran expansión y contracción estacional del hielo marino. La reducción de la extensión del hielo marino provocará tanto una disminución del albedo, de modo que el océano Antártico absorberá más radiación solar, como un aumento de la temperatura de las aguas superficiales, que disminuirá la capacidad del agua para absorber dióxido de carbono (Rintoul *et al.* 2010).

La evolución de la capa de hielo de la Antártida, la mayor reserva de hielo terrestre del planeta, sigue siendo una gran incógnita, ya que depende no solamente de la incorporación del exceso de calor atmosférico, de origen antropogénico, sino también de la compleja combinación de diferentes factores. Un aumento de las precipitaciones en forma de nieve (mayor albedo) y una disminución de la intensidad de la célula vertical del océano Austral (una llegada menor de aguas cálidas a la región) favorecerán el mantenimiento del hielo continental. Por el contrario, la reducción del albedo superficial y el deshielo de las aguas sumergidas litorales provocarían la reducción de las capas de hielo sobre la Antártida (DeConto *et al.* 2021).

Un papel global relevante en el ciclo del carbono

El océano Austral destaca por ser la principal región dónde se almacena el exceso de CO_2 antropogénico. El intercambio neto de carbono viene determinado por el equilibrio de dos efectos opuestos: la desgasificación natural en las latitudes más altas, donde las aguas profundas ricas en carbono entran en contacto con la atmósfera, y la subducción de carbono antropogénico, especialmente en la zona subantártica (figura 2). El resultado de dicho equilibrio es la captación por parte del océano de aproximadamente 1 Pg de carbono al año, lo que representa más del 40% de la captación global de dióxido de carbono antropogénico por parte de todo el océano (Rintoul *et al.* 2010).

La producción primaria de los organismos fotosintéticos consume la escasa cantidad de nutrientes inorgánicos disponibles en la superficie del mar. El intenso afloramiento del océano Austral es la principal vía de retorno del nitrato, el fosfato y el silicato desde las profundidades hacia la parte superior del océano, responsable de mantener el elevado nivel de producción primaria. Cuando los frentes de la ACC interactúan con la batimetría, los sedimentos ricos en hierro también emergen, siendo exportados a miles de kilómetros de su origen. A medida que son incorporados en las aguas modales subantárticas, estos nutrientes sostienen alrededor del 75% de la producción primaria oceánica al norte de 30° S, convirtiéndose, a la vez, en un importante sumidero de CO_2 atmosférico y una fuente de oxígeno para nuestra atmósfera (Sarmiento *et al.* 2004).

Las ideas aquí expuestas reflejan que el océano Austral, frío y profundo, actúa como una barrera y como un conector. Es una barrera para el continente helado antártico, y más importante aún, una región que almacena y distribuye grandes cantidades de propiedades climáticas clave. Esta conectividad con las principales cuencas oceánicas sitúa al océano Austral como un actor esencial en los flujos y el almacenamiento de energía a escala global, que comprende desde la producción primaria hasta el clima, en lo que se puede entender como el sistema metabólico planetario.

Referencias

Carter L., McCave I.N., Williams M.J. 2008. Circulation and water masses of the Southern Ocean: a review. Developments in earth and environmental sciences, 8: 85-114.

DeConto R.M., Pollard D., Alley R. B., *et al.* 2021. The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. Nature, 593(7857): 83-89.

Rintoul S.R. 2018. The global influence of localized dynamics in the Southern Ocean. Nature, 558(7709): 209-218.

Rintoul S.R., Speer K., Sparrow M., *et al.* 2010. Southern Ocean Observing System (SOOS): Rationale and strategy for sustained observations of the Southern Ocean. Proceedings of OceanObs '09: Sustained Ocean Observations and Information for Society.

Sarmiento J.L., Gruber, N., Brzezinski, M.A., *et al.* 2004. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. Nature 427(6969): 56-60.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14059

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.3. La vida en los océanos: de la magia de las estrellas al conocimiento científico del plancton

Magda Vila, Vanessa Balagué

El comienzo de todo empezó con la gran explosión a partir de la cual se formaron las estrellas y, después, los planetas. La gran bola de fuego, que millones de años más tarde llamaríamos planeta Tierra, se fue enfriando y solidificando hasta que, cuando ya estaba suficientemente fría, el vapor de agua condensó e inundó las grandes cuencas dando lugar a una vasta extensión de agua que llamaríamos océano. La atmósfera primitiva hubiera sido irrespirable para la mayoría de seres vivos actuales, era reductora, y estaba formada principalmente por metano (CH_4), amoniaco (NH_3) y vapor de agua (H_2O), y a lo largo del tiempo se enriqueció con otros gases procedentes de la actividad volcánica.

Vida! De las primeras formas a las actuales

El tiempo fue pasando y hace unos 3800 millones de años se originaron las primeras formas de vida. Era vida microscópica y muy simple, anaeróbica (que vivía en ausencia de oxígeno en el aire) y que comenzó a poblar los sistemas acuáticos. Las células procariotas, sin núcleo diferenciado, fueron los únicos habitantes del planeta durante varios millones de años. Seres vivos que fueron evolucionando y se fueron diversificando en morfología (cocoide, bacilar, espiral) y tamaño. También se diversificaron sus rutas metabólicas y, hace unos 2700 Ma, algunos de estos microorganismos, las cianobacterias, comenzaron a producirse su propio alimento captando CO_2 del medio y, mediante la energía del sol, transformándolo en materia orgánica (azúcares), agua y un material de desecho altamente tóxico para los habitantes primitivos, el oxígeno (O_2) (Cermeño 2020). Habían inventado la fotosíntesis. El tiempo seguía transcurriendo, y estos ancestros, poco a poco, fueron transformando la atmósfera primitiva en una atmósfera oxigénica hasta dar lugar a la masa gaseosa actual donde predomina el nitrógeno (N_2, 78%), el oxígeno (O_2, 21%), el argón (Ar, ~0.9%) y el dióxido de carbono (CO_2, ~0.04%). Hay un escaso conocimiento científico sobre la formación de las células eucariotas, con un núcleo diferenciado, pero en 1967, Lynn Margulis, una científica revolucionaria, propuso una teoría sobre el origen de los eucariotas basada en la simbiosis como mecanismo evolutivo (Margulis 2002, Cornejo y Pita 2022). La teoría simbiótica postula que los cloroplastos (los orgánulos de las plantas que permiten hacer la fotosíntesis) y las mitocondrias (las fábricas de energía de las células con núcleo) son el resultado de sucesivas simbiosis de procariotas que dieron lugar a la célula eucariota. Aún no sabemos cuándo, dónde y cómo las células eucariotas evolucionaron, pero hoy en día no hay duda de que la simbiogénesis tuvo un papel clave en la evolución de la vida hacia formas más complejas. Algunos de estos organismos marinos complejos colonizaron la tierra emergida, y unos pocos retornaron al mar (por ejemplo, las fanerógamas marinas y las ballenas). Pero esta parte de la historia la pasaremos por alto para transportarnos al océano actual.

Plancton: el motor de la vida del océano

¿Qué hay en este inmenso ecosistema líquido? Sabemos que hay muchos peces de tamaños,

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

formas y colores diversos, aves que dependen de ellos, grandes mamíferos, reptiles, invertebrados, muchos organismos de formas extrañas, animales que parecen plantas –como los corales–, vegetales que son tan pequeños que no se dejan ver –como el fitoplancton–, y diminutos crustáceos que se alimentan de ellos –el zooplancton–. Pero paremos. Paremos y pasemos a explicar sobre este mundo poco conocido que forma el plancton. La palabra plancton significa errante, y es que el plancton está formado por todos los organismos acuáticos que, a la deriva o flotando en el mar, tienen una capacidad de movimiento limitada, por lo que no son capaces de vencer la fuerza de las olas y las corrientes, por el contrario, se dejan llevar por su vaivén y por la circulación oceánica. El plancton (figura 1) está formado por organismos muy pequeños, microscópicos, pero también por otros mucho más grandes como las medusas o las larvas de peces y de numerosos invertebrados marinos (larvas de erizos, estrellas y pepinos de mar, corales y gorgonias ...) (El mar a fondo: https://elmarafons.icm.csic.es/la-xarxa-trofica/). Cuando hablamos del plancton cabe destacar el papel relevante de los productores primarios formados por nanoalgas y microalgas (fitoplancton) y por bacterias autotróficas (cianobacterias). Y aquí es donde radica la magia de estos organismos productores de materia orgánica sin los cuales no habría el alimento necesario para que el resto de organismos marinos (o terrestres), los consumidores –herbívoros y carnívoros– pudieran vivir. Por ello, simplificando, decimos que el fitoplancton

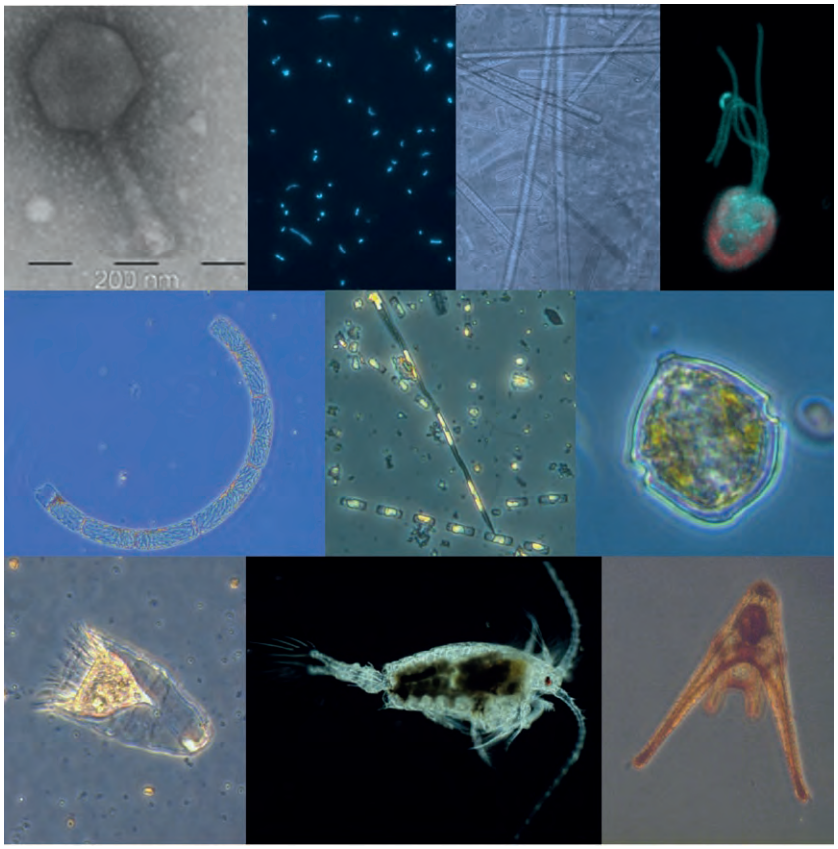


Figura 1. Fotocomposición de diversos organismos microscópicos del plancton marino. De izquierda a derecha y de arriba abajo. Arriba: virus *Myovirus* (Elena Lara y Dolors Vaqué), bacterias (Irene Forn y Ramon Massana), cianobacterias filamentosas (Magda Vila), flagelado autotrófico (Irene Forn). Medio: diatomea *Guinardia striata* (Laura Arin), cadenas de diatomeas de los géneros *Pseudo-nitzschia* y *Skeletonema* (Magda Vila), dinoflagelado del género *Scrippsiella* (Magda Vila). Abajo: ciliado tintínido (Albert Calbet), copépodo *Centropages typicus* (Albert Calbet), larva de erizo de mar *Paracentrotus lividus* (Marc Mascaró y Magda Vila). Los tamaños de los diferentes microorganismos oscilan entre los 200 nm y los 2 cm.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

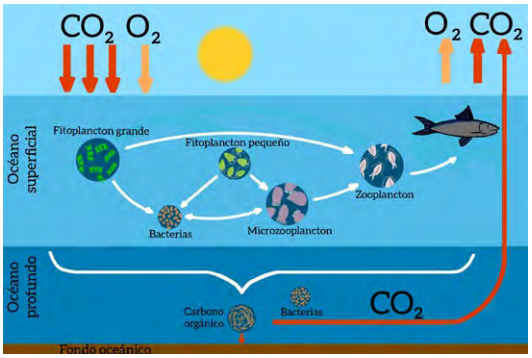


Figura 2. Esquema simplificado de la red trófica microbiana y la bomba biológica del carbono en el océano. Figura adaptada por Helena Galán de una figura de Chisholm (2000).

está en la base de las redes tróficas marinas (Estrada 2013). Además, sin los organismos oxigénicos, no disfrutaríamos de una atmósfera con el suficiente O_2 que nos permite respirar, una parte considerable del cual viene del mar, producido en tiempos remotos por los microorganismos invisibles del plancton. Pero aún no hemos terminado, también tienen un papel primordial en la regulación del CO_2 atmosférico que tanto nos preocupa porque es uno de los principales gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global que sufre nuestro planeta. Cuando los productores primarios del mar realizan la fotosíntesis atrapan carbono de la atmósfera en forma de CO_2 para construir su estructura celular. Al morir o ser consumidos por el zooplancton y/o lisados por virus, sus componentes terminan siendo remineralizados por bacterias y hongos, conformando la red trófica microbiana (Chisholm 2000). Pero una pequeña parte del carbono escapa de esta red de la vida y se acumula en el fondo del océano donde queda inmovilizado durante miles y miles de años.
Es lo que se conoce como bomba biológica del carbono, que tiene una importancia primordial porque disminuye el retorno de carbono en forma de CO_2 hacia la atmósfera, y, por consiguiente, ayuda a reducir el calentamiento global del planeta (figura 2). Si no fuera por el papel trascendental que el océano juega en la captación de CO_2, su concentración atmosférica sería superior a la actual y en consecuencia también lo sería la temperatura media del planeta.

La gran variedad de organismos que forman el plancton y la enorme disparidad de organismos marinos son fundamentales para tener un océano resiliente y saludable. Una elevada diversidad biológica, a menudo, da la fuerza necesaria a un ecosistema para resistir los daños causados por una perturbación, sea natural o antropogénica. Bajo un fuerte estrés, las comunidades naturales y diversificadas son sustituidas por unos pocos organismos que se reproducen de forma desmesurada, produciéndose un cambio de comunidades complejas por otras muy simplificadas, muchas veces casi monoespecíficas. Es el caso de algunas proliferaciones de fitoplancton y de las grandes proliferaciones de medusas que, en las últimas décadas, han incrementado en frecuencia, intensidad y temporalidad. El Institut de Ciències del Mar (ICM), desde sus inicios, con la figura del profesor Ramon Margalef y varios de sus estudiantes, ha sido líder en el estudio de los organismos que forman parte del plancton, en la comprensión de los mecanismos que regulan sus dinámicas y en los procesos biogeoquímicos en los que están involucrados.

Referencias

Cermeño P. 2020. Las diatomeas y los bosques invisibles del océano. Los Libros de la Catarata, Madrid, 93 pp.
Chisholm S.W. 2000. Stirring times in the Southern Ocean. Nature 407: 685-687.
Cornejo F.M., Pita L. 2022. Simbiosis: una fuente de innovación para sobrevivir a un océano desafiante. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 59-61.
Estrada M. 2013. La columna d'aigua. En: Ecosistemes dels Països Catalans. Atles. Història Natural dels Països Catalans. Els ecosistemes marins / Els ambients pelàgics: 122-123.
Margulis L. 2002. Planeta simbiótico. Un nuevo punto de vista sobre la evolución. Ed. Debate. Madrid, 176 pp.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14060

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.4. Microorganismos en un océano cambiante

Maria Montserrat Sala, Josep M. Gasol, Ramon Massana, Dolors Vaqué

La vida surgió en la tierra hace casi cuatro millones de años, cuando microorganismos primitivos aparecieron en medio de océanos sulfurosos y cielos tóxicos. Que el aire que tenemos hoy en día sea respirable lo debemos a microorganismos, que han ido evolucionando y modificando nuestro planeta durante miles de millones de años hasta conseguir que ahora haya suficiente oxígeno para nuestra vida (figura 1) (Vila y Balagué 2022). Su enorme variabilidad genética y rápido crecimiento hace que los microorganismos tengan una gran capacidad de respuesta y adaptación a las nuevas condiciones ambientales. Últimamente, sin embargo, los microorganismos marinos se están enfrentando a toda una serie de cambios ambientales sin precedentes, muchos de ellos asociados a impactos humanos, y su capacidad de respuesta será clave para mantener la vida en los ecosistemas marinos (Hutchins y Fu 2017).

Los microorganismos marinos forman comunidades muy diversas y productivas que incluyen el fitoplancton, los protistas, los hongos, los virus y los dos grupos principales de procariotas, bacterias y arqueas. Su relevancia en el océano es evidente por el número total de células (10^{29}) o por el hecho de que el 70-90% de la biomasa en el mar sea microbiana. A pesar de ser microscópicos e invisibles a los ojos, juegan un papel clave en los ciclos biogeoquímicos. Por ejemplo, las transformaciones microbianas del nitrógeno

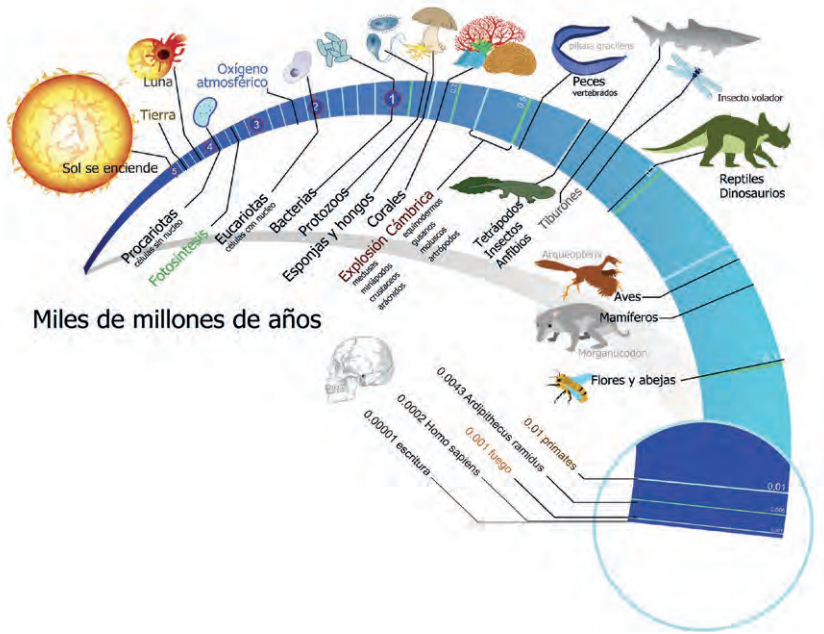


Figura 1. Diferentes fases de la evolución de la vida en el planeta, donde se muestra su origen microbiano, concretamente procariótico. Fuente: Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

en el océano contribuyen de gran manera a los flujos de nitrógeno y, muy especialmente, los microorganismos tienen un lugar central en el ciclo de carbono ya que participan en la bomba biológica que secuestra CO_2 de la atmósfera hacia el océano profundo.

Los efectos del cambio global sobre los microorganismos son la clave para el funcionamiento del océano

El cambio global que experimenta la Tierra en las últimas décadas lleva a un océano más cálido y más ácido debido al incremento de temperatura y a la acumulación de CO_2, el deshielo de los polos, o el incremento de la estratificación de la columna de agua, que resulta en la expansión de zonas empobrecidas en oxígeno. Los debates sobre cambio global a menudo ignoran el mundo microbiano, seguramente porque estos organismos no son tan visibles como los osos polares o las ballenas, o no tienen la importancia comercial de algunos peces. El impacto del cambio global sobre los microorganismos marinos puede tener, sin embargo, importantes consecuencias en el océano, incluyendo cambios en la productividad, en las redes tróficas y en la exportación de carbono hacia sedimentos profundos (Cavicchioli *et al.* 2019).

El cambio global altera las interacciones entre las especies y las fuerza a adaptarse, migrar, o extinguirse. Los microorganismos pueden dispersarse más fácilmente que los organismos más grandes (Ruiz-González *et al.* 2022), y su rápida reproducción permite un alto potencial de adaptación. De todos modos, no se conocen mucho los mecanismos de respuesta fisiológica al cambio global y sus implicaciones sobre los ciclos biogeoquímicos. Por ejemplo, no hay una información clara sobre cuál es la tendencia del fitoplancton en las últimas décadas, a menudo por falta de datos, y es por eso que necesitamos reforzar las series temporales (Massana *et al.* 2022). A partir de experimentos, sin embargo, parece que el impacto del cambio global será negativo sobre los cocolitóforos, algas unicelulares que se caracterizan por tener placas de carbonato cálcico de funcionalidad incierta, pero que se disuelven a pH bajos (figuras 2A, B). Por otra parte, parece

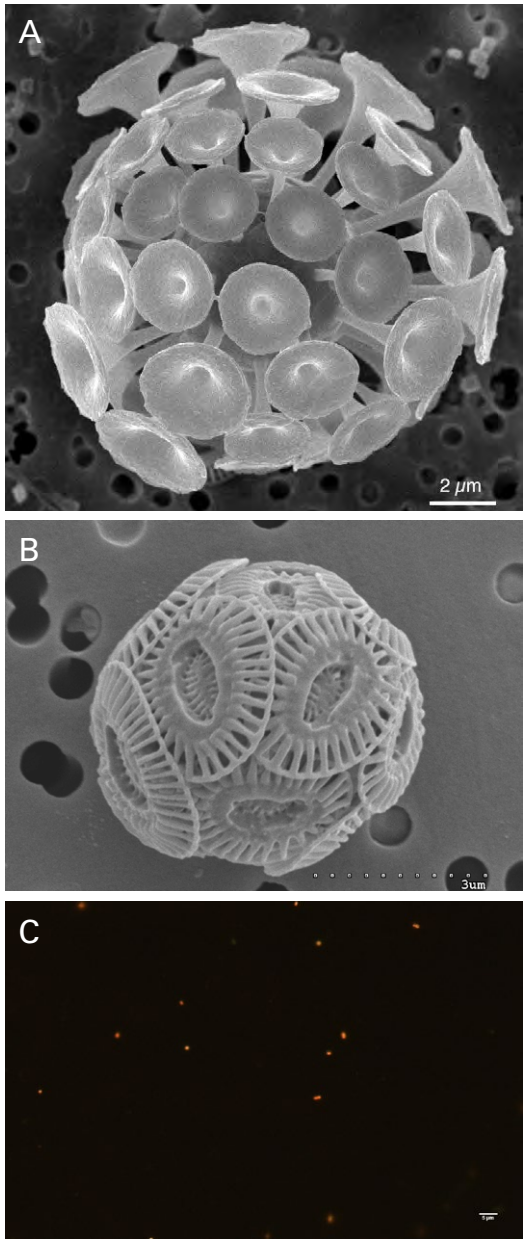


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de dos cocolitofóridos, *Discosphaera tubifera* (A), y *Emiliania huxleyi* (B), que se verán afectados de manera negativa por el cambio global. Imagen de microscopía óptica de *Synechococcus* (C), cianobacteria que será favorecida por el cambio global. Fotos: Lluïsa Cros y Dolors Vaqué.

que se producirá un aumento o una disminución de la producción primaria según el ecosistema, pero favorecerá a los productores primarios de pequeño tamaño, como las cianobacterias (figura 2C) respecto a microorganismos fitoplanctónicos

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

mayores. Esta disminución del tamaño de los productores primarios del océano puede tener graves consecuencias para el planeta ya que se verá reducida la sedimentación de los mismos y por lo tanto el secuestro de carbono atmosférico hacia los sedimentos profundos.

Los efectos del cambio global sobre los microorganismos se han estudiado generalmente en experimentos de corta duración, de semanas o meses (p. ej. Sala *et al.* 2016), pero dada la capacidad de los microorganismos para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes, son necesarios estudios de larga duración donde se combinen diferentes factores ambientales, para obtener resultados más robustos y que nos permitan predecir las consecuencias ecológicas.

El impacto humano y los microorganismos en el océano

Otro componente del cambio global, especialmente en las últimas décadas, es el impacto negativo de la actividad humana en la costa, causando eutrofización, blooms de algas tóxicas o hipoxia (Berdalet *et al.* 2022). También han aumentado los vertidos de sustancias tóxicas y la acumulación de basura marina, alrededor de un 80% de las cuales son plásticos (Morales-Caselles *et al.* 2021). Los diferentes tipos de plásticos tienen una presencia casi ubicua en el mar (fondos marinos, hielo, sedimentos, etc.) y parece que su concentración se doblará en los próximos diez años. Estos plásticos se fragmentan en partículas de microplástico que son colonizadas por microorganismos, formando lo que se llama la 'plastisfera', que los hace más sabrosos para el consumo de organismos más grandes y permite que pasen a niveles superiores de la red trófica (Amaral-Zettler *et al.* 2020), causando problemas en diferentes grupos de animales. Además, son partículas poco biodegradables, lo que hace que actúen como vehículo de transporte de microorganismos entre ecosistemas, lo que puede favorecer la propagación de microorganismos patógenos y la introducción de especies invasoras. Uno de los retos científicos de futuro para contribuir a la reducción de plásticos en el planeta pasa precisamente por el aislamiento de microorganismos con enzimas capaces de acelerar la biodegradación de microplásticos.

Retos de futuro para los microbiólogos marinos

El reto principal de los microbiólogos marinos en las próximas décadas será predecir la respuesta de los microorganismos al conjunto de alteraciones ambientales provocadas por el cambio global, tanto en cuanto a especies concretas como sus interacciones, y cómo esto repercutirá sobre la biogeografía y la estructura de las comunidades y, sobre todo, su potencial alteración de los ciclos biogeoquímicos del océano.

Referencias

Amaral-Zettler L.A., Zettler E.R., Mincer T.J. 2020. Ecology of the plastisphere. Nat. Rev. Microbiol. 18: 139-151.

Berdalet E., Arin L., Vila M., Viure L. 2022. Proliferaciones de organismos fotosintéticos: cara y cruz de los pilares de los ecosistemas marinos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 56-58.

Cavicchioli R., Ripple W.J, Timmis K.N., *et al.* 2019. Scientists' warning to humanity: microorganisms and climate change. Nat. Rev. Microbiol. 17: 569-586

Hutchins D.A., Fu F. 2017. Microorganisms and ocean global change. Nat. Microbiol. 2: 17058.

Massana R., Vaqué D., Sala M., Gasol J.M. 2022. Observatorios microbianos: centinelas del cambio global. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánnica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 136-138.

Morales-Caselles C., Viejo J., Martí E., *et al.* 2021. An inshore-offshore sorting system revealed from global classification of ocean litter. Nat. Sustain. 4

Ruiz-González C., Sebastián M., Gasol J.M. 2022. Un océano microbiano sin fronteras: Conectando microorganismos dentro y fuera del ecosistema marino. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 53-55.

Sala M.M., Aparicio F., Balagué V., *et al.* 2016. Contrasting effects of ocean acidification on the microbial food web under different trophic conditions. ICES J. Mar. Sci. 73: 670-679.

Vila M., Balagué V. 2022. La vida en los océanos: de la magia de las estrellas al conocimiento científico del plancton. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 47-49.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14061

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.5. Un océano microbiano sin fronteras: conectando microorganismos dentro y fuera del ecosistema marino

Clara Ruiz-González, Marta Sebastián, Josep M. Gasol

Dondequiera que mires hay vida que no puedes ver. En tus manos, tu mesa, tu ordenador, el aire, el suelo, la hierba, el agua. Los microorganismos prosperan en todo tipo de hábitats (incluido nuestro propio cuerpo) y, a pesar de sus insignificantes tamaños, son responsables de procesos biogeoquímicos de importancia global. El océano no es una excepción, ya que la mayor parte de la vida marina es microbiana y el agua de mar es, en esencia, una sopa de microorganismos flotando a la deriva. Entre todos ellos, son las bacterias y las arqueas los seres vivos más pequeños. Con aproximadamente unas 10^{29} células en el océano (¡más que estrellas en el universo!) y 10^{10} especies diferentes, tanto la química como la vida en el océano están en gran medida controladas por la actividad microbiana y sus interacciones con otras criaturas planctónicas: se dividen y crecen, son cazadas, respiran y mueren, y durante estos procesos producen, consumen y transforman una gran diversidad de elementos químicos. Por ejemplo, gran parte del oxígeno que respiramos se produjo por la actividad de unas pequeñas bacterias fotosintéticas que ahora son muy abundantes en las capas iluminadas del océano (Vila y Balagué 2022). Sin ellas, de hecho, ni siquiera estaríamos en este planeta.

Como ecólogos microbianos estamos interesados en comprender cómo estos microorganismos marinos interactúan con el medio ambiente. Para ello, investigamos los cambios en la composición de las comunidades microbianas y sus funciones a lo largo de gradientes ambientales, así como los principales factores que controlan la abundancia del bacterioplancton, tales como los depredadores bacterianos o los virus. Sin embargo, aún estamos lejos de comprender las consecuencias que los cambios en las comunidades microbianas pueden tener sobre la salud de los ecosistemas, incluido el océano, fundamentalmente porque la mayoría de las especies microbianas son desconocidas y no sabemos qué papel juegan en su entorno natural.

La inesperada ubicuidad de los microorganismos

Durante las últimas décadas, nos hemos vuelto cada vez más eficientes en la caracterización de la diversidad microbiana oculta en muestras naturales mediante la secuenciación de su material genético (ya que no es posible distinguir morfológicamente estos organismos), y se han realizado multitud de estudios dedicados a explorar si las bacterias presentan patrones espaciales y temporales comparables a los observados en animales y plantas. En el océano, estas investigaciones han arrojado luz sobre la complejidad de la vida microbiana marina: sabemos que algunas especies bacterianas existen como células individuales (suspendidas libremente en el agua) mientras que otras prefieren vivir adheridas a material orgánico muerto o a otros organismos; sabemos que las comunidades bacterianas cambian con la profundidad porque las especies que dominan en la superficie son muy diferentes de las que habitan las profundidades del océano, y hemos visto que las comunidades bacterianas cambian estacionalmente en una sucesión de especies que se repite

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

año tras año. Las técnicas de secuenciación permitieron descubrir también la existencia de una enorme diversidad de especies bacterianas marinas muy raras (de abundancias muy bajas), que no habían sido detectadas antes. Estas especies «raras» juegan un papel crucial en los procesos de biorremediación y restauración de ecosistemas tras perturbaciones, tales como vertidos de petróleo o tormentas, albergando un gran potencial biotecnológico (Gasol *et al.* 2022).

La detección de especies raras revolucionó el campo de la ecología microbiana al expandir radicalmente nuestra percepción de las áreas de distribución de las especies bacterianas; muchas parecen estar en todas partes y son capaces de permanecer inactivas fuera de sus hábitats preferidos durante mucho tiempo (¡incluso miles de años!), en un estado que se denomina «latencia», hasta que encuentran condiciones favorables para el crecimiento (p. ej. Sebastián *et al.* 2019). El hecho de encontrar las mismas bacterias en distintos ámbitos, junto con su impresionante capacidad de persistencia, implica que la dispersión microbiana es probablemente mucho más importante de lo que creíamos hasta ahora, y que las comunidades microbianas pueden estar mucho más conectadas entre sí de lo que aparentan.

Dispersión sin límites dentro y fuera del océano

Los científicos estamos comenzando a descubrir y caracterizar nuevas vías de dispersión microbiana (figura 1A). Por ejemplo, recientemente hemos descubierto que las comunidades microbianas del océano profundo están

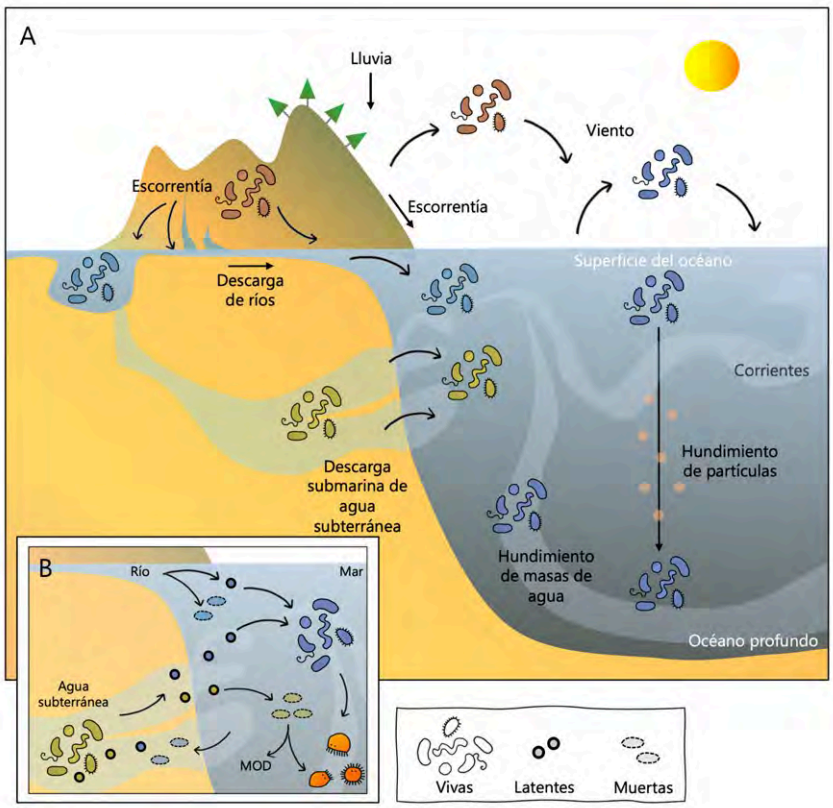


Figura 1. A, principales rutas de dispersión microbiana dentro y fuera del océano, destacando que las interacciones entre comunidades microbianas trascienden los límites de los ecosistemas (modificado de Ruiz-González 2020). B, el recuadro muestra que esta dispersión puede resultar en la activación de especies inactivas y/o en la inactivación (o muerte) de especies vivas debido al cambio en las condiciones ambientales. Esto podría tener consecuencias para los ecosistemas y las redes tróficas, p. ej. mediante la liberación de carbono y nutrientes de las células moribundas o la ingestión de células alóctonas por otros depredadores bacterianos marinos (en naranja). MOD; materia orgánica disuelta.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

conectadas con las de la superficie porque las partículas orgánicas que se hunden transportan microorganismos adheridos (Mestre *et al.* 2018), lo que nos llevó al hallazgo sorprendente de que las condiciones y la biota de la superficie son importantes determinantes del microbioma del océano profundo (Ruiz-González *et al.* 2020). Otros investigadores también han descrito que las masas de agua que se hunden y las corrientes pueden mover microbios por todo el océano, y que el viento puede transportar microorganismos marinos a lo largo de miles de kilómetros uniendo regiones oceánicas remotas (Mayol *et al.* 2017), lo que podría explicar la ubicuidad de ciertas especies de bacterias marinas.

Por otra parte, este océano microbiano no está desconectado de los ecosistemas terrestres o de agua dulce que lo rodean. Enormes cantidades de agua y material se transportan al océano a través de los ríos, la escorrentía u otras vías hidrológicas como la descarga de aguas subterráneas, y a su vez, la actividad microbiana en los sedimentos costeros, los estuarios o el mar controla en gran medida el flujo y el destino de los elementos químicos que transporta el agua. Pero esta agua continental transporta también microorganismos. Aunque se desconoce la relevancia de estos microbios dispersados en el océano, algunos estudios en sistemas de agua dulce sugieren que podría ser significativa: por ejemplo, hemos visto que las comunidades bacterianas de los lagos están muy influenciadas por el transporte de microorganismos del ecosistema terrestre circundante ya que algunos de ellos pueden crecer y dominar el medio acuático (Ruiz-González 2020). Por lo tanto, la ecología microbiana marina debería considerar todas estas conexiones con los ecosistemas terrestres y de agua dulce, pero esto rara vez se hace y hay muchas preguntas sin respuesta: ¿Pueden prosperar en el océano estos microorganismos dispersados e impactar el ciclo de los elementos químicos? Los científicos han demostrado que es posible recuperar experimentalmente bacterias marinas vivas de los sedimentos de los lagos o del aire, lo que sugiere que los ecosistemas terrestres o de agua dulce albergan bacterias marinas inactivas a la espera de ser devueltas a condiciones marinas. ¿Pueden estas especies transportadas servir como alimento adicional para los microorganismos marinos que se alimentan de bacterias y arqueas? ¡Esto implicaría una fuente de carbono externo y energía hasta ahora ignorada en las redes tróficas marinas (figura 1B)! ¿Estamos detectando especies bacterianas «extranjeras» que no funcionan en el océano y que, por tanto, dificultan y confunden nuestra interpretación de los patrones microbianos? Etcétera, etcétera.

Los paisajes microbianos son mucho más complejos de lo que tendemos a pensar y en modo alguno están aislados. Comprender el funcionamiento del océano y las amenazas que se ciñen sobre él requiere traspasar sus límites y considerar las complejas conexiones entre estos motores microscópicos que mantienen el funcionamiento de nuestro planeta. Solo entonces seremos capaces de comprender y predecir cómo se comportará el océano al enfrentarse a cualquiera de los posibles escenarios en el futuro.

Referencias

Gasol J.M., Massana R., Sala M., *et al.* 2022. Microorganismos marinos y biotecnología azul. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 20-23.

Mayol E., Arrieta J.M., Jiménez M.A., *et al.* 2017. Long-range transport of airborne microbes over the global tropical and subtropical ocean. Nat. Comm. 8: 201.

Mestre M., Ruiz-González C., Logares R., *et al.* 2018. Sinking particles promote vertical connectivity in the ocean microbiome. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 115: E6799-E6807.

Ruiz-González C. 2020. Microbial metacommunities: dispersal and connectivity as key drivers of the diversity and function of aquatic microorganisms. Premis de la Secció de Ciències Biològiques, 1. Institut d'Estudis Catalans, 42 pp. http://www.iec.cat/activitats/documents/Metacomunitats_ANG.pdf

Ruiz-González C., Mestre M., Estrada M., *et al.* 2020. Major imprint of surface plankton on deep ocean prokaryotic structure and activity. Mol. Ecol. 29: 1820-1838.

Sebastián M., Estrany M., Ruiz-González C., *et al.* 2019. High growth potential of long-term starved deep ocean opportunistic heterotrophic bacteria. Front. Microbiol. 10: 760.

Vila M., Balagué V. 2022. La vida en los océanos: de la magia de las estrellas al conocimiento científico del plancton. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 47-49.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14062

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.6. Proliferaciones de organismos fotosintéticos: cara y cruz de los pilares de los ecosistemas marinos

Elisa Berdalet, Laura Arin, Magda Vila, Laia Viure

Los organismos fotosintéticos constituyen la base de las redes tróficas y son los pilares de los ecosistemas terrestres y acuáticos. La fotosíntesis se realiza mediante pigmentos diversos (clorofila, carotenoides, biliproteínas; p.e. Berdalet 2020) que captan la energía de la luz para incorporar el CO_2, sintetizar materia orgánica y producir el O_2 que respiramos.

Dinámica de las proliferaciones de organismos fotosintéticos

Los organismos fotosintéticos son muy diversos. En el medio acuático, encontramos desde pluricelulares y macroscópicos (como los macrófitos –posidonia– y las macroalgas –sargazos, lechuga de mar, el alga nori del sushi–) a unicelulares y microscópicos (microalgas y ciertas bacterias). Algunos flotan y son arrastrados por las corrientes (sargazos, microfitoplancton); otros viven adheridos a superficies del fondo (la gran mayoría de macroalgas, macrófitos y el microfitobentos). Los organismos fotosintéticos también participan en la «bomba biológica de carbono», el proceso que transporta el carbono atmosférico al fondo de los océanos, contribuyendo así a la regulación del clima (Vila y Balagué 2022, Segura-Noguera *et al.* 2022).

El ritmo de crecimiento de los organismos fotosintéticos viene marcado en gran parte por la latitud y las estaciones. Además, en el medio acuático, el movimiento del agua y las corrientes determinan la disponibilidad de luz y nutrientes. Por ejemplo, centrándonos en mares de latitudes templadas, como el Mediterráneo (Estrada 1999, Estrada *et al.* 2022), la proliferación del fitoplancton y principalmente de las diatomeas (figura 1) se produce al final del invierno e inicio de la primavera. Las diatomeas crecen en las capas iluminadas, turbulentas (Alcaraz y Estrada 2022) y ricas en nutrientes provenientes de la mezcla del agua durante el otoño-invierno. Progresivamente, el agua superficial se calienta, y al ser menos densa, queda separada de la capa profunda por un gradiente de densidad (picnoclina). En la capa

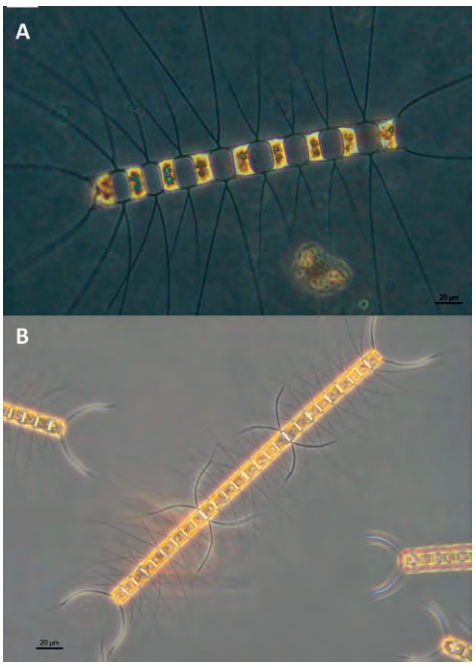


Figura 1. Dos especies de diatomeas del género *Chaetoceros* generalmente abundantes en las proliferaciones de finales de invierno e inicio de primavera en el Mediterráneo. A. *C. decipiens*. B. *C. affinis*. Fotos: L. Arin.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

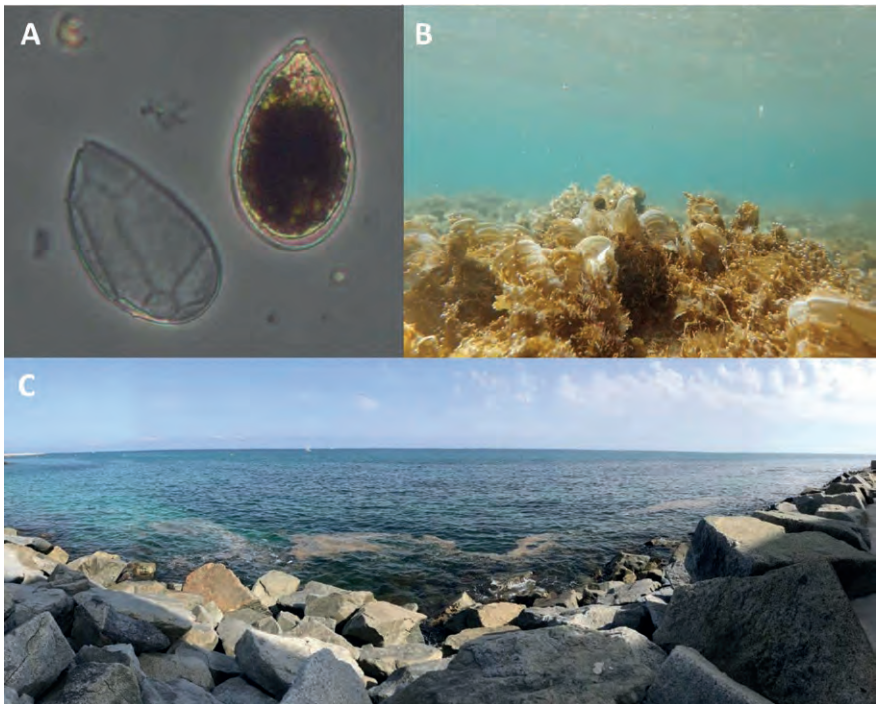


Figura 2. Proliferación de la dinoflagelada bentónica *Ostreopsis* cf. *ovata* (A) en la costa catalana en verano. Las células se adhieren a macroalgas del fondo marino (B) y también se desprenden en agregados que flotan en la superficie (C) y que presentan el tono rojizo de la peridinina, pigmento fotosintético de la microalga. Fotos: E. Berdalet, L. Viure y M. Vila.

superficial, el fitoplancton va creciendo y, por lo tanto, va consumiendo los nutrientes. Cuando escasean, proliferan células como los dinoflagelados con capacidad de migrar verticalmente, realizando la fotosíntesis en superficie y obteniendo los nutrientes de capas más profundas cercanas a la picnoclina. El fitoplancton puede acumularse en la picnoclina, y si llegan suficiente luz desde la superficie y los necesarios nutrientes desde las capas profundas (por difusión o mezcla a pequeña escala), se producirá «el máximo profundo de clorofila» (MPC). La profundidad del MPC varía según la zona del océano y la dinámica de estratificación y de mezcla vertical, y en verano es altamente productivo. En paralelo, la materia orgánica generada en los diferentes niveles tróficos irá sedimentando hacia capas profundas y las bacterias la remineralizarán, es decir, la consumirán y transformarán en moléculas orgánicas y sobre todo en sales inorgánicas. Las tormentas de otoño retornarán los nutrientes a la superficie y se repetirá el ciclo estacional. También en las costas occidentales de los continentes se producen afloramientos de agua profunda rica en nutrientes que favorecen la producción fitoplanctónica y con ella la riqueza del ecosistema marino que sustenta grandes caladeros de pesca.

Proliferaciones algales nocivas (PANs)

Hasta aquí se han descrito los aspectos positivos de la proliferación de organismos fotosintéticos. Pero en determinadas circunstancias ciertas especies de micro- o macroalgas crecen con tasas relativamente elevadas que conllevan efectos negativos en las personas y el medio ambiente: se conocen como proliferaciones algales nocivas (PANs). De entre los varios miles de especies de microalgas descritas, unas trescientas están implicadas en fenómenos de PANs y unas cien producen toxinas. Las PANs están a menudo favorecidas por la combinación de una disponibilidad elevada de nutrientes –naturales o antropogénicos– y unas condiciones de bajo hidrodinamismo (agua relativamente en calma o con poca renovación). En estas situaciones, unas pocas especies alcanzan concentraciones en el agua por encima de un nivel considerado «normal» para cada organismo

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

concreto. Las PANs pueden producir cambios en el color del agua (Vila y Torán 2002), que toma el color del pigmento del organismo que prolifera (verde, azul, amarillo, marrón o rojo). En aguas salobres o dulces, proliferan frecuentemente cianobacterias, de color azul-verde. El término «mareas rojas», se ha utilizado tradicionalmente para referirse a las proliferaciones del grupo de los dinoflagelados. Las PANs son relativamente frecuentes en verano, principalmente en hábitats confinados, ricos en nutrientes, elevados tiempos de residencia del agua y, a menudo, con quistes en los sedimentos que constituyen un reservorio de células que potencialmente pueden germinar y proliferar cuando las condiciones sean adecuadas.

Algunas de estas especies producen toxinas que se transmiten a través de las redes tróficas y contaminan alimentos (pescado, marisco) pudiendo causar intoxicaciones alimentarias (amnésica, diarreica, paralizante, ciguatera) en los humanos que los ingieren. Otras toxinas contaminan el agua de bebida (microcistinas), se transfieren en aerosoles (ovatoxinas, brevetoxinas) y producen irritaciones respiratorias, o afectan por contacto directo de la piel con el agua (en este caso el agente tóxico no está bien determinado). A menudo, el exceso de biomasa de las algas no puede ser consumido eficientemente por los componentes de las redes tróficas (microzooplancton, larvas de peces, pequeños crustáceos, etc.) y su degradación por parte de las bacterias disminuye los niveles de oxígeno del agua (imprescindible para que los organismos marinos puedan respirar), lo que conlleva un deterioro de la calidad del ecosistema en general.

Las PANs tienen costes económicos, incluyendo los de la atención médica de las personas afectadas y la inversión en el seguimiento y control de las microalgas tóxicas y de sus toxinas para prevenir sus impactos en la salud. Algunas microalgas (*Chattonella antiqua*, *Fibrocapsa japonica*, *Chrysochromulina* spp., *Cochlodinium* spp., *Karlodinium* spp.) matan específicamente peces en hábitats naturales o en zonas de acuicultura. En áreas de producción de marisco, la prohibición de extracción y venta del producto debido a la presencia de algas potencialmente tóxicas (por ejemplo, *Dinophysis acuta*, *Alexandrium minutum*, *Gymnodinium catenatum)* comportan grandes pérdidas económicas. También se ve afectado el turismo, sobre todo debido a la descomposición de las algas muertas que disminuyen la calidad del agua de la playa y provocan problemas de salubridad. En este sentido, la acumulación masiva de la macroalga *Sargassum* en las playas del Caribe y costa oeste de África constituye, desde hace unos diez años, un caso emergente de PANs.

La problemática de las PANs ha ganado protagonismo en los últimos cuarenta años en todo el mundo. La presión antrópica en las costas y los océanos (destrucción de hábitats y pérdida de biodiversidad, eutrofización, urbanización), y el calentamiento global, estarían favoreciendo un aumento de las PANs en ciertas zonas (Vila *et al.* 2021). La protección y utilización sostenible del medio ambiente es fundamental para reducir esta tendencia y garantizar un océano saludable y resiliente.

Referencias

Alcaraz M., Estrada M. 2022. Turbulencia y dinámica del plancton en un océano más cálido. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 139-141.

Berdalet E. 2020. Colors d'aigua, colors d'algues. En: Sala M.M., Peters F. (eds), Treballs de la Societat Catalana de Biologia 70: 18-26.

Estrada M. 1999. Hidrodinàmica i fitoplàncton en el mar Català. Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, 96, 158: 187-247.

Estrada M., Alcaraz M., Arin L. 2022. Controles de la dinámica del fitoplancton en el mar Catalán. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 99-101.

Segura-Noguera M., Berdalet E., Fortuño J.M. 2022. El fitoplancton y los elementos de la vida. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 145-147.

Vila M., Balagué V. 2022. La vida en los océanos: de la magia de las estrellas al conocimiento científico del plancton. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 47-49.

Vila M., Torán R. 2002. Cuando el mar cambia su color. Investigación y Ciencia 305: 40-41.

Vila M., Camp J., Berdalet E. 2021. Toxic microalgae and global change: Why have proliferations increased along the Mediterranean coast? Mètode Science Studies Journal 11: 40-56. University of Valencia.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14063

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.7. Simbiosis: una fuente de innovación para sobrevivir a un océano desafiante

Francisco M. Cornejo-Castillo, Lucía Pita

El océano, a simple vista, podría parecer una gran sopa homogénea hecha de agua salada donde la tranquilidad, la armonía y la paz han reinado desde los inicios de la vida, pero nada más lejos de la realidad. El océano es un ambiente lleno de desafíos constantes donde sus habitantes, los visibles y los microscópicos, se enfrentan al reto de sobrevivir y prosperar. En este reto diario, la cooperación entre diferentes especies por medio de relaciones simbióticas, por ejemplo, da lugar a nuevas estrategias para triunfar en sistemas tan dinámicos como los que representan los ambientes marinos. En este ensayo explicaremos la importancia de mantener una relación respetuosa con los océanos e ilustraremos con algunos ejemplos lo que estas relaciones simbióticas marinas nos pueden enseñar sobre el pasado, presente y futuro de los océanos.

Simbiosis marinas: logros a lo largo de la historia de la vida en la Tierra

Una de las mayores revoluciones en biología fue postulada por Lynn Margulis (1938-2011), la que conocemos como Teoría de la Endosimbiosis. Esta teoría propone que los orgánulos (p. ej. cloroplastos y mitocondrias) que existen dentro de las células eucarióticas (células con un núcleo verdadero como por ejemplo las células animales o vegetales) surgieron de la integración de una célula bacteriana dentro de otra. Esto permitió generar nuevos compartimentos dentro de las células que albergan funciones tan fundamentales como, sin ir más lejos, la respiración o la fotosíntesis. Aunque los procesos que permitieron dicha integración celular son tremendamente difíciles de estudiar ya que ocurrieron hace millones de años, el resultado es obvio: la generación de formas de vida más complejas, incluyendo a organismos pluricelulares como por ejemplo las plantas y animales que conocemos hoy día. Todos estos organismos, seres humanos incluidos, viven y evolucionan estableciendo alianzas con microorganismos, en algunos casos incluso delegando en ellos funciones clave para la supervivencia, como las relacionadas con la nutrición o la defensa.

El amplio espectro de interacciones simbióticas que podemos encontrar en el océano, desde aquellas obligatorias hasta las facultativas, nos muestra una variedad incontable de innovaciones biológicas (figura 1). Entre las diferentes simbiosis que actualmente existen entre especies unicelulares, es decir, entre especies cuyo cuerpo completo está formado por una sola célula, existe un caso muy interesante constituido por un alga microscópica del grupo de los cocolitofóridos *(Braarudosphaera bigelowii)* y una cianobacteria conocida como UCYN-A, una cianobacteria que tiene la capacidad de fijar nitrógeno (es decir, que puede transformar nitrógeno atmosférico (N_2) en formas de nitrógeno más accesibles para el plancton) (figura 1A) (Foster y Zehr 2019). El descubrimiento de UCYN-A desveló que esta cianobacteria alberga características típicas de los orgánulos, así como por ejemplo un tamaño de genoma muy reducido comparado con el tamaño de las especies parientes más cercanas pero, sobre todo, la pérdida de funciones típicas de las cianobacterias como la capacidad de hacer fotosíntesis. El gran paralelismo existente entre la simbiosis de la cianobacteria UCYN-A y su alga hospedadora con la en-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

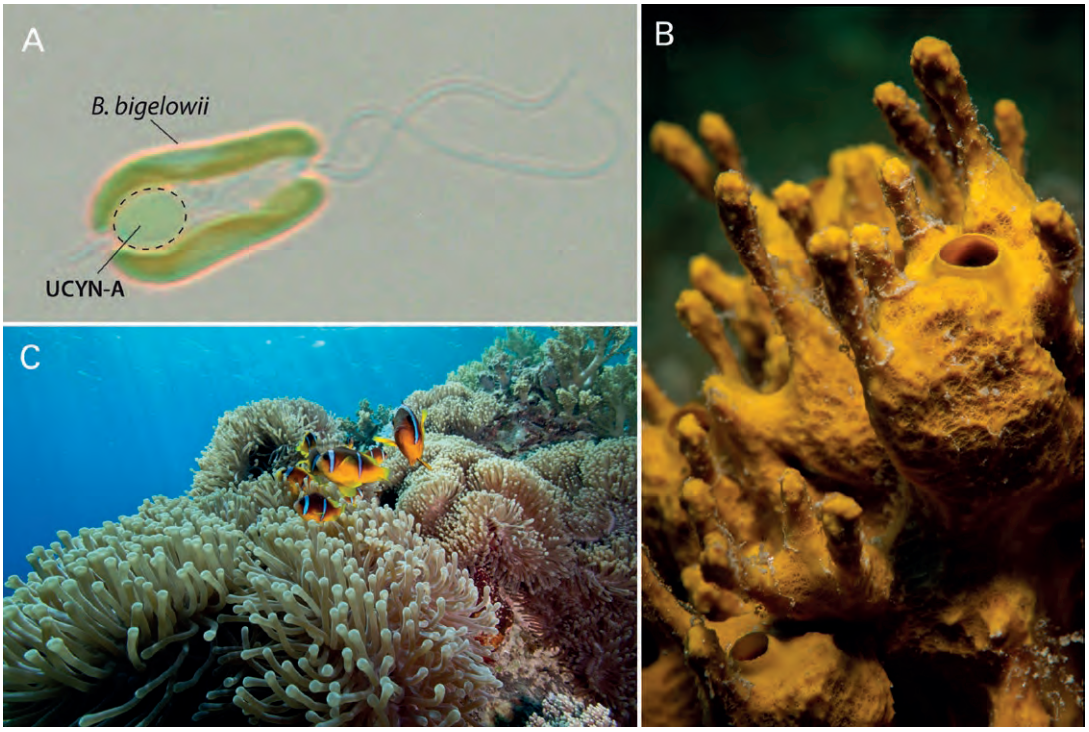


Figura 1. Ejemplos de simbiosis marinas. A, simbiosis entre la cianobacteria fijadora de nitrógeno UCYN-A y *B. bigelowii* (magnificación de la imagen: 1000×) (foto: Esther Wing Kwan Mak). B, esponjas, una factoría microbiana única. (foto: Jordi Regàs https://www.cibsub.cat/guia.php). C, simbiosis que forman las barreras de coral (foto: annaroik.org).

dosimbiosis que originó los orgánulos nos ofrece una 'ventana al pasado' para mirar a través de ella y comprender mejor las etapas tempranas de los procesos evolutivos que experimentaron los cloroplastos de las plantas y algas actuales.

Tomemos como otro ejemplo a uno de los grupos de animales más antiguos que aún existen: las esponjas (figura 1B). Las esponjas marinas aparecieron en nuestro planeta hace seiscientos millones de años (unos trescientos millones de años antes de que los primeros árboles aparecieran) y, con la ayuda de sus microbios, han conquistado casi todos los hábitats acuáticos. Al igual que en el intestino humano, la microbiota de la esponja proporciona nutrientes y defensa a su hospedador (Pita *et al.* 2018). Algunos de estos microbios producen compuestos especiales con aplicaciones biotecnológicas como, por ejemplo, ciertos fármacos antitumorales. Además, ¡las esponjas albergan bacterias y virus que no se encuentran en ningún otro lugar! Por lo que, perder una sola especie de estas esponjas implicaría perder una factoría microbiana única. Debido a su antiguo origen, las simbiosis entre esponjas y microbios nos ilustran sobre la interacción de los animales con el mundo microbiano. Desde las esponjas hasta los humanos, descifrar este diálogo animal-microbio es clave para comprender la salud animal.

La importancia ecológica de las simbiosis marinas, un estilo de vida para sobrevivir en un océano desafiante

En el océano encontramos ecosistemas impulsados por simbiosis microbianas ya que la actividad de estos simbiontes traspasa las paredes de sus respectivos hospedadores y se proyecta a nivel de ecosistema. Por ejemplo, las transformaciones de materia y energía ocasionadas por parte de los microbios que afectan a los ciclos biogeoquímicos globales (McFall-Ngai *et al.* 2013, Pita *et al.* 2018).

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para la productividad primaria, pero es escaso en muchas regiones del océano. En estas regio-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

nes, la fijación biológica de N_2 ejerce un papel fundamental sobre los productores primarios ya que proporciona una fracción importante del nitrógeno que estos productores necesitan. Sin embargo, la fijación de N_2 la realizan exclusivamente solo algunas especies bacterianas. Algunas especies marinas (principalmente fitoplancton), al asociarse de manera simbiótica con bacterias fijadoras de N_2, han encontrado una manera de prosperar en estos ambientes empobrecidos en nitrógeno. Por ejemplo, sabemos que la cianobacteria UCYN-A, fijadora de N_2, comenzó su relación simbiótica con el alga *B. bigelowii* durante el Cretácico tardío, hace alrededor de unos 100 millones de años (Cornejo-Castillo *et al.* 2016). Esto es interesante porque coincide con que hace entre 190 y 100 millones de años, la disponibilidad de nutrientes en el océano fue menor que en cualquier otro momento durante los últimos 550 millones de años. Así que es probable que esta peculiar simbiosis entre UCYN-A y *B. bigelowii* se originase como una estrategia de supervivencia para hacer frente a condiciones de nutrientes extremadamente bajas en las aguas superficiales del océano.

En el fondo marino (bentos), las esponjas filtran cientos de litros de agua al día, toman los nutrientes que necesitan y liberan sus productos de desecho en el agua. La actividad de sus microbios determina el tipo de transformaciones que experimentan los nutrientes y que, junto a la enorme capacidad de bombeo de la esponja, confiere a las esponjas un papel fundamental en el ciclado de elementos.

En las fumarolas hidrotermales, fisuras en el fondo del océano que descargan agua geotermal caliente y tóxica, los microbios detoxifican las sustancias nocivas y proporcionan energía y nutrientes a diversos animales como gusanos, mejillones y camarones. Gracias a estas simbiosis, comunidades altamente diversas y productivas afloran en estos entornos extremos.

Finalmente, en aguas marinas pobres en nutrientes, otros simbiontes de microalgas fotosintéticas (los dinoflagelados) proporcionan a los corales el carbono que necesitan para construir el esqueleto que compone el arrecife de coral, hogar de múltiples especies marinas. Los arrecifes de coral (figura 1C) son puntos críticos de biodiversidad y millones de humanos dependen de ellos.

Así que, en tiempos de adversidad, ¡búscate un socio microbiano!

Las simbiosis tienen beneficios y costes, pero la evolución encuentra el equilibrio que promueve el éxito de las especies que interactúan. En la actualidad, las actividades humanas están modificando la naturaleza a un ritmo rápido sin precedentes, poniendo en riesgo ese equilibrio. En el océano, el calentamiento global, la contaminación y la eutrofización están acabando con poblaciones enteras de especies marinas. Los cambios rápidos en el medio ambiente afectan las interacciones entre los microbios y sus hospedadores y pueden contribuir a la susceptibilidad a enfermedades, tanto en organismos marinos como en humanos. En los ejemplos presentados en este ensayo, hemos mostrado cómo los organismos marinos en simbiosis con sus microbios han logrado responder y adaptarse al medio ambiente que les rodea. La vida marina nos ofrece un viaje hacia nuestro pasado evolutivo y nos cuenta historias de éxito que se basaron en fortalecer la cooperación entre especies, hecho crucial para afrontar los desafíos actuales y futuros a los que nos enfrentamos como sociedad.

Referencias

Cornejo-Castillo F.M., Cabello A.M., Salazar G., *et al.* 2016. Cyanobacterial symbionts diverged in the late Cretaceous towards lineage-specific nitrogen fixation factories in single-celled phytoplankton. Nature Commun. 7: 11071.

Foster R.A., Zehr J.P. 2019. Diversity, Genomics, and Distribution of Phytoplankton-Cyanobacterium Single-Cell Symbiotic Associations. Annu. Rev. Microbiol. 73: 435-456.

McFall-Ngai M., Hadfield M.G., Bosch T.C.G., *et al.* 2013. Animals in a bacterial world, a new imperative for the life sciences. PNAS 110: 3229-3236.

Pita L., Rix L., Slaby B.M., *et al.* 2018. The sponge holobiont in a changing ocean: from microbes to ecosystems. Microbiome 6: 46.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14064

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.8. Los peces en un escenario de cambio global: la importancia de los primeros estadios del ciclo vital para la conservación de las poblaciones naturales

Ana Sabatés, M. Pilar Olivar, Vanessa Raya, Joan Mir-Arguimbau, Ainhoa Bernal

Las primeras etapas del ciclo vital de los peces comprenden el periodo desde la puesta hasta el reclutamiento a la población adulta (figura 1). La supervivencia de estos estadios tempranos del desarrollo, los huevos y las larvas, determina las variaciones, a corto y largo plazo, en la abundancia de sus poblaciones. La mayoría de peces marinos producen entre miles y millones de huevos pelágicos que en pocos días eclosionan dando lugar a larvas que pasan desde semanas a unos pocos meses en la comunidad planctónica. Las larvas de peces se caracterizan por su pequeño tamaño (entre pocos mm y unos 2 cm), su transparencia, una limitada capacidad natatoria, y una morfología, en ocasiones sorprendente, que difiere notablemente de la de los adultos (figura 2). Durante el periodo planctónico, las larvas interactúan con otros organismos del plancton, siendo tanto depredadores como presas (figura 1). Las larvas de peces se alimentan de organismos de pequeño tamaño, como estadios juveniles de copépodos (pequeños crustáceos), y, a su vez, son presa de otras especies más grandes que viven también en el medio pelágico, como las medusas. La mortalidad de los huevos y larvas de peces durante su vida planctónica es extremadamente elevada y solo unos pocos individuos, de los miles de larvas nacidas, sobreviven a la falta de alimento o a la depredación (Houde 2009). Los factores físicos, como corrientes, frentes o remolinos, que determinan la dispersión o la concentración de las larvas, juegan también un papel importante en la supervivencia larvaria (Catalán *et al.* 2006). De esta manera, la interacción entre el entorno físico y la biología larvaria controla las variaciones interanuales del reclutamiento de los peces y, en última instancia, determina la persistencia de las poblaciones adultas.

Estrategias reproductoras de los peces

Los peces han desarrollado una amplia variedad de estrategias reproductoras adaptadas a las características específicas de los distintos hábitats

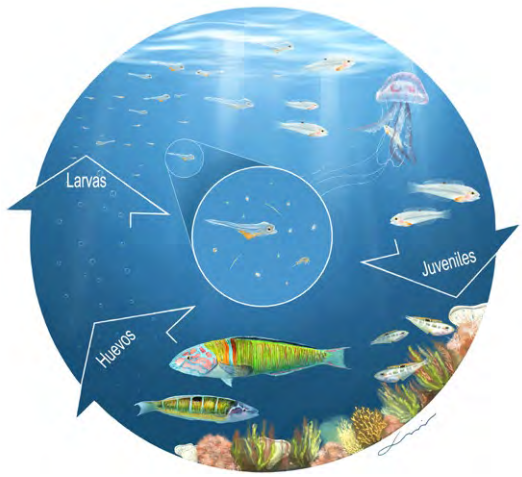


Figura 1. Representación esquemática del ciclo de vida del pez verde, familia Labridae.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. Larva de pez de aleta espinosa de la familia Diretmidae (izquierda), larva de pez mesopelágico de la familia Scopelarchidae (centro) y larva de pez plano de la familia Bothidae (derecha).

a fin de que la liberación de sus huevos y larvas tenga lugar en entornos adecuados que garanticen el éxito de su alimentación, crecimiento y supervivencia, así como la conectividad de la población (Sabatés *et al.* 2007). La temperatura, junto con el fotoperiodo (duración diaria de horas de luz), son los principales factores ambientales que controlan el período reproductor. Aunque la mayor parte de especies tienen períodos reproductores relativamente fijos, existe cierto grado de flexibilidad en respuesta a cambios interanuales de temperatura. Esta flexibilidad permitiría que en un entorno ambiental alterado, por ejemplo con poblaciones de zooplancton en estadios de desarrollo más avanzados a los habituales (debido a temperaturas más elevadas), los peces podrían adaptar el momento de la puesta para garantizar la coincidencia entre las larvas y sus presas habituales. Los peces son particularmente sensibles a cambios fenológicos en el plancton (tipo y tamaño de los organismos) inducidos por el clima, ya que el éxito del reclutamiento depende, en gran medida, de la sincronización de la fase larvaria con los pulsos estacionales de producción fitoplanctónica. Cambios en el entorno físico y biológico pueden, por tanto, alterar la sincronización temporal entre la puesta y las condiciones óptimas para el desarrollo de los huevos y la alimentación y crecimiento de las larvas, así como su transporte o retención en zonas favorables para su desarrollo.

Impacto del cambio climático en las primeras etapas de vida de los peces

Si bien el impacto del cambio climático sobre las primeras etapas de vida de los peces no es todavía bien conocido, éste podría preverse a partir de lo que conocemos sobre la biología de estas etapas. Aunque a partir del aumento de temperatura observado actualmente no cabe esperar efectos letales directos, lo más probable es que se produzcan efectos indirectos a través de cambios en la adecuación del hábitat y en el aporte de alimento. Se prevé que el incremento de temperatura del océano afecte a la composición y tamaño de los organismos del plancton, modificando, de esta manera, la disponibilidad de presas adecuadas para las larvas de peces. La mayor estratificación de la columna de agua reducirá la disponibilidad de nutrientes a las capas superficiales, limitando la producción primaria y la abundancia de zooplancton, con la consiguiente disminución de la condición nutricional de las larvas. Además, el aumento de temperatura comportará un incremento de la tasa de crecimiento larvario y, en consecuencia, una menor duración del período planctónico, lo que puede dar lugar a cambios en los patrones de conectividad entre las zonas de puesta y reclutamiento. En cualquier caso, la información acerca de la importancia relativa del calentamiento de los océanos y su interacción con cambios en el aporte de alimento en la supervivencia de las larvas de peces es muy limitada.

Además del cambio climático, la pesca constituye, probablemente, el impacto antropogénico más importante sobre los peces. Su efecto en las primeras etapas del ciclo de vida es el resultado de cambios demográficos en la población adulta. El número y la calidad de los huevos dependen de la edad o tamaño de los reproductores, ya que los peces de mayor edad o tamaño producen muchos más huevos y desovan antes que los peces más pequeños. Elevadas tasas de explotación pesquera

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

dan lugar a importantes cambios demográficos, con menos peces de mayor edad y una elevada abundancia de juveniles con bajo potencial reproductor. Estos cambios en la estructura demográfica contribuirían a reducir el potencial reproductor de las poblaciones de peces y a alterar la fenología (tiempo y duración) del período de puesta.

Estudios sobre los primeros estadios de desarrollo de los peces en el Mediterráneo noroccidental

Los estudios sobre los primeros estadios de desarrollo de los peces han sido reconocidos como una parte importante de la investigación llevada a cabo en el ICM desde los años setenta. El Mediterráneo, nuestro ecosistema más próximo, ha recibido una especial atención. Se trata de uno de los mares más impactados del mundo, ya que el cambio climático actúa en sinergia con muchos otros factores antropogénicos como la sobreexplotación pesquera, la contaminación, las invasiones biológicas y la pérdida de hábitats, que a menudo se solapan en el espacio y el tiempo y su efecto puede ser acumulativo. Además, se han descrito cambios a largo plazo en las condiciones hidrodinámicas o meteorológicas, con incrementos de temperatura del aire y el agua, mayor estratificación de la columna de agua y durante periodos más prolongados, disminución de la intensidad del viento y una progresiva acidificación. En la cuenca occidental del Mediterráneo, se ha documentado también un descenso de las descargas de los ríos, en particular del Ródano y del Ebro, y una disminución en las concentraciones de clorofila-*a*. Todas estas tendencias ambientales apuntan a una oligotrofización de la región y sugieren que el hábitat de puesta de las especies pelágicas, como la anchoa, claramente dependientes de las aguas de origen continental, podrían estar en peligro en las próximas décadas (Palomera *et al.* 2007). El incremento de temperatura pronosticado, la disminución en la intensidad del viento y de las precipitaciones, y la consecuente mayor estratificación de la columna de agua se ha observado que pueden modificar la composición y fenología de las comunidades planctónicas y favorecer el aumento de las poblaciones de medusas. Las proliferaciones de medusas pueden afectar negativamente a los peces ya sea por su competencia por el alimento o directamente a través de la depredación de los huevos y larvas (Tilves *et al.* 2016). Un paso esencial, pues, para predecir y proyectar cambios futuros, y por tanto para adaptarse a ellos, es la comprensión de los mecanismos que relacionan los cambios ambientales con la extensión espacial y temporal de los hábitats favorables para la puesta.

Propuestas de futuro

En un contexto de cambio global, la investigación sobre los primeros estadios del ciclo vital de los peces debería enfocarse en las consecuencias del forzamiento climático y la explotación pesquera en la supervivencia de los huevos y larvas. Su efecto está todavía lejos de ser elucidado, teniendo en cuenta las dificultades del estudio del hábitat planctónico y los requerimientos fisiológicos en estos estadios iniciales. Para evaluar el impacto del cambio climático y de los cambios en el ecosistema en la conservación de las poblaciones de peces es esencial un profundo conocimiento de la ecología larvaria, así como de las distribuciones de las especies y de sus áreas y épocas de puesta. Este conocimiento será crítico para la futura gestión pesquera.

Referencias

Catalán I., Olivar M.P., Palomera I., Berdalet E. 2006. Link between environmental anomalies, growth and condition of pilchard *Sardina pilchardus* larvae in the North Western Mediterranean. Mar. Ecol. Prog. Ser. 307: 219-231.

Houde E.D. 2009. Recruitment variability. In: Jakobsen, T., Fogarty, M.J., *et al.* (eds), Fish reproductive biology: implications for assessment and management, Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 91-171.

Palomera I., Olivar M.P., Salat J., *et al.* 2007. Small pelagic fish in the NW Mediterranean Sea: An Ecological Review. Prog. Oceanogr. 73: 377-396

Sabatés A., Olivar M.P., Salat J., *et al.* 2007. Physical and biological processes controlling the distribution of fish larvae in the NW Mediterranean. Prog. Oceanogr. 74: 355-376.

Tilves U., Fuentes V.L., Purcell J.E., *et al.* 2016. Natural diet and predation impacts of *Pelagia noctiluca* on fish eggs and larvae in the NW Mediterranean. J. Plank. Res. 38: 1243-1254.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14065

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.9. Carismáticos, amenazados y desconocidos: los depredadores marinos en el Antropoceno

Joan Giménez, Francisco Ramírez, Marta Coll, Joan Navarro

Los depredadores marinos, como los mamíferos marinos, las aves marinas y los grandes peces depredadores, como los tiburones, los atunes o los peces espada, son considerados especies carismáticas con las que el ser humano acostumbra a empatizar. Han inspirado multitud de documentales y películas, así como numerosos libros para niños y charlas de divulgación para adultos. También atraen a millones de personas para su observación en libertad en diferentes lugares del mundo y, algunos de ellos, se consideran especies importantes para las pesquerías locales y globales, así como recursos importantes para algunas culturas. Por desgracia, la abundancia de muchos depredadores marinos está disminuyendo e incluso algunos de ellos están amenazados o han desaparecido de zonas donde previamente residían. En general, su mal estado de conservación y la escasa viabilidad de sus poblaciones, durante la llamada era del Antropoceno, están directa o indirectamente ligados a diferentes impactos humanos, como son la explotación directa o la mortalidad debida a la captura accidental en pesquerías, el impacto del cambio climático, la reducción de su alimento y la degradación de los hábitats marinos donde están presentes.

Especies útiles para la conservación

Los depredadores marinos se han utilizado tradicionalmente para contribuir a mejorar el estado de conservación del medio marino ya que muchos de ellos pueden ser especies emblemáticas, clave en los ecosistemas, paraguas e indicadoras (figura 1). En general, su protección puede ayudar a la conservación de toda la comunidad de la que dependen. Invertir en su conservación puede ser relevante ya que se les puede utilizar como centinelas del estado del medio marino en el que habitan. Pueden actuar como organismos que alertan de manera temprana del deterioro de la salud ambiental marina,

Figura 1. La importancia de los depredadores marinos. Fotografías cedidas por Joan Giménez [pingüino barbijo *(Pygoscelis antarcticus)*, foca leopardo *(Hydrurga leptonyx)*] y por CIRCE (Conservación, Información y Estudio de Cetáceos; delfín común *(Delphinus delphis)*, orca *(Orcinus orca)*, alcatraz atlántico *(Morus bassanus)*, y pardela cenicienta *(Calonectris borealis)*.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

ayudando a monitorizar los cambios de todo el ecosistema del que dependen, como por ejemplo la presencia de contaminantes. Además, pueden ser buenos indicadores de otros componentes clave del ecosistema e informar, por ejemplo, de la abundancia y la salud de los recursos pesqueros de los que dependen y comparten con las pesquerías. De hecho, los descensos poblacionales de estos depredadores marinos han sido típicamente presagio de colapsos pesqueros (Velarde *et al.* 2019).

Lagunas de conocimiento

A pesar de los innegables avances en la comprensión de la biología y ecología de estos organismos, muchos de ellos son aún grandes desconocidos. Por ejemplo, los estudios dirigidos a analizar los cambios en su abundancia, distribución, ecología trófica o movimiento son escasos. Esto se debe principalmente a que su estudio presenta dificultades metodológicas y logísticas, ya que la mayor parte de los depredadores marinos son animales muy móviles, que pasan la mayor parte de su tiempo alejados de la superficie y, con frecuencia, utilizan aguas oceánicas alejadas de la costa. La conservación de los depredadores marinos y su utilidad como especies centinela precisa de una comprensión más profunda sobre aspectos básicos de su biología, ecología, fisiología, comportamiento y distribución a lo largo del ciclo anual, así como sobre las múltiples amenazas y desafíos a los que se enfrentan (figura 2). Para ello se requieren necesariamente iniciativas de investigación, tanto locales como transnacionales, junto con enfoques novedosos e interdisciplinares.

Por ejemplo, en la actualidad es posible realizar estudios integrados, con enfoques que van desde los análisis de biomarcadores intrínsecos (por ejemplo, análisis de isótopos estables en los tejidos de los individuos) hasta el seguimiento de los movimientos de los individuos mediante métodos de telemetría, acústicos o visuales, que proporcionan una comprensión más holística respecto al papel que juegan los factores ambientales y humanos en la distribución de estas especies (Navarro *et al.* 2016). Esta información también es crucial para entender cómo estos organismos marinos de larga vida responden a

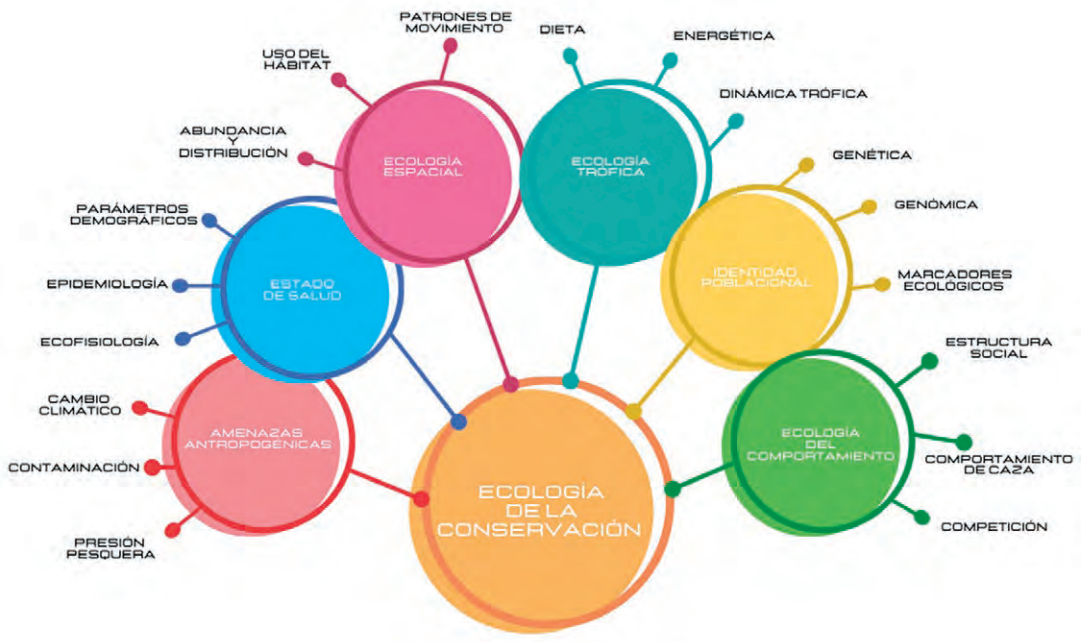


Figura 2. Una comprensión precisa de diferentes subcampos científicos nos informa sobre las estrategias de conservación más adecuadas para preservar y recuperar las poblaciones de depredadores marinos en el Antropoceno.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

los cambios ambientales y a otros factores de estrés provocados por la actividad humana. La integración de toda esta información ecológica y biológica en modelos ecosistémicos, que tienen en cuenta la dimensión espacial y temporal, así como las interacciones tróficas entre los múltiples componentes de las redes tróficas marinas, permite identificar el papel ecológico de estos depredadores en el ecosistema marino (Coll *et al.* 2013), así como evaluar el efecto del establecimiento de áreas marinas protegidas (AMPs) para salvaguardar estas especies de la extinción y alcanzar unos objetivos de conservación adecuados (Giménez *et al.* 2020).

Para conservar la vida marina, deben aplicarse estrategias de conservación robustas y basadas en el conocimiento científico (Duarte *et al.* 2020). Por ejemplo, el establecimiento de AMPs para salvaguardar y restaurar la abundancia de los grandes depredadores marinos puede promover la recuperación de los ecosistemas marinos, restaurando potencialmente la biodiversidad y el funcionamiento ecológico. Sin embargo cabe destacar que los enfoques basados en AMPs deben combinarse con otros enfoques dirigidos a gestionar las amenazas (por ejemplo, la mejora de la selectividad pesquera, la mitigación del ruido oceánico) que permitan la correcta gestión de los impactos humanos para alcanzar niveles satisfactorios que garanticen su conservación. Esto implica el desarrollo de análisis y herramientas espaciales para entender y gestionar el ecosistema marino en toda su complejidad.

Referencias

Coll M., Navarro J., Palomera I. 2013. Ecological role, fishing impact, and management options for the recovery of a Mediterranean endemic skate by means of food web models. Biol. Conserv. 157: 108-120.

Duarte C.M., Agusti S., Barbier E., *et al.* 2020. Rebuilding marine life. Nature 580: 39-51.

Giménez J., Cardador L., Mazor T., *et al.* 2020. Marine protected areas for demersal elasmobranchs in highly exploited Mediterranean ecosystems. Mar. Environ. Res. 160: 105033.

Navarro J., Cardador L., Fernández Á.M., *et al.* 2016. Differences in the relative roles of environment, prey availability and human activity in the spatial distribution of two marine mesopredators living in highly exploited ecosystems. J. Biogeogr. 43: 440-450.

Velarde E., Anderson D.W., Ezcurra E. 2019. Seabird clues to ecosystem health. Science 365: 116-117.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14066

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.10. Integridad ecológica de los fondos marinos: conciliar conservación y explotación

Montserrat Demestre, Silvia de Juan, Alfredo Garcia-de-Vinuesa

La pesca es una herramienta que el hombre ha utilizado desde hace milenios para extraer alimento del mar. La actividad pesquera, poco a poco, ha perfeccionado los métodos de extracción de los organismos marinos adaptando los artes de pesca a la biología y al comportamiento de las especies objetivo. Las especies que viven en estrecha relación con el fondo del mar, las denominadas especies bentónicas y demersales, son pescadas con artes que trabajan conectadas con el fondo marino. Algunos de estos artes como el arte de arrastre, son muy poco selectivos y pueden capturar todo lo que encuentran a su paso por el fondo marino. Otros artes como el trasmallo o el palangre no afectan directamente a los fondos. Esta pesca continua e intensa sobre los fondos es uno de los efectos más perjudiciales para los ecosistemas bentónicos, ocasionando una degradación progresiva y frecuentemente irreversible de su integridad, o dicho de otro modo, de su buen estado ambiental (de Juan *et al.* 2009). La capacidad de los ecosistemas de proveer beneficios depende estrechamente de su integridad.

Las capturas accidentales de la pesca: la supervivencia del descarte

El arrastre, al no ser selectivo, pesca especies comerciales (merluza, rape, cigala, gamba) a la vez que también captura especies que no se comercializan, lo que se define como captura accidental o no deseada (figura 1). La gran mayoría de esta captura accidental se devuelve al mar viva o muerta y es lo que se conoce como descarte. Una parte del descarte pueden ser especies comerciales de talla pequeña, no legal, y que por tanto no se pueden vender (Garcia-de-Vinuesa *et al.* 2018). La mortalidad del descarte es otro efecto directo de la pesca a tener en cuenta. Los estudios nos muestran que la supervivencia de los peces descartados es muy baja, mientras que los invertebrados, al ser un grupo muy heterogéneo con estructuras externas resistentes (crustáceos y gasterópodos) y formas de vida que los aíslan o regeneran (bivalvos, poliquetos, estrellas de mar), pueden tener niveles de supervivencia mucho más elevados (Demestre *et al.* 2018).

Para avanzar en el equilibrio entre conservación y explotación se han diseñado artes de pesca de arrastre experimentales, con mallas de diferentes tamaños o con unas rejas intercaladas en la red con el objetivo de que toda la captura accidental pueda escaparse y no quede retenida en la red, disminuyendo así significativamente

Figura 1. Imagen de la captura de una pesca de arrastre sobre un fondo de crinoideos donde se ve una gran cantidad de *Leptometra phalangium*, una especie no deseada. Caladero de pesca cercano a la costa de Blanes frecuentada por las barcas de arrastre. Campaña Pesquera CRIMA (RTI2018-095770-B-E00).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

el descarte. Evitando estas capturas se aumenta a medio y largo plazo la biomasa de los recursos en el mar en beneficio tanto de la conservación de las propias especies como para la economía de los pescadores.

La pesca de arrastre también tiene efectos negativos indirectos, desconocidos y muchas veces ignorados, sobre los fondos marinos y sus comunidades. Estos efectos causan una disminución de la diversidad, provocan degradación y homogenización de los hábitats y un cambio en las comunidades con una dominancia de los organismos menos vulnerables a esta perturbación (de Juan y Demestre 2012). Es muy necesario conocer los límites de resiliencia de las comunidades bentónicas y no sobrepasarlos para llegar a modificaciones irreversibles con un cambio en la funcionalidad del ecosistema, muy relacionado con la capacidad de proveer bienes y servicios a la sociedad, como son los recursos pesqueros. Para minimizar el impacto y contribuir a mantener la resiliencia del sistema a largo plazo, se proponen vedas espaciales y temporales, así como zonas cerradas a la pesca permanentemente y modificaciones de las artes para eliminar al máximo el contacto con el fondo marino (Demestre *et al.* 2008).

Hábitats bentónicos emblemáticos en peligro

Todas estas actuaciones son particularmente necesarias y urgentes en los fondos identificados como emblemáticos por su elevada diversidad y productividad, como es el caso de los fondos de maërl y los fondos de crinoideos. Estos fondos están muy presentes en las costas mediterráneas y son zonas donde hay una actividad de pesca regular.

El maërl son agregaciones de algas rojas que forman nódulos calcáreos con un papel muy importante en la naturaleza ya que su capacidad de retener carbono podría mitigar los efectos del cambio climático. Estas estructuras en nódulos definen unos hábitats tridimensionales donde viven y se refugian un gran número de especies. Los fondos de maërl se distribuyen principalmente entre los treinta y setenta metros de profundidad, en aguas costeras muy bien ilumi-

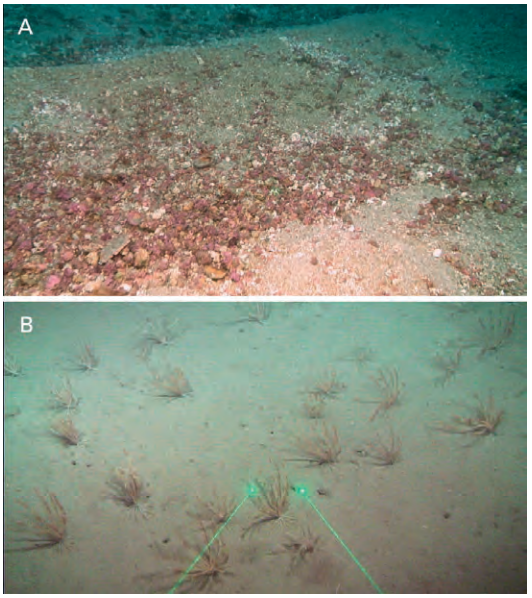


Figura 2. Imagen de un fondo: A, de maërl donde se ven las formaciones de rodolitos depositados a lo largo de los valles de las ripple-marks de corriente; B, de crinoideos *(Leptometra phalangium)* todos orientados hacia la corriente para capturar la materia orgánica en suspensión. Zona cercana a la costa de Blanes frecuentada por las barcas de arrastre. Campaña Oceanográfica CRIMA (RTI2018-095770-B-E00).

nadas (figura 2A). Tanto el propio hábitat como dos de las especies de algas rojas que lo configuran, *Lithothamnion corallioides* y *Phymatolithon calcareum*, se encuentran dentro de la Directiva de hábitats de protección de especies. Desgraciadamente, la pesca de arrastre puede impactar sobre estos fondos ya que solo está prohibida en fondos de menos de cincuenta metros.

Los fondos de crinoideos formados mayoritariamente por agrupaciones del equinodermo *Leptometra phalangium* se encuentran entre los cien y los ciento setenta metros de profundidad (figura 2B). En estos hábitats tiene lugar un fenómeno de mezcla de aguas con una elevada producción de fitoplancton en superficie. Esta materia orgánica producida en superficie cae por gravedad al fondo y es aprovechada por una gran cantidad de organismos, que son una fuente de alimento para muchos de los recursos pesqueros. Estos fondos tienen un papel muy importante en el ecosistema bentónico y la Comisión Europea los ha considerado hábitats sensibles y esenciales.

Hemos comprobado que la explotación pesquera puede afectar al buen estado ambiental

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

de los hábitats y fondos marinos, amenazando su resiliencia y su integridad ecológica. A pesar de todo ello, la situación actual muestra un desequilibrio entre explotación y conservación decantado hacia la explotación. Se debe conseguir invertir la tendencia y perfilar estrategias de gestión para equilibrar esta situación. Es de destacar que debido a las directrices marcadas por la Comisión Europea, en el año 2023 cada país debe demostrar un avance de un 30% en nuevos espacios marítimos protegidos. En este sentido, los fondos de maërl y de crinoideos son candidatos a tener en cuenta para esta planificación. El equilibrio entre mantener o eliminar la gran riqueza de bienes y servicios que nos ofrece el medio marino, y especialmente sus fondos, depende de cómo se quiera gestionar este ecosistema, superficialmente muy querido, pero en el fondo muy castigado.

Referencias

Demestre M., de Juan S., Sartor P., Ligas A. 2008. Seasonal closures as a measure of trawling effort control in two Mediterranean trawling grounds: Effects on epibenthic communities. Mar. Pol. Bull. 56: 1765-1773.

Demestre M., Sartor P., Garcia-de-Vinuesa A., *et al.* 2018. Ecological importance of survival of unwanted invertebrates discarded in different NW Mediterranean trawl fisheries. Sci. Mar. 82 Suppl. 1: 189-198.

de Juan S., Demestre M. 2012. A Trawl Disturbance Indicator to quantify large scale fishing impact on benthic ecosystems. Ecological Indicators 18:183-190.

de Juan S., Demestre M., Thrush S. 2009. Defining ecological indicators of trawling disturbance when everywhere that can be fished is fished: A Mediterranean case study. Mar. Pol. 33: 472-478.

Garcia-de-Vinuesa A., Sola I., Quattrocchi F., Maynou F., Demestre M. 2018. Linking together trawl fleet dynamics and the spatial distribution of exploited species can help to avoid unwanted catches: the case of the NW Mediterranean fishing grounds. Sci. Mar. 82 Suppl. 1: 165-174.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14067

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.11. Los colores cambiantes de la vida marina antártica

Enrique Isla, Julian Gutt

Ipsa scientia potestas est, o, el conocimiento en sí mismo es poder, publicó Sir Francis Bacon en su Meditationes Sacrae en 1597. Desde entonces, la humanidad ha adquirido un conocimiento, y poder, considerables; sin embargo, una de las consecuencias más evidentes de este proceso es el deterioro del ambiente y la vida en la Tierra. El estado actual de nuestro océano estimuló a las Naciones Unidas a lanzar su propuesta «Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030)» con el objetivo de producir siete resultados que describirán el «océano que queremos» al final de la década. Entre ellos, el segundo resultado «Un océano saludable y resiliente donde se entienden, protegen, restauran y gestionan los ecosistemas marinos» se basa precisamente en lo que Sir Francis Bacon, el padre del método científico, propuso; es decir, cuanta mejor información tengamos, más capacidad tendremos para controlar los eventos. Al menos, para predecirlos.

Dentro de este marco, la región antártica es particularmente importante porque, quizás, es la región menos conocida del planeta; sin embargo, sufre una presión antropogénica comparable a la de sus contrapartes en latitudes más bajas. Esta situación deja comparativamente menos tiempo para mejorar nuestro conocimiento sobre ella, antes que la transformación ambiental antropogénica en curso lleve sus coloridos ecosistemas marinos a puntos de inflexión. Actualmente, el cambio climático es quizás la amenaza humana más importante para los ecosistemas antárticos (Gutt *et al.* 2020).

La Antártida ha evolucionado en un cuasi-aislamiento térmico desde hace aproximadamente treinta millones de años, cuando la apertura del Paso de Tasmania permitió el establecimiento de la Corriente Circumpolar Antártica y las bajas temperaturas que regulan la vida en el océano Austral. Durante este período, la vida antártica ha prosperado en condiciones ambientales únicas, particularmente constantes cerca del lecho marino. Ahí, la oscuridad y una variación muy pequeña de temperatura y salinidad, han acompañado a la fauna bentónica hasta un estado de alto endemismo, abundancia y diversidad de especies y colores (figura 1), que depende del blanco, verde y azul predominantes en la superficie del mar.

De blanco a verde: superficie del océano

El hielo marino modula la vida en el océano Austral. El hielo marino antártico puede cubrir hasta veinte millones de kilómetros cuadrados durante el invierno y constituye uno de los biomas más grandes de la Tierra. Esta estructura helada y porosa, está atravesada por una red de canales de salmuera llenos de vida microscópica, capturada durante la formación del hielo marino en los meses fríos del año. Cuando llega la primavera y comienza el deshielo, la microbiota del hielo marino encuentra agua de mar rica en nutrientes, donde florece y convierte el blanco en verde, generando suficiente alimento para mantener toda la vida marina antártica.

De verde a multicolor: fondo marino

Las tormentas de viento antártico son típicas del verano y su acción sobre la superficie del mar estimula la producción biológica y la agregación de partículas, generando fuertes pulsos de materia orgánica hacia el fondo marino (Isla *et al.*

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

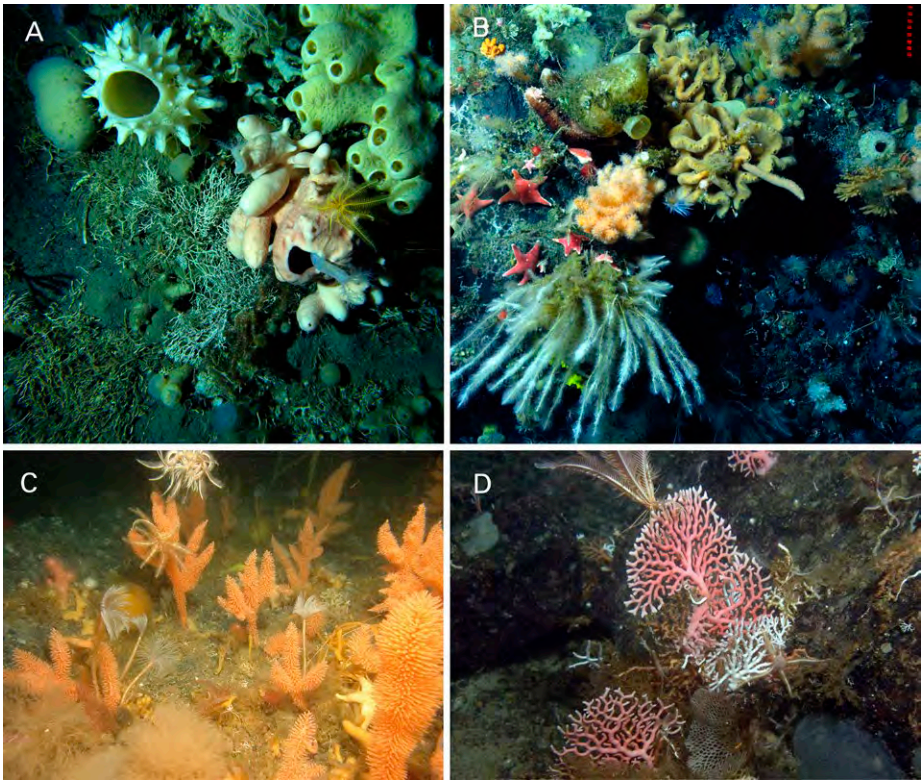


Figura 1. Las comunidades bentónicas del océano Austral son ricas en abundancia, biomasa, formas y especies. Entre estas hay esponjas, briozoos, holoturias (pepinos de mar) y comunidades de ascidias (A). También se conforman por ascidias solitarias, estrellas de mar, abanicos de mar y otras especies de corales blandos (B). El naranja puede ser el color dominante en comunidades de corales blandos como estas gorgonias (C) y el rosa de estos elegantes y delicados hidrocorales que pueden llegar a formar grandes comunidades (D). El área de la fotografía para las figuras A y B es aproximadamente 1.5 m^2 y para las figuras C y D, el fondo es de aproximadamente 0.4 m^2.

2009). Esta lluvia de verano de material orgánico cubre el lecho marino con una alfombra verde llena de energía, que alimentará la vida bentónica multicolor incluso durante los meses oscuros de invierno y también cubrirá los pocos lugares con sedimento marrón entre los animales bentónicos (figura 2). Sin embargo, hay umbrales, y si este exceso de energía estival disminuye, la vida bentónica puede morir de hambre.

Cambiando la paleta de colores

El calentamiento en la Península Antártica occidental desencadena varios procesos que modifican los patrones marinos de color. El derretimiento de los glaciares introduce nutrientes disueltos y partículas minerales a la columna de agua adyacente. Mientras que a primera vista el azul profundo puede volverse verde debido a florecimientos de algas alimentados con nutrientes derivados de los glaciares, eventualmente, la carga de sedimentos aumenta la turbidez y reduce las áreas verdes en beneficio de mosaicos azul turquesa y marrón (Gutt *et al.* 2020). Los organismos pelágicos inmersos en las nubes marrones colapsan por la obstrucción de su tracto digestivo, cambiando el color mineral oscuro de las playas por naranja brillante y rojo, derivado de las llegadas masivas de krill muerto llevado a tierra por el viento (Fuentes *et al.* 2016). El fondo marino multicolor también cambia. La carga de sedimento puede cubrir el lecho marino con un pesado manto pardusco que sofoca a la fauna bentónica, la cual se alimenta con la materia orgánica en suspensión. Se predice que estas comunidades multicolor eventualmente regresarán; sin embargo, a un ritmo aún desconocido (Gutt *et al.* 2020). Por el contrario, en el este del mar de Weddell, el aumento de la extensión de hielo marino resultó

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

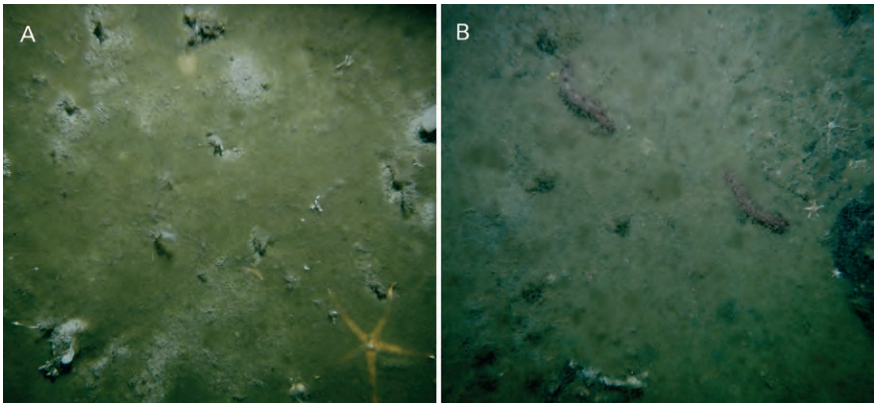


Figura 2. Estrella de mar (A) y holoturias (pepinos de mar) de puntos rojos (B), casi cubiertos completamente por una capa de material verde, depositado después de la convergencia entre un florecimiento de fitoplancton y una tormenta de viento. El área de la fotografía para las figuras A y B es aproximadamente 1.5 m^2.

en reducciones drásticas de producción primaria y biomasa de fauna bentónica. Hablando en colores, en la superficie del mar ha cambiado el verde por el blanco y el área multicolor ha decrecido en favor del marrón en el fondo del mar (Pineda-Metz *et al.* 2020). Allí, el calentamiento también contribuye a estos cambios de color. El ambiente frío que dio forma a las coloridas comunidades bentónicas, ahora se está calentando, a pesar de su ubicación en la plataforma continental a cientos de metros de profundidad. Las intrusiones de agua cálida desde el talud continental más profundo, exponen la vida a masas de agua que llevan la cálida señal antropogénica, con consecuencias letales para organismos que carecen de la capacidad evolutiva para responder a grandes variaciones térmicas (Isla y Gerdes 2019).

De negro a blanco

Todos los patrones y procesos descritos anteriormente representan solo unos pocos puntos luminosos en el universo, vasto y aún oscuro, de lo desconocido sobre los ecosistemas marinos antárticos. Los esfuerzos científicos en curso son prometedores. La cooperación internacional ha sido fundamental para las actividades de investigación y logística en la Antártida y ha dado como resultado avances sustanciales hacia una mejor comprensión del medio marino antártico y, dada su fuerte contribución a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos globales, del océano en general también. Sin embargo, el tiempo corre en contra de estos esfuerzos, el calentamiento global y la contaminación están transformando rápidamente el ambiente, antes que se comprendan completamente muchos procesos bióticos y abióticos. Algunas especies se perderán, el paisaje marino cambiará, pero vendrán otras especies y el paisaje marino será diferente, habrá ganadores y perdedores y los colores antárticos seguirán cambiando. Sin embargo, parte de nuestra biblioteca natural se está quemando y debemos intentar salvar la mayor cantidad posible de libros, y sus colores, porque la clave para comprender nuestro océano está ahí. Más de cuatro siglos después de la reflexión de Sir Francis Bacon, ahora el desafío para nosotros es adquirir conocimiento y usar su poder para convertir los «océanos que tenemos» en los «océanos que queremos».

Referencias

Fuentes V., Alurralde G., Meyer B., *et al.* 2016. Glacial melting: an overlooked threat to Antarctic krill. Sci. Rep. 6: 27234.

Gutt J., Isla E., Xavier J.C., *et al.* 2021. Antarctic ecosystems in transition - life between stresses and opportunities. Biol. Rev. 96: 798-821.

Isla E., Gerdes D. 2019. Ongoing ocean warming threatens the rich and diverse microbenthic communities of the Antarctic continental shelf. Progr. Oceanogr. 178: 102180.

Isla E., Gerdes D., Palanques A. *et al.* 2009. Downward particle fluxes, wind and a phytoplankton bloom over a polar continental shelf: a stormy impulse for the biological pump. Mar. Geol. 259: 59-72.

Pineda-Metz S.A.E., Gerdes D, Richter C. 2020. Benthic fauna declined on a whitening Antarctic continental shelf. Nature Comm. 11: 2226.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14068

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.12. Restauración de ecosistemas profundos del margen catalán

Jordi Grinyó, Maria Montseny, Patricia Baena, Stefano Ambroso, Andreu Santín, Marina Biel, Guillem Corbera, Janire Salazar, Josep-Maria Gili

La pesca es una de las actividades humanas con un mayor impacto sobre los fondos marinos. Durante el siglo pasado, la pesca se expandió progresivamente a aguas más profundas. En la actualidad, casi todas las plataformas y taludes continentales del mundo han sido explotados. En las zonas de pesca gestionadas por la UE entre 200 y 1000 m de profundidad, se estima que la pesca de arrastre de fondo ha impactado entre el 2% y el 77% de la superficie (Eigaard *et al.* 2017). Consecuentemente, se ha producido una degradación sustancial de ecosistemas marinos vulnerables, que generalmente albergan organismos sésiles (organismos fijados al fondo marino) estructurantes. Estos organismos se caracterizan por tener un crecimiento lento, ser muy longevos y presentar una estructura tridimensional compleja (patrones de ramificación intrincados). Entre los distintos ecosistemas vulnerables encontramos fondos de esponjas, agregaciones de octocorales o arrecifes de coral de aguas frías que proporcionan hábitat a una amplia gama de especies asociadas, varias de las cuales son explotadas por flotas pesqueras. Cabe destacar, los efectos adversos de la pesca de arrastre sobre estos ecosistemas ya que son extremadamente duraderos. En este sentido, en algunos ecosistemas vulnerables impactados por la pesca de arrastre no se han observado signos de recuperación incluso diez años después del cese de la actividad pesquera (Clark *et al.* 2019).

La vulnerabilidad y baja resiliencia de estos ecosistemas profundos junto con la necesidad de preservar los servicios de provisión que proporcionan, ya que actúan como hábitat, vivero y lugar de alimentación para especies de relevancia económica, ha promovido la aplicación de varias medidas de gestión, como la restricción de los artes de contacto de fondo o el establecimiento de zonas marinas protegidas en la plataforma y taludes continentales y las montañas submarinas. Las medidas de conservación son cruciales para la preservación y recuperación ecológica del patrimonio natural y cultural. Sin embargo, dada la escala actual de degradación ambiental a la que están expuestos los ecosistemas marinos de aguas profundas, la protección por sí sola puede resultar insuficiente. Los ecosistemas del planeta necesitan actualmente medidas activas de conservación y restauración que ayuden a estos ecosistemas a recuperarse, tanto en términos de biodiversidad como de servicios ecosistémicos.

La restauración marina: una necesidad al alza a escala global

Desde los años noventa, coincidiendo con el nacimiento de la Sociedad para la Restauración Ecológica (SER), la práctica de la restauración ecológica, como parte de un conjunto más amplio de prácticas de gestión ecosistémicas diseñadas para conservar los ecosistemas, está recibiendo una atención mundial cada vez mayor. Además, la Asamblea General de las Naciones Unidas ha proclamado el periodo comprendido entre los años 2021 y 2030 como la Década de la Restauración de los Ecosistemas, tras una propuesta de acción de más de setenta países de todo el mundo (Waltham *et al.* 2020). Aunque durante los últimos veinte años la restauración de los ecosistemas marinos ha aumentado sustancialmente

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

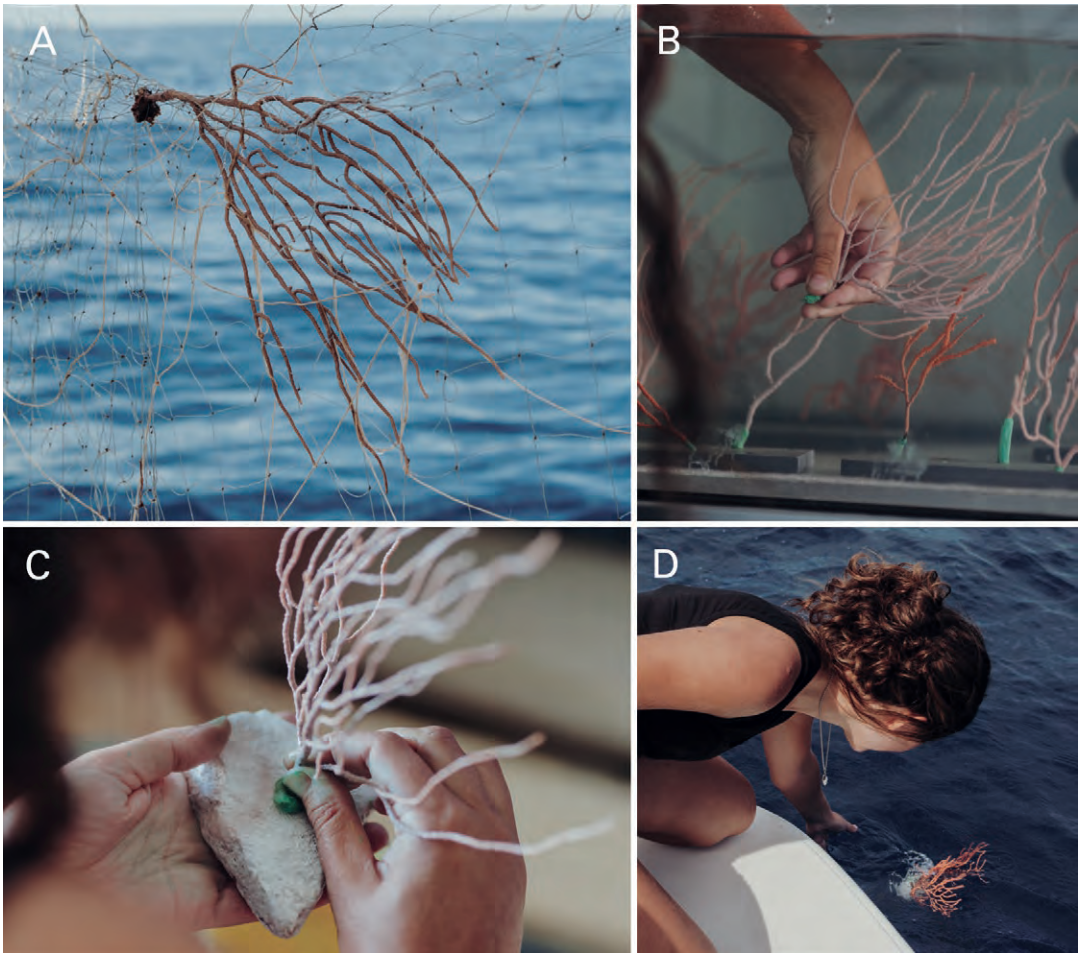


Figura 1. Pasos secuenciales del «método de bádminton». A, recuperación de la colonia de *Eunicella cavolini* enredada en el trasmallo; B, mantenimiento de *E. cavolini* nubbins en acuarios; C, reacoplamiento de *E. cavolini* nubbins en adoquines; D, el izado de *E. cavolini* nubbins restaurados al mar. Fotos de Laia Sabaté.

en todo el mundo, la mayoría de las acciones de restauración hasta la fecha se han desarrollado en ambientes poco profundos, centrándose principalmente en poblaciones de especies estructurantes (especies que juegan un papel primordial en la formación de un hábitat) como ostras, manglares, fanerógamas marinas, algas, gorgonias y arrecifes de coral tropicales. A nivel mundial, solo se han realizado siete acciones de restauración activas consistentes en el trasplante de nubbins (esquejes) de varias especies de corales de aguas frías (por ejemplo, *Oculina varicosa*, *Desmophyllum pertusum*) y gorgonias (por ejemplo, *Paragorgia arborea*, *Viminella flagellum*, *Callogorgia verticillata*) en ambientes intermedios (50-200 m de profundidad) y de aguas profundas (>200 m de profundidad) (Montseny *et al.* 2020). Debido a los desafíos técnicos y logísticos y los altos costes asociados al trabajo en entornos de aguas profundas, estas acciones se han desarrollado generalmente durante periodos breves (de uno a cuatro años) y cubriendo áreas pequeñas (2-20 m^2).

Los ecosistemas marinos del Cap de Creus: laboratorio para el desarrollo de metodologías de restauración innovadoras

Para superar estas limitaciones, en 2018, el equipo de «Ecología y resiliencia de ecosistemas bentónicos en un océano cambiante» del ICM desarrolló una nueva técnica de restauración

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

rentable para agregaciones de octocorales en entornos profundos conocido como el «método de bádminton» (figura 1). Esta técnica de restauración consiste en fijar organismos estructurantes sésiles capturados accidentalmente (por ejemplo, gorgonias, esponjas, corales blandos) a cantos rodados y devolverlos a ambientes profundos lanzándolos suavemente desde un barco (Montseny *et al.* 2020). Desde 2018, este método ha permitido restaurar 2863 colonias de la gorgonia *Eunicella cavolini* en un entorno de plataforma continental (80-90 m de profundidad) con una tasa de supervivencia del 90% un año después del trasplante. Actualmente, esta metodología también se está probando para recuperar poblaciones de otros organismos sésiles comúnmente impactados por flotas pesqueras artesanales en el Cap de Creus, como el coral blando *Alcyonium palmatum* y la esponja de grandes dimensiones *Axinella polipoides*. El éxito de esta técnica de restauración activa rentable pone en valor la viabilidad de la restauración a gran escala de las poblaciones de organismos estructurantes impactados, con resultados prometedores para la conservación y recuperación de ecosistemas intermedios y de aguas profundas. De hecho, en un futuro próximo, está previsto que este enfoque de restauración se amplíe a varias zonas de exclusión pesquera (zonas donde la práctica pesquera está permanentemente prohibida) en la plataforma y talud del margen catalán, con el fin de revertir el mal estado de conservación de sus hábitats bentónicos, que se han visto afectados por las actividades pesqueras durante la mayor parte del siglo xx. Estos esfuerzos de restauración ayudarán a restablecer servicios ecosistémicos, como zonas de cría y hábitats de reproducción para otras especies asociadas (por ejemplo, peces y decápodos).

En general, después de ser restauradas de manera efectiva, estas áreas podrían actuar como hábitats de origen promoviendo el spillover (migración de organismos fuera de la zona de exclusión) de ciertas especies a los caladeros adyacentes, aumentando la biodiversidad de la plataforma continental catalana y potencialmente ayudando a mantener la viabilidad a largo plazo de sus pesquerías.

Referencias

Clark M.R., Bowden D.A., Rowden A.A., *et al.* 2019. Little evidence of benthic community resilience to bottom trawling on seamounts after 15 years. Front. Mar. Sci. 6: 1-16.

Eigaard O.R., Bastardie F., Hintzen N.T., *et al.* 2017. The footprint of bottom trawling in European waters: distribution, intensity, and seabed integrity. ICES J. Mar. Sci. 74: 847-865.

Montseny M., Linares C., Viladrich N., *et al.* 2020. A new large-scale and cost-effective restoration method for cold-water coral gardens. Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst. 30: 1-11.

Waltham N.J., Élliott M., Lee S.Y., *et al.* 2020. UN decade on ecosystem restoration 2021-2030-What chance for success in restoring coastal ecosystems? Front. Mar. Sci. 7: 1-5.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14069

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.13. Pescadores y científicos: sinergias para la exploración, conservación y sostenibilidad del medio marino

Andreu Santín, Jordi Grinyó, Stefano Ambroso, Patricia Baena, Marina Biel, Guillem Corbera, Janire Salazar, Maria Montseny, Josep-Maria Gili

Durante los siglos xx y xxi, la creciente demanda de recursos marinos por parte de los países mediterráneos ha conllevado un aumento progresivo de la presión pesquera. Como consecuencia, tanto los fondos litorales como los de la plataforma continental han sufrido y sufren los impactos de la pesca de arrastre, y en menor medida, de la pesca artesanal con palangre, trasmallo de fondo y otros artes de pesca menores (Demestre *et al.* 2022, Grinyó *et al.* 2022). En este sentido, y siguiendo las indicaciones propuestas por la Estrategia Marina Europea, se ha empezado a delimitar un conjunto de áreas especialmente vulnerables donde se pretende aplicar medidas de protección para la conservación de sus fondos (Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino; https://www.boe.es/eli/es/l/2010/12/29/41). En estas áreas se busca desarrollar políticas integradas para promover prácticas de pesca sostenible que eviten la sobreexplotación de los recursos naturales y al mismo tiempo permitan mitigar los impactos que puedan producirse sobre los hábitats bentónicos, que son aquellos que se encuentran directamente sobre el lecho marino. A pesar de que actualmente en la mayoría de las áreas marinas protegidas siguen trabajando pescadores, solo una minoría de los estudios científicos y planes de gestión han integrado la experiencia y el conocimiento de los mismos sobre dichas zonas. Esta escasa implicación de los pescadores en la elaboración de las distintas medidas de gestión suele generar un rechazo de las mismas por parte del sector pesquero, lo que a menudo conlleva una falta de motivación a la hora de implementar propuestas para conservar el medio marino y buscar un uso más sostenible del mismo.

Primeras experiencias: la pesca artesanal en el Canal de Menorca

En este sentido, el grupo de investigación en ecología y resiliencia de los ecosistemas bentónicos del Institut de Ciències del Mar lleva años trabajando para lograr una mayor implicación y participación de los pescadores en proyectos científicos. A modo de ejemplo, durante la exploración del Canal de Menorca los pescadores artesanales de la zona ayudaron a identificar áreas de elevada diversidad en el margen de la plataforma continental, inexploradas hasta el momento, pero conocidas desde hacía décadas por los pescadores. En dichos fondos se encontraron densas comunidades de esponjas y gorgonias de kilómetros de extensión, que podrían catalogarse entre las mejor conservadas del Mediterráneo noroccidental (Grinyó *et al.* 2018, Santín *et al.* 2018), descubriéndose en ellas especies nuevas para la ciencia. A su vez, en el Canal es habitual que en las redes de los pescadores artesanales se enreden ejemplares de diversas especies de gorgonias (organismos coloniales emparentados con los corales) sin interés comercial que son devueltas al mar de manera sistemática por los mismos pescadores. Entre las gorgonias que capturan accidentalmente, hay tanto colonias arrancadas del sustrato como otras que salen fijadas a cantos rodados. Tras una inves-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

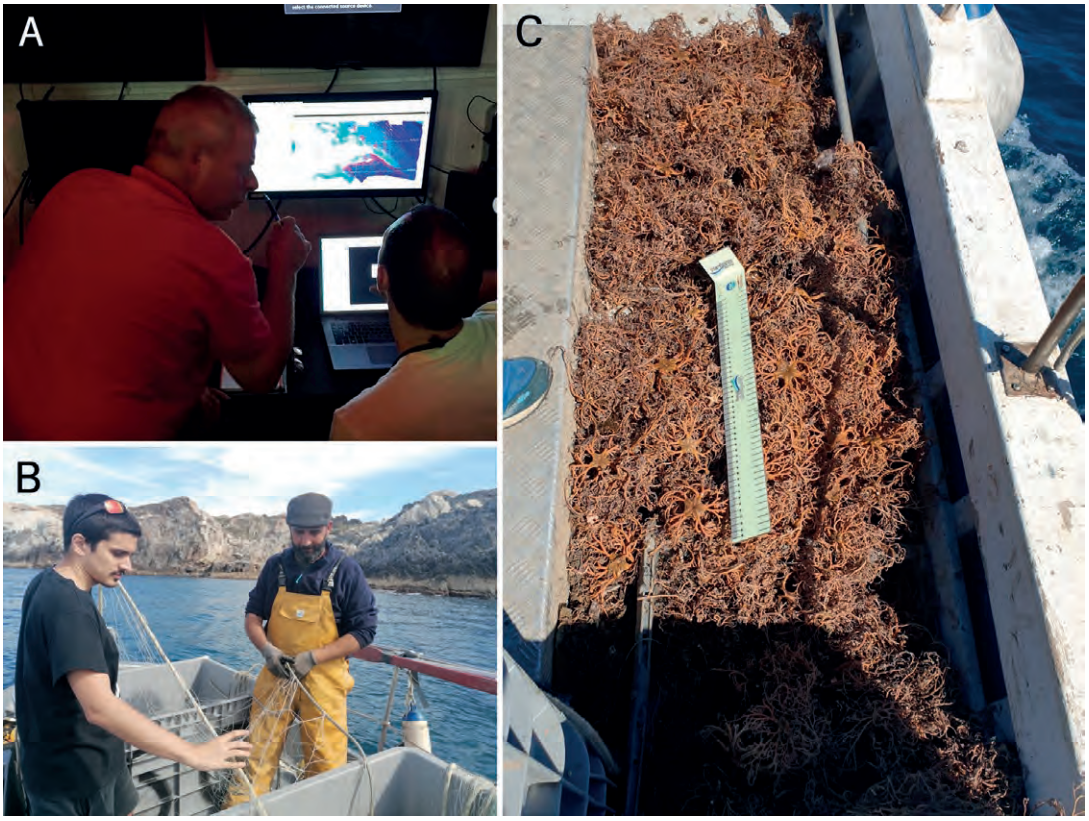


Figura 1. A, asesoramiento por parte de un pescador artesanal de Port de la Selva al equipo científico del proyecto MITICAP durante la exploración de los caladeros artesanales del Cap de Creus mediante ROV (Vehículo Operado por control Remoto). B, colaboración entre pescadores artesanales y científicos en la preparación de redes de trasmallo experimentales a bordo de una embarcación de pesca. C, centenares de ejemplares de *Astrospartus mediterraneus* capturados accidentalmente por trasmallos artesanales en una jornada de pesca.

tigación conjunta con los pescadores, se pudo constatar que la supervivencia de las segundas, fijadas en los cantos, es mucho más elevada una vez devueltas al mar. Así pues, basándonos en el conocimiento de dichos pescadores menorquines, se desarrolló un método de restauración de gorgonias que lleva ya años aplicándose de forma exitosa en la zona del Cap de Creus (Grinyó *et al.* 2022, Montseny *et al.* 2021).

En la actualidad: hacia un modelo de cogestión y conservación de los recursos pesqueros

Es precisamente en el área del Cap de Creus (el primer parque nacional marítimo-terrestre del estado español, recientemente incluido en la Red Natura 2000), donde se centran actualmente los esfuerzos del grupo. En este sentido, durante el desarrollo del proyecto Life+ INDEMARES, se pudo constatar que, en el área marina del Cap de Creus, al igual que ocurría en el Canal de Menorca, las zonas mejor conservadas eran aquellas que resultaban inaccesibles para la pesca de arrastre y que solo eran frecuentadas por la flota artesanal (Gili *et al.* 2011). No obstante, aunque la pesca artesanal genera un impacto menor en el medio que otros métodos de pesca, este sigue existiendo. Así pues, se ha iniciado una estrecha colaboración con los pescadores artesanales de las cofradías de Port de la Selva y Cadaqués, con el objetivo de comprender mejor sus técnicas, potenciar este tipo de pesca frente a otras más destructivas y mitigar los impactos generados por la pesca artesanal en la zona (figura 1A). Dicha mitigación consiste

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

en la modificación de las áreas habituales de calado, la selección de distintas artes de pesca en base a los distintos hábitats que alberga cada caladero, así como en medidas para disminuir la pesca fantasma (captura de organismos marinos por artes de pesca perdidos o extraviados; figura 1B). Por otra parte, dichos pescadores capturan de forma accidental especies de elevado interés científico, habiendo ayudado a detectar por vez primera la presencia de la gorgonia *Spinimuricea klavereni* en las costas catalanas (Yokeş *et al.* 2018). Otra importante contribución por parte de los pescadores fue la detección de un aumento en la población de *Astrospartus mediterraneus* (un ofiuroideo emblemático del Mediterráneo considerado raro o poco abundante), que había pasado inadvertido para el colectivo científico (figura 1C). El notable incremento de este equinodermo perjudica al sector, debido a que implica un aumento considerable del tiempo de limpieza de las redes. Sin embargo, la comunicación entre pescadores y científicos permitió analizar el problema desde una perspectiva ecológica, lo que contribuyó a aumentar la confianza de los pescadores y su voluntad de colaborar con el personal científico.

La comunidad científica está realizando grandes esfuerzos para acercar la ciencia a la sociedad, ya que para revertir el modelo de pesca extractiva no sostenible que impera en la sociedad actual, se necesita generar una gran complicidad entre todos los actores implicados. Por ello, generar un modelo de cooperación estrecha entre personal científico y pescadores es imprescindible para lograr un cambio de paradigma en la explotación de los recursos pesqueros que permita apoyar y potenciar prácticas y sectores más sostenibles como la pesca artesanal.

Referencias

Demestre M., de Juan S., Garcia-de-Vinuesa A. 2022. Integridad ecológica de los fondos marinos: conciliar conservación y explotación. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 68-70.

Gili J.M., Madurell T., Requena S. *et al.* 2011. Caracterización física y ecológica del área marina del Cap de Creus. Informe final área LIFE+ INDEMARES (LIFE07/NAT/E/000732). Institut de Ciències del Mar-CSIC (Barcelona). Coordinación: Fundación Biodiversidad, Madrid, 272 pp.

Grinyó J., Gori A., Greenacre M., *et al.* 2018. Megabenthic assemblages in the continental shelf edge and upper slope of the Menorca Channel, Western Mediterranean Sea. Prog. Oceanogr. 162: 40-51.

Grinyó J., Montseny M., Ambroso S., *et al.* 2022. Restauración de ecosistemas profundos del margen catalán. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 74-76.

Montseny M., Linares C., Viladrich N., *et al.* 2021. Involving fishers in scaling up the restoration of cold-water coral gardens on the Mediterranean continental shelf. Biol. Conserv. 262: 109301.

Santín A., Grinyó J., Ambroso S., *et al.* 2018. Sponge assemblages on the deep Mediterranean continental shelf and slope (Menorca Channel, Western Mediterranean Sea). Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap. 131: 75-86.

Yokeş M.B., Andreou V., Bakiu R., *et al.* 2018. New Mediterranean Biodiversity Records (November 2018). Mediterr. Mar. Sci. 19: 673-689.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14070

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.14. Observando desde la distancia: nuevas tecnologías para una mejor gestión del océano

Francisco Ramírez, Isabel Afán, Nixon Bahamon, Marta Coll, Joan Giménez, Joan Navarro, Jeroen Steenbeek

Los océanos cubren aproximadamente el 71% de la superficie de la Tierra, representan el 97% del espacio habitable del planeta, y alojan entre quinientas mil y diez millones de especies marinas. Los océanos son también una incalculable fuente de beneficios para los humanos, ofreciéndonos múltiples servicios ecosistémicos: constituyen una de las principales fuentes de alimentos y juegan un papel fundamental en el ciclo del carbono y en la regulación del clima. A pesar de su importancia en el mantenimiento de la vida y el bienestar humano, los océanos se encuentran entre los biomas de la Tierra más complejos, desconocidos e impactados por la presión del clima y las actividades humanas.

Los océanos son unos de los principales sumideros del exceso de CO_2 y calor de la atmósfera, lo que tiene consecuencias sobre los patrones climáticos, la productividad marina, las interacciones tróficas y la seguridad alimentaria. A su vez, la actividad pesquera impone una excesiva presión sobre los ecosistemas marinos, ya que aproximadamente el 94% de los recursos pesqueros a nivel global están siendo explotados a niveles insostenibles (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación -FAO- 2020). El efecto combinado del cambio climático y la sobrepesca puede comprometer la resiliencia de las comunidades, haciéndolas cada vez más vulnerables a dichos cambios y a otros impactos de origen antrópico como la contaminación y la degradación o destrucción de los hábitats marinos.

Nuestra capacidad para poder realizar un monitoreo regular sobre el estado de los ecosistemas marinos y sobre las presiones o impactos ambientales que actúan sobre ellos, es clave a la hora de desarrollar estrategias efectivas de gestión dirigidas a promover la conservación de los océanos, así como al uso sostenible de sus recursos. Sin embargo, estas presiones, al igual que los organismos marinos, se distribuyen de manera heterogénea en la aparente continuidad del hábitat oceánico (Ramírez *et al.* 2017; figura 1), lo que dificulta un seguimiento efectivo tanto de los impactos como de los servicios ecosistémicos que se ven alterados.

¿Cómo podemos observar, medir y evaluar estos impactos en un ecosistema tan complejo, remoto y extenso como es el océano?

Afortunadamente, los recientes avances en diferentes tecnologías de observación remota han revolucionado la forma en la que podemos monitorear la Tierra, estudiar las presiones humanas y observar a los organismos en su medio natural. Estos avances permiten obtener información sobre características ambientales y biológicas clave a una alta resolución espacial y temporal mediante el uso de sensores que se distribuyen a nivel global, a bordo de plataformas satelitales o aéreas, o la tierra y el mar. Estos sistemas de observación son particularmente útiles en el caso de los océanos, ya que permiten monitorear cualquier rincón, desde las zonas más costeras y accesibles hasta las áreas más remotas donde la observación tradicional es

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

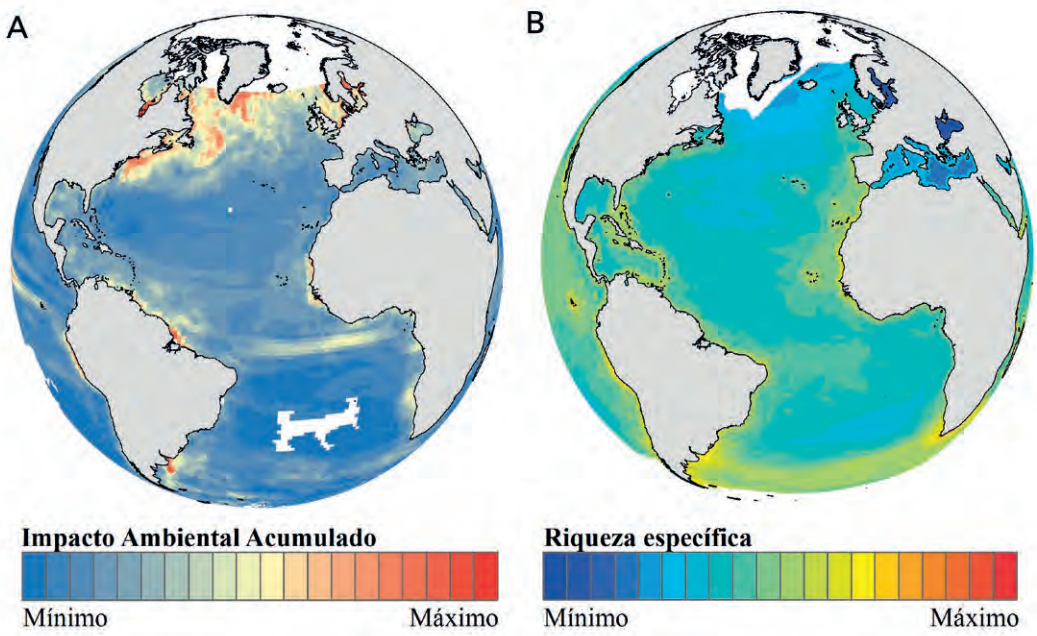


Figura 1. Los cambios ambientales provocados por el clima se distribuyen espacialmente de manera heterogénea por los océanos, al igual que los organismos marinos. En esta figura identificamos áreas marinas que están muy afectadas por cambios igualmente ponderados en la temperatura de la superficie del mar, las concentraciones de clorofila *a* y las corrientes oceánicas (A); y puntos calientes de biodiversidad marina basada en la distribución equitativa de especies de peces (1729), mamíferos marinos (124) y aves marinas (330) (B) [datos proporcionados por UICN (www.iucnredlist. org) y BirdLife International (www.birdlife.org)]. Figuras modificadas de Ramírez *et al.* (2017).

difícil. Además, permiten obtener información sobre los cambios en el medio producidos por las actividades humanas y hacer seguimiento de los desplazamientos de los organismos marinos a través de dispositivos instalados en individuos de diferentes grupos animales.

Las aplicaciones ecológicas y ambientales que pueden derivar de la utilización de este tipo de información incluyen el monitoreo a largo plazo de variables ambientales, la identificación de áreas marinas afectadas por el clima y los impactos antrópicos y, algo muy importante, la evaluación de las respuestas de los organismos marinos frente a estos cambios. Por ejemplo, el uso de radares satelitales e imágenes de teledetección de luces nocturnas artificiales, especialmente cuando se complementa con técnicas de modelado basadas en Sistemas de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en inglés) o Sistema de Monitoreo de Embarcaciones (VMS, por sus siglas en inglés), puede proporcionarnos información detallada sobre la distribución de las pesquerías, (incluidas las ilegales, no declaradas y no reglamentadas –IUU–, por sus siglas en inglés), que de otra forma son muy difíciles de localizar. De manera similar, se puede obtener información de manera prácticamente inmediata de cualquier parte del mundo, sobre el tráfico marítimo y otras actividades o instalaciones humanas que puedan tener un impacto potencial en la vida marina.

Otros usos de las imágenes de teledetección satelital y de las observaciones *in situ* obtenidas a través de redes mundiales de boyas de deriva o de estudios oceanográficos incluyen su integración en modelos físicos y biogeoquímicos. Estos modelos constituyen un enfoque prometedor a la hora de monitorear los ecosistemas marinos, tanto en superficie como en profundidad a tiempo real. Su uso nos ayuda a evaluar los impactos ambientales provocados por el clima, comprender las interacciones océano-atmósfera y mejorar los pronósticos oceánicos y climáticos cuando se interconectan con modelos que representan componentes más complejos de la vida marina.

También se han producido grandes avances en la forma en que los científicos rastrean y mo-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 2. Los recientes y rápidos avances en dispositivos de seguimiento remoto colocados directamente sobre los animales han revolucionado la forma en que los científicos rastrean y monitorean el comportamiento natural de los animales, junto con las características físicas de su entorno. En esta figura mostramos algunos de estos dispositivos de seguimiento aplicados a una amplia gama de especies: desde la pequeña cigala *(Nephrops norvegicus)* hasta el gran cachalote *(Physeter macrocephalus)*. Las imágenes han sido proporcionadas por los autores, por CIRCE (Conservación, Información, Estudio de Cetáceos; orca y cachalote) y por Mark Jessopp-UCC (University College Cork; foca gris).

nitorean los organismos vivos en la naturaleza, junto con el entorno en el que habitan, a través de dispositivos de seguimiento colocados directamente sobre los animales (lo que en inglés se conoce con el término *bio-logging*, Ropert-Coudert y Wilson 2005). Estos dispositivos incluyen transmisores acústicos, GPS miniaturizados, así como cámaras y sensores multiparamétricos, y permiten a los científicos obtener, de forma remota, medidas cuantitativas complejas sobre la localización, el comportamiento natural de los animales, así como sobre las características físicas de su entorno. Este tipo de información permite profundizar, de forma inimaginable hasta la fecha, en nuestro conocimiento sobre la biología, la ecología y el comportamiento de diferentes especies: desde invertebrados marinos hasta tiburones, tortugas, aves y grandes mamíferos marinos (figura 2). También ofrece nuevas capacidades para observar el océano, las condiciones ambientales dinámicas y las interacciones con los humanos y, lo que es más importante, las consecuencias de estas interacciones en los individuos y las poblaciones (Roquet *et al.* 2017).

Hacia una mejor gestión y conservación de los sistemas marinos

La combinación de los datos de seguimiento remoto de animales con observaciones ambientales tanto remotas como *in situ* permite identificar áreas marinas claves (por ejemplo, puntos calientes de biodiversidad) que (i) deben ser priorizadas desde el punto de vista de su conservación por estar particularmente impactadas por el clima y las presiones humanas, o (ii) pueden actuar como «refugios climáticos» por ser potencialmente

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

más resilientes al cambio climático. Los animales marcados también pueden ayudar a monitorear la salud de los océanos, ya que pueden integrar procesos complejos e interacciones tróficas en un número reducido de señales accesibles y relacionadas con cambios en su comportamiento, distribución, fenología o estrategias de alimentación (Giménez *et al.* 2022).

Es importante destacar que, desde las aves marinas más pequeñas hasta los tiburones y ballenas de mayor tamaño, los animales marinos monitoreados más activamente son especies carismáticas con las que las personas pueden identificarse (Giménez *et al.* 2022). Esto tiene implicaciones importantes en los procesos de gestión y conservación de los hábitats. Establecer medidas de protección para las especies y los recursos marinos no solo implica mediar en el conflicto entre el uso de recursos y la protección marina; también conlleva el intentar profundizar en la capacidad de las personas para conectar con las especies y el medio en el que habitan (Simaika y Samways 2010). En consecuencia, estas especies tienen el potencial de actuar como «embajadores», desempeñando un papel vital en la educación ambiental para ayudar a explicar los problemas ambientales al público en general, y así involucrar a los ciudadanos y las autoridades en la conservación y protección del medio marino. Al proteger estas especies, también podemos proteger sus hábitats e, indirectamente, otras especies que viven en sus comunidades ecológicas.

Las nuevas tecnologías de teledetección y seguimiento remoto nos están proporcionando nuevas maneras de observar los océanos. El mayor desafío que tenemos ante nosotros es cómo hacer el mejor uso posible de esta información a la hora de superar algunos de los principales desafíos de conservación que tenemos por delante.

Referencias

FAO 2020. The State of World Fisheries and Aquaculture. Sustainability in action. Rome, Italy.

Giménez J., Ramírez F., Coll M., Navarro J. 2022. Carismáticos, amenazados y desconocidos: los depredadores marinos en el Antropoceno. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 65-67.

Ramírez F., Afán I., Davis L.S., Chiaradia A. 2017. Climate impacts on global hot spots of marine biodiversity. Sci. Adv. 3: e1601198.

Ropert-Coudert Y., Wilson R.P. 2005. Trends and perspectives in animal-attached remote sensing. Front. Ecol. Environ. 3: 437-444.

Roquet F., Boehme L., Fedak M., *et al.* 2017. Ocean observations using tagged animals. Oceanography 30: 139-139.

Simaika J.P., Samways M.J., 2010. Biophilia as a universal ethic for conserving biodiversity. Conserv. Biol. 24: 903-906.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14071

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

2.15. Hacia un transporte marítimo renovable para un océano resiliente y saludable

Jordi Solé, Antonio García-Olivares

El transporte marítimo es uno de los modos de transporte más contaminantes, no solo en cuanto a sus emisiones de gases de efecto invernadero sino también por la gran polución que genera comparada con otros modos de transporte. Además, el transporte marítimo presenta otros impactos como: colisiones con mamíferos, contaminación por fugas de petróleo o carburantes, vertido de residuos o agua de sentina y contaminaciones de las aguas de los puertos para el agua de lastre. Se estima que las emisiones por transporte marítimo son un 2,2% de las emisiones (por actividad humana) totales en 2012 y se prevé que incrementen entre un 50 a un 250% si no se toman acciones (Rahim *et al.* 2016). Por otra parte el transporte marítimo es clave en la economía global ya que representa entre un 80 y un 90% del comercio mundial (Balcombe *et al.* 2019).

Evaluando los impactos del transporte marítimo

Por lo tanto, teniendo en cuenta los impactos introducidos anteriormente, y el hecho de que el transporte marítimo sea esencial y al mismo tiempo uno de los modos de transporte de más emisiones, es necesario que haga una transición a un modelo basado en energía renovable. Por ello es necesario hacer una evaluación de las implicaciones de este cambio y del costo de hacerlo. Por otro lado, una economía renovable necesita de una transformación global del transporte que, a su vez, necesita cambios estructurales de la logística del sector. Para considerar esta transformación, hay que tener en cuenta indicadores geofísicos (como las reservas disponibles de cualquier material o fuente energética), la limitación de minerales (baterías, cableado, motores, etc.) y el re-diseño de las redes de transporte, además de una reducción de los modos de transporte privado por carretera y del transporte aéreo y marítimo. En este artículo, tomamos como referencia dos trabajos (García-Olivares *et al.* 2018, 2020) que se desarrollaron en el marco del proyecto MEDEAS (en el que se desarrolló un modelo de simulación para explorar las diferentes alternativas futuras para diseñar una socioeconomía baja en emisiones y basada en energías renovables) y evaluamos los costes de sustitución de la flota existente en el año 2016 si cambiamos todos los buques existentes por otros con tecnología no fósil.

Algunas estimaciones

La metodología que utilizamos considera la intensidad energética para evaluar estos costes. La intensidad energética (https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_intensity) de un sector económico es la energía empleada para generar una unidad de PIB, por lo tanto, lo que nos da es energía (Joules) por dólar (o euro). Con la intensidad energética y el coste estimado de los nuevos barcos obtenemos un coste energético (en Joules) de transformar toda la flota considerada. El coste (energético) evaluado aquí se centra en el reemplazo de cada modo de transporte por alternativas renovables y no tiene en cuenta diversos factores que se deberían considerar en

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

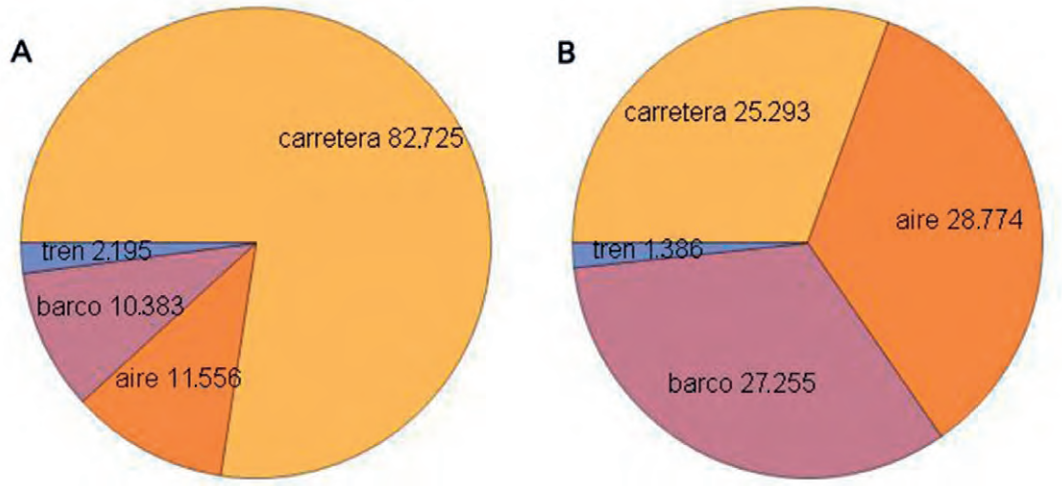


Figura 1. Proporción y energía (en PJ) requerida para cada modo de transporte: A, situación actual; B, tras la transición renovable. Como se ve el transporte renovable requerirá menos energía total y el transporte marítimo en particular crece en sus requerimientos energéticos aunque se reduzca a la mitad.

un análisis más detallado. Es pues un ejercicio de mínimos que pone en evidencia que las inversiones planteadas actualmente son totalmente insuficientes y quiere ser un aviso a navegantes en el futuro: si asumimos la posibilidad de sustitución y calculamos todo el coste, habrá que añadir a este coste el de la generación eléctrica, infraestructura energética, mantenimiento, etc., todo ello en un presente / futuro con menos potencia disponible por la disminución de la producción de combustible fósil.

En el caso de la flota marítima total hay que descontar los petroleros actuales (ya que en una economía sin la necesidad de recursos fósiles dejarían de tener sentido) y hacer los cálculos manteniendo los otros barcos mercantes y de pasajeros. Teniendo en cuenta esto, sustituir la flota actual por una renovable, produce un incremento en el consumo de energía del transporte marítimo del 163%. Este incremento viene de la imposibilidad, con las tecnologías actuales, de electrificarlo, es decir, habría que mantener este transporte en sistemas de combustión pero, en este caso, produciendo gas natural a partir de la electricidad para alimentar los motores de barcos, lo que supone fuertes aumentos de precios y la disminución del transporte intercontinental, lo que puede producir una reubicación de la actividad económica. Por lo tanto, además del uso de células de combustible y de metano, es necesario reorganizar y reducir el tráfico marítimo ya que actualmente el transporte de mercancías es uno de los mayores consumidores de combustibles fósiles y, tal como hemos mencionado en la introducción, es muy contaminante en cuanto a los poluentes, tanto en el aire como en el agua. Dada la falta actual de infraestructuras portuarias para almacenar metano o hidrógeno, en las próximas décadas, puede ser necesario un mayor uso de los biocombustibles para mitigar la huella de carbono de acuerdo con las recomendaciones del IPCC. Sin embargo, en una economía 100% renovable, la construcción de estas infraestructuras y el uso de metano o hidrógeno sería una opción más económica y ahorrarían una cantidad importante de energía. Por el contrario, si nos fijamos en la opción con menos pérdida energética hay que descartar para utilizar de forma masiva, con las tecnologías actuales, los biocombustibles. Así pues, como hipótesis, asumimos que el metano sería el principal combustible para la flota marina en el futuro (hay que añadir que reducir la velocidad del transporte marítimo de mercancías supondría un ahorro importante de energía). Manteniendo pues los mismos servicios que en el año 2016 la transición del transporte marítimo requeriría el 2,9% de la energía embebida total para hacer

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

toda la transición a un transporte renovable. En la figura 1 tenemos representada la proporción y cantidad de energía (en Peta Joules, PJ) necesaria del transporte actual (figura 1A) y la que requeriría tras la transición renovable (figura 1B).

En pocas palabras...

Si nos centramos solo en el caso de la UE, el coste energético de la transición del transporte marítimo sería 3,5% del total de la energía embebida por el cambio renovable en todos los modos de transporte. El total para este año (2016) de energía consumida por el transporte fue de 106.859 PJ, en un sector aproximadamente equivalente pero renovable sería de 82.708 PJ, un 23% menos, aproximadamente (gracias al ahorro en el transporte por carretera). Pero el alto consumo energético de barcos y aviones en una economía renovable presionaría hacia una reducción de la intensidad de estas clases de transporte, de aproximadamente un 50%. Este 23% de consumo de todos los modos de transporte hay que enmarcarlo dentro de una reducción y transformación de los modos de transporte, por lo tanto, aunque pueda parecer pequeño implica una reducción de la mitad de la flota actual. Esta transformación del transporte debe ir acompañada no solo de una transición de todos los modos sino también de cambios socioeconómicos profundos. Hay que ir a una economía que supere la necesidad del crecimiento indefinido, teniendo en cuenta un futuro inmediato con serios problemas de acceso a recursos materiales y con un medio ambiente con amenazas crecientes respecto, entre otros, a la polución, la conservación de los ecosistemas y el cambio climático.

Referencias

Balcombe P., Brierley J., Lewis C., *et al.* 2019. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. Energy Convers. Manage. 182: 72-88.

García-Olivares A., Solé J., Osychenko O. 2018. Transportation in a 100% renewable energy system. Energy Convers. Manage. 158: 266-285.

García-Olivares A., Solé J., Samsó R., Ballabrera-Poy J. 2020. Sustainable European Transport System in a 100% Renewable Economy. Sustainability 12: 5091.

Rahim M.M., Islam T., Kuruppu S. 2016. Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhouse gas emissions in the seas, Mar. Policy 69: 159-170.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14072

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

2.16. Adaptando las playas para el futuro

Jorge Guillén, Ruth Durán, Gonzalo Simarro

El litoral Mediterráneo español tiene una longitud total aproximada de 3000 km (incluyendo islas) y se caracteriza por una gran diversidad geomorfológica, entre la que destacan más de 750 km de playas de arena. La configuración y problemática actual del sistema costero se explica fundamentalmente por la intervención humana en el medio natural que se intensificó desde mediados del siglo xx, con la regulación de las cuencas hidrográficas, la explosión demográfica y el turismo masivo en la zona costera. Las consecuencias de esta transformación sobre el medio físico litoral fueron la disminución del aporte de sedimento por parte de los ríos al medio marino, cambios en la redistribución del sedimento y la ocupación urbanística de una parte importante de la playa emergida. Estos cambios inducidos por las actividades humanas han ocasionado un aumento considerable de los riesgos (erosión, inundación) en el litoral durante las últimas décadas y una pérdida continuada de la superficie emergida de las playas que, a su vez, ha provocado un incremento considerable de las obras de protección costera. Superpuestos a estos procesos, cada vez tienen más importancia para el ecosistema litoral las variaciones ligadas al cambio climático (temperatura del agua, nivel del mar, temporales, riadas repentinas, etc.) que aumentarán los riesgos en la zona litoral y producirán (de hecho, ya están produciendo) una erosión generalizada de las playas en un futuro próximo. A escala mundial se ha estimado la desaparición de más del 50% de las playas actuales para el año 2100 como consecuencia de la subida del nivel del mar (Vousdoukas *et al.* 2020).

Cambios de la línea de costa y monitorización

En definitiva, hay evidencias de que en un plazo de tiempo relativamente corto (unas décadas) el litoral tal y como lo conocemos ahora cambiará, por lo que existe la necesidad de diseñar «un nuevo litoral» que pueda adaptarse ante los cambios previstos siguiendo unas pautas asumibles para la sociedad. Sin descartar ninguna de las opciones posibles en las estrategias de adaptación, parece razonable potenciar aquellas que incluyen soluciones basadas en la naturaleza, porque priorizan la sostenibilidad del ecosistema marino y presumiblemente tendrán un coste menor para las futuras generaciones. Esta estrategia, con una visión a largo plazo, ha de ser multidisciplinaria y transversal, considerando todos los aspectos ambientales que puedan ser incorporados conjuntamente con los sociales y urbanísticos. Para ello, se precisa la obtención de datos continuos y de calidad de parámetros de interés (por ejemplo, la evolución morfológica de las playas, la frecuencia e intensidad de temporales, etc.) y, más importante, del tratamiento de estos datos para dar una visión actualizada en cada momento del estado de la costa y su planificación con criterios medioambientales.

El Grupo de Procesos Sedimentarios Oceánicos y Litorales del Institut de Ciències del Mar-CSIC de Barcelona inició en los años ochenta sus estudios sobre la dinámica sedimentaria del litoral catalán y sobre la estimación y distribución de los aportes de sedimento que recibe el medio marino. Progresivamente se han ido incorporando nuevas metodologías observacionales como la video monitorización de la zona costera (figura 1), la utilización de trípodes en el fondo marino, anclajes instrumentados para la toma de datos (velocidad de la corriente, concentración de sedimento en suspensión) o la incorporación de la ciencia ciudadana (proyecto CoastSnap) a estos estudios. La experiencia del Grupo en la toma de

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

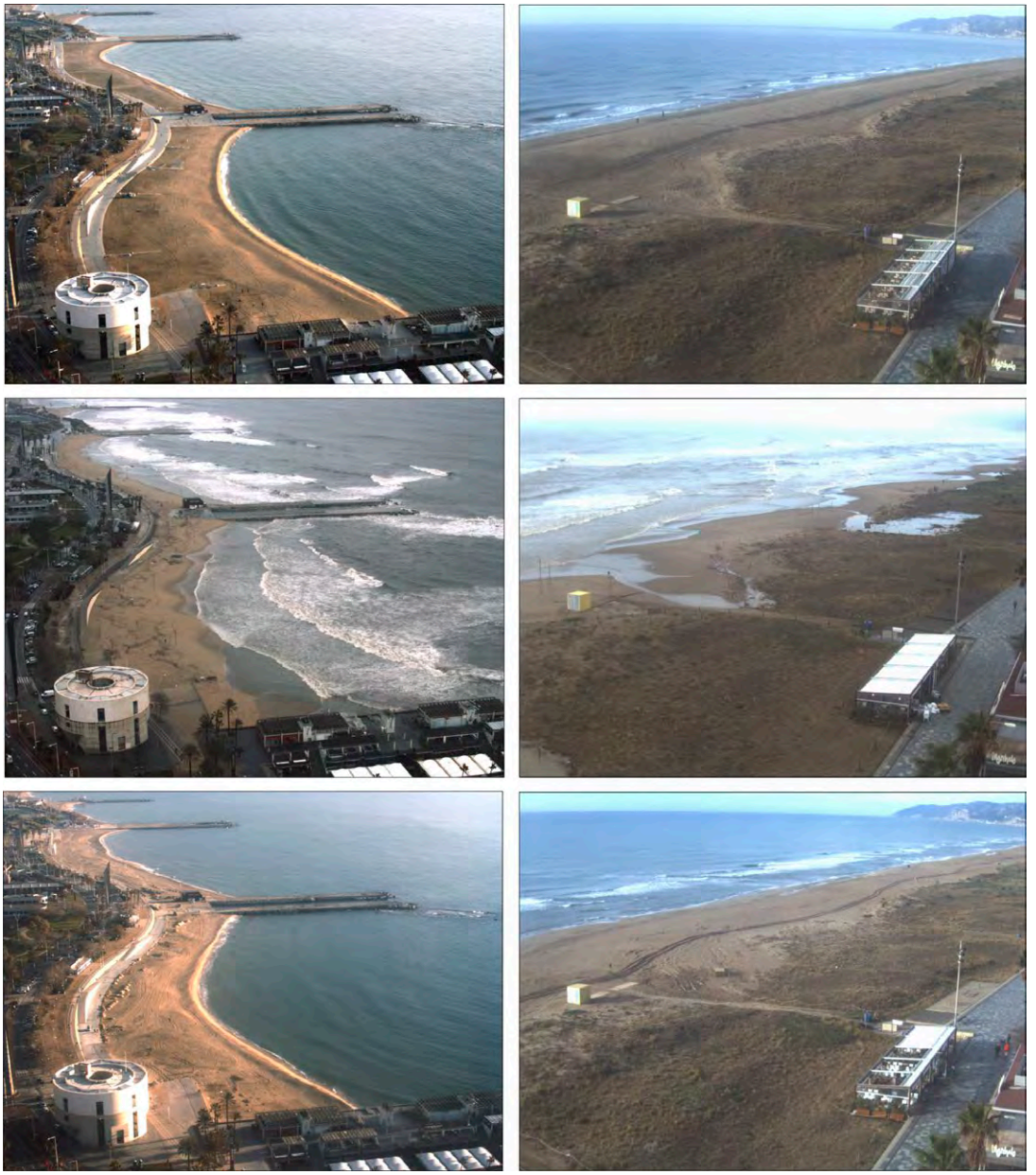


Figura 1. Playas de Barcelona (izquierda) y Castelldefels (derecha) una semana antes (arriba), durante (centro) y una semana después (abajo) del temporal Gloria de enero de 2020. Este temporal ha sido el más extremo jamás registrado en la costa catalana. Imágenes tomadas desde las estaciones de video monitorización del ICM-CSIC (coo.icm.csic.es).

datos, pero, sobre todo, en su interpretación, definición y la catalogación de parámetros de interés (Durán *et al.* 2016), permite ofrecer a la sociedad un conocimiento científico consolidado para la evaluación de impactos y predicción del comportamiento futuro de los ecosistemas costeros.

El objetivo general de la estrategia de adaptación litoral es valorar si es factible mantener (o incluso mejorar) la funcionalidad de las playas como protección de la costa frente a temporales, hábitat y usos sociales a largo plazo y plantear cuáles serían las principales líneas de actuación para conseguirlo. Estas líneas de actuación

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

deben considerar un futuro más sostenible en relación al uso de las playas, que incluye, por ejemplo, disminuir las necesidades de arena para la regeneración artificial y reducir los impactos negativos de los temporales; mejorar la calidad del agua y el sedimento; minimizar los costes de mantenimiento; etc. Todo ello en un escenario donde las necesidades de la práctica totalidad de las playas entrarán en mutua competencia y donde será necesaria una coordinación general (incluyendo un plan integral de gestión de los sedimentos) para optimizar los recursos disponibles. En definitiva, esta adaptación de las playas, que deberá afrontarse durante las próximas décadas, precisa de una inversión económica considerable, que puede comportar la necesidad de renunciar a determinadas playas, y deberá realizarse tratando de no hipotecar más a las futuras generaciones para evitar que en el futuro el acceso lúdico a la playa sea un «artículo de lujo».

Identificando estrategias de adaptación

Para construir una alternativa más sostenible, a corto plazo se sugieren dos líneas de actuación complementarias entre sí: a) mejorar y añadir estructuras de protección versátiles, escalables y que puedan ampliarse con facilidad en función de las necesidades en las playas donde son imprescindibles (campos de dunas, regeneraciones artificiales, diques de protección, ...); y b) potenciar las actuaciones tipo «playa inteligente» que consisten en la optimización de la gestión basada en el conocimiento detallado de los recursos disponibles y plantear medidas que permitan reducir los daños de los temporales, optimizar el uso de las arenas y anticipar las actuaciones a los futuros problemas. En este sentido, el uso de herramientas de observación como la vídeo monitorización ha demostrado ser de gran utilidad en la gestión de playas (Simarro *et al.* 2020), y se ha aplicado con éxito durante las dos últimas décadas en la ciudad de Barcelona (Ojeda y Guillén 2008).

A más largo plazo, ¿qué pasará si ocurren temporales extremos como el ocurrido en enero 2020 (temporal «Gloria») cada dos o tres años como indican las previsiones para mediados del siglo XXI? Difícilmente se podrá mantener la misma configuración de las playas que en la actualidad: la cota de inundación subirá y los impactos destructivos del oleaje afectarán zonas hasta ahora protegidas. A una escala temporal de décadas se debe iniciar una política urbanística y de gestión del territorio para ampliar la zona marítimo-terrestre e incorporar a la playa una zona interior con una extensión suficiente que sirva de acomodación a la erosión y la inundación durante eventos de alta energía (dunas artificiales que facilitan la adaptación y protección, áreas capaces de absorber inundaciones, etc.). En este sentido, cuanto más «natural» sea una playa con más facilidad podrá adaptarse a las nuevas condiciones. Cuando ganar espacio para la playa no sea una alternativa posible (como ocurre en muchas playas urbanas), se podrá plantear el proyectar nuevas estructuras de protección y grandes regeneraciones artificiales de arena.

En resumen, la humanidad ha sido capaz de disfrutar del contacto con el mar de muchas maneras diferentes y se ha adaptado muy rápidamente a los cambios que se han ido produciendo a lo largo de la historia. Nuestra adaptación a los diferentes usos es mucho más fácil que la propia adaptación geomorfológica de la costa. Mantener los aspectos lúdicos de la playa no ha de ser nuestro objetivo esencial en el diseño de nuestras playas del futuro, sino que parece más adecuado priorizar el ir hacia una costa segura, ambientalmente saludable y sostenible.

Agradecimientos. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de investigación MOCCA (RTI2018-093941-B-C32) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Referencias

Durán R., Guillén J., Ruiz A., Jiménez J.A., Sagristà E. 2016. Morphological changes, beach inundation and overwash caused by an extreme storm on a low-lying embayed beach bounded by a dune system (NW Mediterranean). Geomorphology 274: 129-142.

Ojeda E., Guillén J. 2008. Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches. Mar. Geol. 253: 51-62.

Simarro G., Calvete D., Souto P., Guillén J. 2020. Camera calibration for coastal monitoring using available snapshot images. Remote Sens. 12: 1840.

Vousdoukas M.I., Ranasinghe R., Mentaschi L., *et al.* 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. Nature Clim. Chang. 10: 260-263.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14073

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Jordi Camp

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3. Océano productivo

Mercedes Blázquez, Laura Arin, Blanca Figuerola

Los océanos constituyen una importante fuente de alimento para la Humanidad. La producción oceánica depende de los productores primarios, principalmente fitoplancton, que son organismos fotosintéticos que convierten la materia inorgánica en materia orgánica y oxígeno utilizando la energía solar. Estos organismos constituyen la base de las redes tróficas oceánicas y son la fuente directa o indirecta de todos los recursos marinos explotables. El buen uso de estos recursos por parte del Hombre no solo se basa en una explotación sostenible de los mismos, sino también en mantener el equilibrio natural de todos los componentes del ecosistema. Para ello, es fundamental un conocimiento integrado de la dinámica de los océanos y de los organismos que los habitan (figura 1).

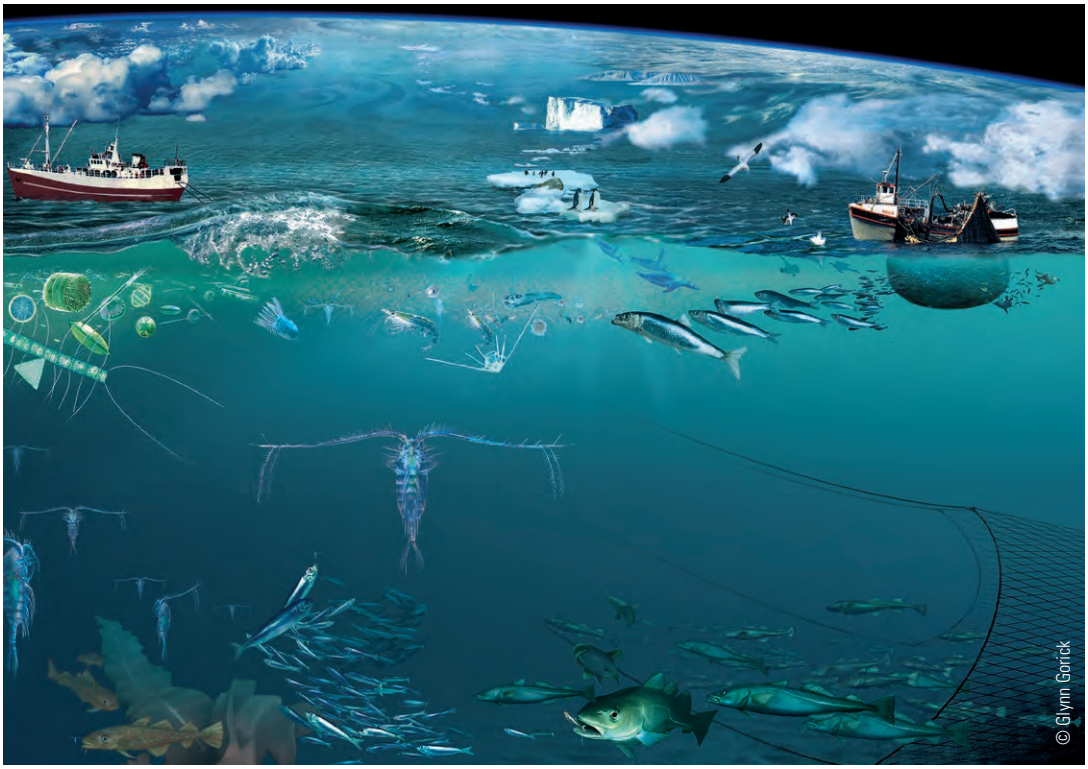


Figura 1. Algunos componentes de las redes tróficas oceánicas fundamentales para la obtención de recursos marinos explotables. Prácticas insostenibles, como la pesca de arrastre, resultantes de una mala gestión pesquera, llevan a un desequilibrio de estas redes tróficas.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

El crecimiento del fitoplancton depende de los nutrientes inorgánicos que llegan a la zona iluminada de la columna de agua, por lo que es básico conocer los procesos físicos que los regulan y caracterizar los aportes continentales de estos nutrientes. A su vez, las poblaciones de fitoplancton están reguladas por sus consumidores directos, como los organismos filtradores, que las mantienen en un cierto equilibrio. Sin embargo, en zonas costeras, donde el aporte antropogénico de nutrientes es elevado, este equilibrio se puede romper dando lugar a proliferaciones fitoplanctónicas que provocan una pérdida de biodiversidad y un deterioro de la calidad del agua el cual también afecta al sector turístico. Aunque no siempre la capacidad de proliferación del fitoplancton es negativa; en mar abierto el fitoplancton no consumido ni reciclado sedimenta en el fondo inmovilizando el CO_2 atmosférico captado en la fotosíntesis, mitigando el efecto invernadero responsable del calentamiento global.

En las últimas décadas, la incorrecta gestión de las pesquerías ha llevado a la sobreexplotación de poblaciones de especies de interés comercial, provocando una importante disminución de estas, llegando en algunos casos a situaciones insostenibles. Para atajar este problema es necesario un mayor conocimiento de la biología de especies marinas, a través, por ejemplo, de la incorporación de nuevas herramientas como las técnicas ómicas, o la implementación del uso de vehículos autónomos para el estudio de especies que habitan zonas de difícil acceso. Además, se necesita una buena co-gestión de la pesca que involucre a la comunidad científica, pescadores, administración y a otras organizaciones para que el conjunto de estas actuaciones permita supervisar y gestionar los recursos mientras protegemos la biodiversidad. Pero el uso de recursos marinos vivos no solo va dirigido a su consumo. Muchos organismos marinos constituyen una importante fuente de productos naturales con aplicaciones en diferentes campos, como es el uso de algas en la industria farmacéutica o la energética, o el uso de animales como modelos experimentales en biomedicina. La necesidad de asegurar el bienestar de estos modelos animales es una obligación ética y moral que los investigadores tenemos con nuestro planeta y con la sociedad.

Según la Organización de las Naciones Unidas, «los océanos son el corazón vulnerable de nuestro planeta» por lo que un buen conocimiento y una gestión responsable de los mismos son clave para el desarrollo de una economía oceánica sostenible.

Agradecimientos. Estamos agradecidas a Glynn Gorick por su gentileza al compartir su hermosa recreación sobre las redes tróficas marinas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.1. El sistema océano-atmósfera como colector y distribuidor de calor

Dorleta Orúe-Echevarría, Ignasi Vallès-Casanova, Josep L. Pelegrí

El clima de la Tierra depende principalmente de la temperatura del Sol y de su distancia a este astro. Estos factores determinan la insolación (energía por unidad de área) que llega a la superficie de la Tierra. Sin embargo, la temperatura media real de la Tierra y su distribución geográfica están relacionadas con el sistema océano-atmósfera, dependiendo de dos tipos de procesos: los que controlan el equilibrio radiativo local y los responsables de la distribución de calor entre las diferentes regiones.

Por un lado, el equilibrio radiativo global está determinado por los gases de efecto invernadero y el albedo planetario. Por otro lado, la distribución de calor depende de la intensidad y dirección tanto de las corrientes oceánicas como de los vientos atmosféricos, así como del intercambio de calor entre la atmósfera y el océano. Además, la elevada capacidad de almacenamiento de calor de los océanos también influye en gran medida en las temperaturas locales. En este ensayo, nos centraremos en la forma en la que estos elementos clave fijan la temperatura media anual sobre la Tierra, pero también inspeccionaremos cómo la temperatura oscila continuamente en el espacio y el tiempo, lejos de un estado estacionario.

Albedo y gases de efecto invernadero

El Sol está tan caliente (unos 5600 °C) que irradia a longitudes de onda relativamente cortas (con su máximo en 0,5 μm), que pueden atravesar la atmósfera y llegar a la superficie de la Tierra. Sin embargo, la Tierra recibe solo una fracción muy pequeña de la radiación solar incidente –el factor de visión Tierra-Sol, o fracción del cielo abarcada por la Tierra, es muy pequeño (alrededor de $2{,}2\times10^{-5}$)– de modo que la temperatura de la Tierra es mucho menor, y su radiación tiene longitudes de onda mucho más largas (alrededor de 10 μm).

Como consecuencia, los gases de efecto invernadero radiativos pueden bloquear la emisión que sale de la Tierra, causando el calentamiento de la atmósfera. La atmósfera entonces divide su radiación de onda larga en dos mitades, una dirigida hacia el espacio y otra hacia la Tierra, calentando aún más su superficie (figura 1). El resultado es que la Tierra aumenta su temperatura hasta alcanzar un valor para el cual la radiación entrante de onda corta y la mitad de la radiación de la atmósfera son iguales.

Sin embargo, esto es solo parte de la historia, ya que no toda la radiación solar es absorbida por la superficie de la Tierra. Parte de ella se refleja de vuelta al espacio por la atmósfera o por la superficie de la Tierra (figura 1). Esto se llama albedo planetario, con un valor global de cerca del 30% pero variando desde aproximadamente un 25% en el trópico, caracterizado por selvas oscuras y aguas profundas en mar abierto, hasta un 65% en latitudes altas, con abundante hielo reflectante y nieve.

En ausencia de gases de efecto invernadero y suponiendo un albedo igual a cero, la temperatura media de toda la Tierra sería de unos 5,6 °C, mucho menor que su temperatura media actual de unos 15,0 °C. Este aumento de temperatura es causado principalmente por los gases de efecto invernadero, que superan en gran medida al efecto refrigerante del albedo.

Los cambios en estos equilibrios radiativos determinarán la evolución del clima en las próxi-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

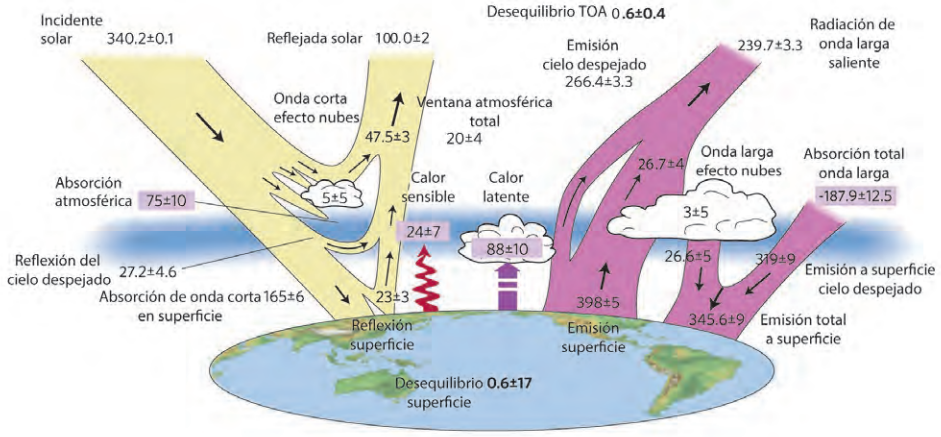


Figura 1. Principales procesos que controlan el balance energético global medio anual en la Tierra, para el período 2000-2010 (reproducido de Stephens *et al.* 2012). TOA representa la parte superior de la atmósfera y los valores representan flujos de energía por unidad de área, expresados en vatios m^{-2}. La superficie de la Tierra experimenta un desequilibrio de 0,6±0,17 vatios m^{-2} que está impulsando el calentamiento de nuestro planeta; este incremento en temperatura es regulado en gran medida por los océanos, que absorben cerca del 90% de este exceso de energía.

mas décadas. Las predicciones para finales del siglo XXI indican que el aumento de los gases de efecto invernadero provocará un mayor bloqueo de la radiación de onda larga en la atmósfera. Este aumento y, en menor medida, la disminución del albedo polar, aumentarán la temperatura media de la Tierra. Dependiendo del escenario de emisión de gases de efecto invernadero, esta temperatura media probablemente alcanzará entre 16,8 °C y 18,3 °C (Roca y Pelegrí 2020).

Corrientes oceánicas y vientos atmosféricos

Las regiones tropicales, donde la radiación solar llega casi perpendicularmente a la superficie de la Tierra, reciben la mayor cantidad media anual de calor por unidad de área, que debe distribuirse a otras regiones de la Tierra. En ausencia de océanos y atmósfera, este calor solo podría transferirse a través de la conducción a lo largo de la litosfera. Esto sería extremadamente ineficiente, con un transporte latitudinal de tan solo del orden de 10^4 vatios. Si consideramos la presencia de océanos y atmósfera, pero sin corrientes ni vientos, la transferencia de calor latitudinal solo aumentaría a unos 10^6-10^7 vatios. Para tener el transporte latitudinal observado, del orden de 6 PW (6×10^{15} vatios), necesitamos la presencia de vientos y corrientes.

Los océanos y los vientos comparten aproximadamente a partes iguales el transporte de calor latitudinal a latitudes bajas, pero los vientos dominan en latitudes intermedias y altas. Sin embargo, debido a la alta capacidad calorífica del agua, los océanos pueden almacenar unas 1000 veces más calor que la atmósfera. De ahí que los océanos sean el principal regulador del aumento de la temperatura global. De hecho, los océanos han incorporado alrededor del 90% de la anomalía térmica de la Tierra asociada con efectos antropogénicos, pero su temperatura promedio ha aumentado en aproximadamente solo 0,15 °C, que es diez veces menos que el aumento de temperatura promedio de 1,5 °C a nivel de la superficie del mar.

Variabilidad temporal

La Tierra, sin embargo, está lejos de un estado estacionario. Por el contrario, es una entidad pulsátil, que experimenta todo tipo de oscilaciones espacio-temporales, desde escalas globales hasta locales. Algunas de estas pulsaciones están guiadas por movimientos astronómicos, como sucede con los ciclos diurno y estacional. Sin embargo, otras variaciones son mucho más irregulares, ya que responden a la dinámica interna no lineal de un sistema muy complejo. En algunos casos, como en el ciclo glacial-interglacial,

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

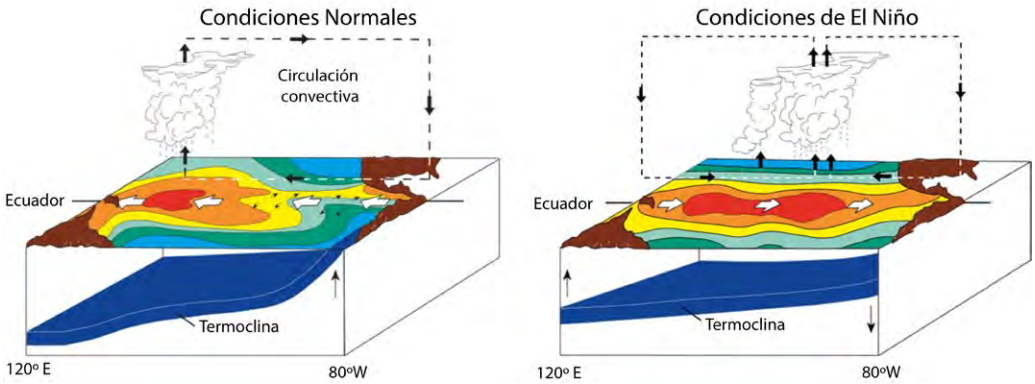


Figura 2. Temperatura superficial del mar (los colores rojizos/azulados representan aguas relativamente cálidas/frías) y corrientes (flechas blancas) durante condiciones normales y de El Niño; también se muestra la forma de la termoclina, que separa las aguas cálidas de la superficie de las capas intermedias y profundas frías. La contraparte atmosférica (conocida como Oscilación del Sur) afecta a los vientos próximos a la superficie y en altura (flechas negras), así como a los patrones de precipitación (adaptado de NOAA 2021).

el forzamiento astronómico se combina con mecanismos internos de retroalimentación para producir ciclos temporales asimétricos.

Una vez más, el océano juega un papel mitigador muy importante a diferentes escalas temporales, ya que incorpora calor durante el día o durante el verano y lo libera de nuevo a la atmósfera en la noche o durante el invierno. Sin embargo, el sistema es altamente no lineal, con múltiples mecanismos de retroalimentación. El intercambio de calor entre atmósfera y océano depende de la estructura de la columna de agua, que está ligada al régimen de vientos, que a su vez depende de la distribución de calor en las capas superficiales, y de retorno al intercambio de calor en la interfaz aire-mar. La figura 2 ilustra los principales elementos del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, que es uno de los ejemplos más notables de este mecanismo de retroalimentación océano-atmósfera (Rasmusson y Carpenter 1982).

La complejidad no lineal del sistema de la Tierra hace muy difícil realizar predicciones climatológicas precisas. En realidad, cuanto menores en tamaño y tiempo son las perturbaciones, menor es nuestra habilidad para hacer pronósticos fiables a medio y largo plazo. Por eso, por ejemplo, solo podemos predecir los patrones meteorológicos durante períodos inferiores a 10 días. Esta ventana de tiempo aumenta a varios meses cuando se trata de fenómenos de variabilidad interanual, como El Niño o la Oscilación del Atlántico Norte. A pesar de su carácter irregular, estas oscilaciones evolucionan sobre tiempos lo suficientemente largos como para permitir identificar cuándo y cómo se desarrolla un evento (Vallès-Casanova *et al.* 2020).

La perturbación antropogénica no es ni astronómica ni interna. Afecta tanto al albedo como a los gases de efecto invernadero, causando cambios significativos en el balance global de calor, y también perturba los patrones de circulación atmosférica y oceánica tanto regionales como globales. El océano, gracias a su extraordinaria capacidad de absorción de calor, sin duda está frenando y ralentizando estos cambios, dando a la humanidad la oportunidad de decidir qué planeta queremos dejar a las generaciones venideras.

Referencias

NOAA. 2021. https://celebrating200years.noaa.gov/transformations/climate/#program

Rasmusson E.M., Carpenter T.H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. Mon. Wea. Rev. 110: 354-384.

Roca J.M., Pelegrí J.L. 2020. Analysis of the planetary thermal distribution with a simple three-zone maximum-flux model. Int. J. Heat Mass Transf. 160: 120185.

Stephens G. L., Li J., Wild M., *et al.* 2012. An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. Nat. Geosci. 5: 691-696.

Vallès-Casanova I., Lee S-K., Foltz G. R., Pelegrí J. L. 2020. On the spatiotemporal diversity of Atlantic Niño and associated rainfall variability over West Africa and South America. Geophys. Res. Lett. 47: e2020GL087108

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14075

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

3.2. Base física de la producción primaria en los océanos

Josep L. Pelegrí, Dorleta Orúe-Echevarría, Anna Olivé Abelló, Ignasi Vallès-Casanova

La producción primaria se refiere a la síntesis de materia orgánica a partir del agua y el carbono atmosférico o acuoso, que se produce principalmente a través de la conversión de energía solar en energía química. La tasa de transformación de energía se denomina productividad primaria, expresada con unidades de carbono por área y tiempo (la productividad primaria bruta se refiere a la cantidad total de energía, pero parte de ella se utiliza para el automantenimiento de los organismos, incluida la respiración, lo que lleva a la producción primaria neta como la variable comúnmente utilizada). La producción primaria depende de la disponibilidad de luz, nutrientes (inorgánicos) y agua. En los océanos hay mucha agua, pero la luz y los nutrientes suelen estar limitados por diversos factores, en particular porque también dependen del propio nivel de producción primaria.

La radiación solar de onda corta no puede penetrar fácilmente en el océano, por lo que la producción primaria está restringida a las capas superficiales, lo que se denomina la zona fótica. Además, la penetración de la radiación solar depende de la concentración de fitoplancton en agua. Para una concentración moderada de clorofila de 1 mg m^{-3}, solo alrededor del 1% de la radiación solar total alcanza una profundidad de 40 m (0,1% a 60 m) (Talley *et al.* 2011). Asimismo, la cantidad de luz diaria cambia con la latitud y la estación. En las regiones tropicales, la duración de la luz del día no cambia sustancialmente de una estación a otra, pero en latitudes altas la luz se reduce mucho e incluso desaparece por completo en invierno, por lo que la producción primaria puede cesar.

Un nivel sostenido de producción primaria en las capas superficiales iluminadas por el sol requiere un suministro constante de nutrientes de las aguas subsuperficiales. En latitudes altas y durante el invierno, la producción primaria viene limitada por la baja insolación, lo que lleva a un aumento de los niveles de nutrientes en las aguas superficiales. Esto establece las condiciones adecuadas para el desarrollo de la floración primaveral, cuando se alcanzan niveles de insolación adecuados. En aguas tropicales y subtropicales, y en latitudes altas después de la primavera, la producción primaria sostenida requiere un suministro continuo de nutrientes, ya sea mediante mezcla vertical o mediante corrientes subsuperficiales cargadas de nutrientes que se acercan a la superficie del océano (Pelegrí *et al.* 2019).

Distribución espacio-temporal de producción primaria

La mezcla vertical inducida por el viento es el principal factor que regula la distribución vertical media de la producción primaria. El viento agita las aguas superficiales del océano, lo que lleva a la creación de una capa de mezcla en la parte superior de la columna de agua, típicamente de varias decenas de metros de espesor, donde se homogeinizan muchas propiedades (temperatura y nutrientes entre otras). La mezcla vertical también tiene otros dos efectos: incorpora los nutrientes de las aguas más profundas hacia las capas fóticas y es un agitador eficaz que eleva las parcelas de agua subsuperficial a las zonas más iluminadas por el sol. La temperatura es más alta y los nutrientes son más bajos en la

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

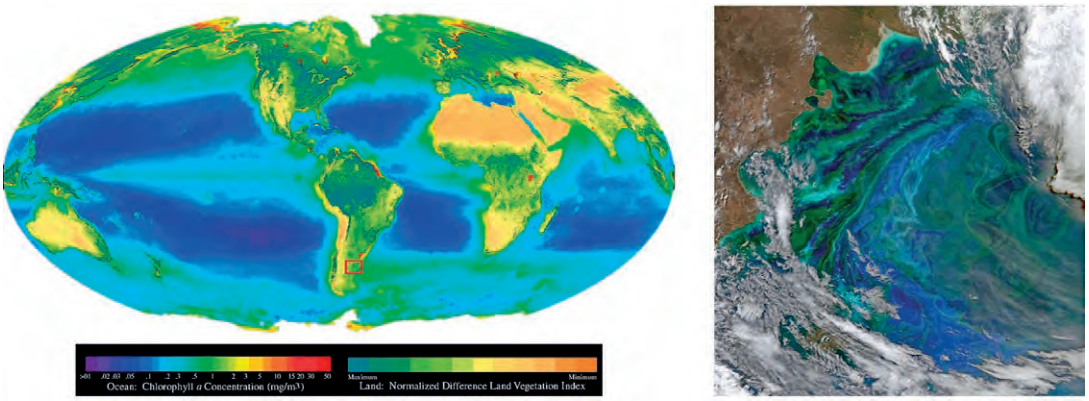


Figura 1. A, imagen clásica de la distribución promedio de clorofila en la superficie del mar derivada de SeaWIFS (enero de 1998 a diciembre de 2019) (NASA 2012), con el cuadrado rojo que muestra la ubicación de la Confluencia de Brasil-Malvinas (BMC). B, instantánea de falso color de una floración en la BMC el 2 de diciembre de 2014 (NASA 2014).

capa de mezcla superficial, con una fuerte disminución de la temperatura y un aumento de los nutrientes en la base de la capa de mezcla, que es lo que se suele denominar termoclina (estacional) y nutriclina. La productividad primaria aumenta en la nutriclina, simplemente porque esta ubicación vertical proporciona la combinación óptima de luz y nutrientes para la fotosíntesis, estableciendo la posición del máximo de clorofila profunda (o subsuperficial).

Además de las variaciones asociadas con la estacionalidad de la insolación en latitudes altas, la producción primaria cambia en el espacio y el tiempo de acuerdo con la rapidez con que los nutrientes llegan a la capa de mezcla superficial (figura 1). Generalmente, podemos decir que cuanto más rápido se suministren nutrientes a la capa superficial, mayor será la productividad primaria (aunque hay algunas excepciones, como en regiones subantárticas donde hay una carencia de hierro). En las regiones templadas y subtropicales, esto ocurre durante el otoño, ya que los vientos incorporan aguas ricas en nutrientes a una capa de mezcla superficial que se ahonda progresivamente.

En algunas regiones, el suministro eficiente de nutrientes a la capa fótica ocurre durante todo el año, ya que los vientos provocan la divergencia de las aguas superficiales, que luego se reponen a través del afloramiento o surgencia (advección ascendente) de las aguas subsuperficiales ricas en nutrientes. Esto ocurre especialmente en el límite oriental de los giros subtropicales (por ejemplo, en la región canaria de afloramiento), en las regiones ecuatoriales y en el océano Austral. También ocurre en las corrientes de frontera occidentales, como la corriente del Golfo, y su extensión hacia los polos en los giros subpolares. En el Atlántico Norte, esto da lugar a uno de los fenómenos más espectaculares de la naturaleza: la floración primaveral del Atlántico Norte. Cabe destacar que las aguas profundas se forman en estas regiones subpolares altamente productivas: las aguas que se hunden transportan grandes cargas de materia orgánica al océano abisal profundo, donde permanecerán el tiempo suficiente para que ocurra una importante remineralización y así aumente la concentración de nutrientes inorgánicos.

La producción primaria no solo cambia a escalas estacionales, sino que también experimenta fluctuaciones interanuales y de largo plazo. Un ejemplo digno de mención son los períodos glacial-interglacial. Durante los últimos tres millones de años, la Tierra ha cambiado entre períodos de menor y mayor energía, con un efecto sustancial en la producción primaria global. Durante los períodos interglaciares, se intensifican la formación de aguas profundas y la circulación global profunda, lo que conduce a una mayor remineralización profunda y un mayor suministro de nutrientes a la superficie del océano, ocasionando una mayor producción primaria mundial. Durante los períodos glacia-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

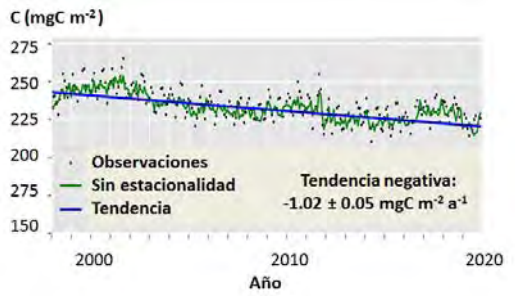


Figura 2. Valores mensuales medios de la productividad primaria neta global, con un ajuste lineal que muestra una tendencia negativa (Copernicus 2021).

res, la circulación global se debilita y hay menos nutrientes disponibles, por lo que la producción global disminuye (Pelegrí *et al.* 2013).

Efectos antropogénicos y el océano futuro

El principal efecto directo antrópico sobre la producción primaria es un aumento de la eutrofización, mediante la cual se agregan nutrientes al océano costero como resultado de las aguas residuales industriales o agrícolas, lo que puede conducir a la degradación y desoxigenación de los ecosistemas costeros y a la producción de floraciones de algas nocivas (Berdalet *et al.* 2022).

El cambio climático también tiene un efecto muy importante en la producción primaria, que actua de muy distintos modos. Una forma es mediante un mayor calentamiento de las capas superficiales, lo que conduce a una mayor estratificación vertical, inhibiendo la mezcla vertical y el suministro de nutrientes a las capas superficiales. Además, parece que los vientos medios en el océano abierto se están debilitando debido a gradientes latitudinales térmicos más débiles, lo que disminuye el hundimiento de las aguas superficiales en latitudes medias y la surgencia de aguas subsuperficiales en las regiones ecuatoriales y las altas latitudes. Otros factores son la disminución de la descarga de agua dulce, particularmente en las regiones subtropicales, y el debilitamiento de la circulación global profunda, que reduce el suministro de nutrientes a las latitudes altas.

En contraste, los vientos costeros parecen estar aumentando como resultado del mayor gradiente térmico entre las masas terrestres y oceánicas, lo que lleva a una surgencia más intensa en el margen oriental de las regiones subtropicales. Otros factores que favorecen la producción primaria son la pérdida estacional de hielo marino en latitudes elevadas, el aumento del transporte de polvo atmosférico y el incremento continuo de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera.

Las tendencias globales en la producción primaria son indicativas de una reducción sostenida durante las últimas dos décadas (figura 2), aunque las tendencias regionales muestran diferencias sustanciales. La evolución de la producción primaria en el futuro océano es difícil de predecir, no solo por la competencia entre los factores que controlan el suministro de nutrientes a la superficie del océano sino también debido a la dificultad de pronosticar los cambios en los patrones de estratificación y circulación. Las políticas equitativas y el desarrollo sostenible son las únicas vías que pueden garantizar un océano futuro saludable y productivo.

Referencias

Berdalet E., Arin L., Vila M., Viure L. 2022. Proliferaciones de organismos fotosintéticos: cara y cruz de los pilares de los ecosistemas marinos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 56-58.

Copernicus. 2021. Global primary production time series and trends (1998-2019). https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/global-ocean-primary-production-trend

Pelegrí J.L., De La Fuente P., Olivella R., García-Olivares A. 2013. Global constraints on net primary production and inorganic carbon supply during glacial and interglacial cycles. Paleoceanography 28: 713-725.

Pelegrí J.L., Vallès-Casanova I., Orúe-Echeverría O. 2019. The Gulf Nutrient Stream. In: Nagai T., Saito H., Suzuki K., Takahashi M. (eds.). Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamics, AGU-Wiley Geophys. Monogr. Ser. 243: 23-50.

Talley L.D., Pickard G.L., Emery W.J., Swift J.H. 2011. Descriptive Physical Oceanography, Elsevier, 564 pp.

NASA. 2012. SeaWIFS Global Biosphere. https://www.nasa.gov/topics/earth/features/plankton-study.html

NASA. 2014. Colorful and plankton full Patagonian waters. https://earthobservatory.nasa.gov/images/84870/colorful-and-plankton-full-patagonian-waters

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14076

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.3. Controles de la dinámica del fitoplancton en el mar Catalán

Marta Estrada, Miquel Alcaraz, Laura Arin

El mar Mediterráneo puede considerarse globalmente como oligotrófico, aunque presenta un conjunto de mecanismos de fertilización a diversas escalas espaciales y temporales. En este ensayo, revisamos algunos de estos mecanismos, que son responsables de situaciones de elevada biomasa y producción de fitoplancton en el mar Catalán.

Factores de fertilidad en el mar Catalán

En el Mediterráneo noroccidental, las corrientes marinas fluyen del NE al SO a lo largo de la costa catalana y vuelven hacia el NE cerca de las Islas Baleares. Este giro ciclónico deja una zona de divergencia en el centro, separada de las aguas costeras por frentes de plataforma-talud.

En invierno, el enfriamiento de las capas superficiales facilita la mezcla de la columna de agua y la entrada de nutrientes procedentes de aguas más profundas hacia la zona eufótica. En la cuenca Liguro-Provenzal, en el límite septentrional del mar Catalán, la elevación de las isopicnas en la zona de divergencia, en combinación con la pérdida de calor y la evaporación provocadas por vientos del norte intensos y secos, puede dar lugar a convección profunda y mezcla vertical del agua hasta el fondo, con introducción de nutrientes en las capas superiores y formación de aguas profundas que se extienden por la cuenca. La convección profunda es un importante motor de la dinámica y producción del fitoplancton, no solo a nivel local, sino también en zonas distantes de la cuenca. Por ejemplo, el 25 de marzo de 2005, la clorofila *a* superficial alcanzó 7 mg m^{-3}, uno de los valores más altos medidos en la región, y el 22 de marzo de 2009, con 2,3 mg m^{-3} de clorofila superficial (figura 1), la producción primaria integrada verticalmente (0-80 m) alcanzó 1800 mg C m^{-2} d^{-1} (Estrada *et al.* 2014).

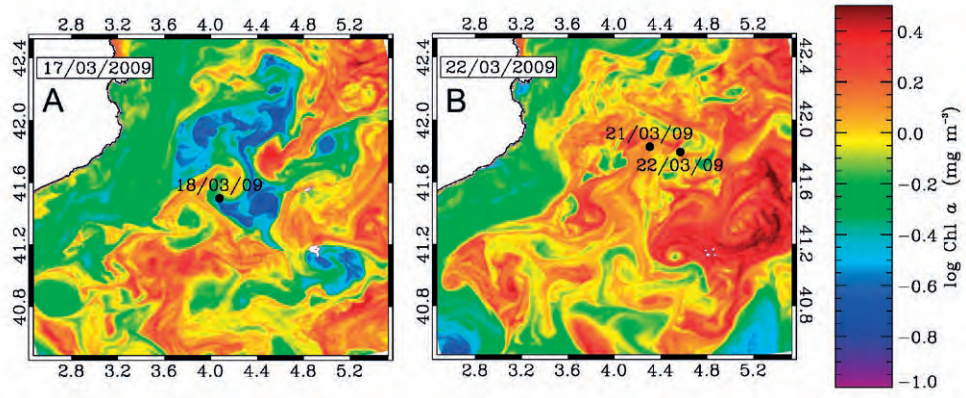


Figura 1. Imágenes de teledetección de la distribución de la clorofila *a* en el Mediterráneo noroccidental, el 17 (A) y el 22 de marzo de 2009 (B). Nótese el aumento de la concentración de clorofila *a* del 17 al 22 de marzo. La zona de baja clorofila *a* (azul) del 17 de marzo es el resultado de convección profunda. Los puntos negros indican las posiciones de las estaciones durante la campaña Famoso 1. Reproducido de Estrada *et al.* (2014), con permiso.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Entre finales del invierno y principios de la primavera, el aumento de la irradiación solar y el inicio de la estratificación térmica inducen el crecimiento de una intensa floración de fitoplancton en las aguas superficiales. Posteriormente, la estratificación se intensifica y se desarrolla un pronunciado gradiente de densidad vertical (la picnoclina) entre la capa superior de mezcla y las aguas más profundas. El crecimiento del fitoplancton agota los nutrientes (como el nitrato, el fosfato y el silicato) en la parte superior e iluminada de la columna de agua. En estas condiciones, el equilibrio entre los nutrientes que se difunden desde debajo de la termoclina y la disponibilidad de luz desde arriba conduce a la aparición de un máximo de fitoplancton y clorofila en profundidad, acompañado de acumulaciones de zooplancton (Estrada *et al.* 1993, Alcaraz *et al.* 2007). En la región de divergencia, la picnoclina es más superficial y la mayor disponibilidad de luz potencia el crecimiento del fitoplancton en el máximo profundo. A su vez, los frentes de plataforma-talud que bordean el giro presentan remolinos, meandros y filamentos que junto con la circulación ageostrófica (Estrada *et al.* 1999) pueden generar eventos de fertilización. A menudo, también se produce un pico de fitoplancton en otoño, cuando el enfriamiento del agua superficial erosiona la picnoclina.

Otras contribuciones importantes al enriquecimiento de nutrientes en el mar Catalán se originan en los aportes de agua continental y en la deposición atmosférica. En el noroeste del Mediterráneo, los ríos más influyentes son el Ródano y el Ebro; sin embargo, los vertidos de ríos más pequeños y los desbordamientos de aguas residuales, en particular después de las tormentas, pueden ser también localmente destacados.

La sucesión del fitoplancton

Las fluctuaciones de la biomasa de fitoplancton a lo largo del ciclo estacional están asociadas a marcados cambios en la composición de la comunidad. La sucesión de los grupos dominantes desde el pico de invierno-primavera hasta la estratificación estival ha sido caracterizada por Ramón Margalef en función de la intensidad de la turbulencia del agua y de la disponibilidad de nutrientes (Alcaraz y Estrada 2022). Los grupos de crecimiento rápido, como las diatomeas, dominan cuando la turbulencia y la concentración de nutrientes son elevadas, mientras que en aguas estratificadas y pobres en nutrientes son más abundantes los dinoflagelados, que son móviles y pueden migrar hacia arriba y hacia abajo en la columna de agua. Otros grupos, como los cocolitóforos, tienden a prosperar en situaciones intermedias. En las últimas décadas, nuevas metodologías para la caracterización de fitoplancton basadas en marcadores pigmentarios o en técnicas de genética molecular han proporcionado información sobre la distribución de taxones como las cianobacterias o muchos flagelados, que debido a su pequeño tamaño o a la falta de rasgos morfológicos distintivos no habían sido cuantificados adecuadamente en los estudios anteriores.

¿Qué podemos aprender de las series temporales a largo plazo?

Al igual que ocurre en tierra, existen fuertes fluctuaciones interanuales en los patrones de sucesión del fitoplancton a lo largo de un ciclo estacional. Además, el cambio global antropogénico puede interactuar con la variabilidad natural de maneras que aún desconocemos. Por lo tanto, para determinar los factores de cambio e identificar las tendencias a largo plazo se requiere la recopilación de series temporales largas de variables ecosistémicas ambientales y biológicas con una resolución adecuada.

Como contribución a estos objetivos, el Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) mantiene varias series temporales en aguas del mar Catalán. En el litoral de Barcelona, el Observatorio Oceánico Costero (https://coo.icm.csic.es/ca) mide varios parámetros en tiempo real y, desde marzo de 2002, realiza campañas mensuales para evaluar variables ambientales y biológicas. Esta serie a largo plazo ha proporcionado importantes conocimientos sobre el funcionamiento del ecosistema planctónico costero del mar Catalán. En este sentido, Arin *et al.* (2013) encontraron que la descarga fluvial fue la prin-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

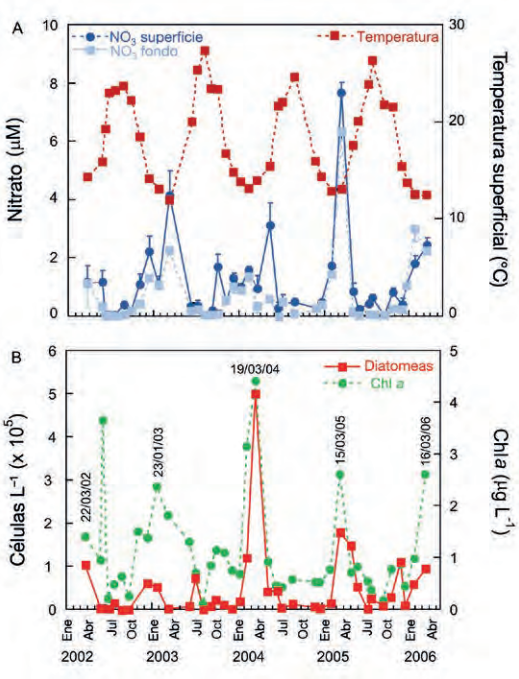


Figura 2. A, concentración de nitrato en superficie y en el fondo (mediana + desviación absoluta de la mediana) de 8 estaciones de muestreo del Observatorio del Océano Costero frente a Barcelona (marzo de 2002 a marzo de 2006) y ciclo anual de temperatura en superficie; B, clorofila *a* (Chl *a*) en superficie y abundancia de diatomeas durante el mismo periodo, en una estación representativa.

cipal fuente de nutrientes para los máximos de invierno-primavera de 2003 y 2004, mientras que los episodios de fertilización que alimentaron las floraciones de fitoplancton de 2005 y 2006 se debieron a la intrusión de aguas de alta mar asociadas a los fuertes eventos de mezcla de los inviernos inusualmente fríos y secos de estos dos años (figura 2). En la serie del Observatorio de la Bahía de Blanes (http://bbmo.icm.csic.es/), el estudio de catorce años (2000-2014) de muestras permitió caracterizar el ciclo estacional de los principales grupos de fitoplancton y mostró que, además de seguir el patrón general, las diatomeas y los prasinofitos (un grupo de flagelados) proliferaban en respuesta a la fertilización por escorrentía debida a las tormentas (Nunes *et al.* 2018). Esta serie también reveló una tendencia decreciente en la concentración de clorofila *a* que podría atribuirse a una reducción de la disponibilidad de nutrientes debida a las mejoras del tratamiento de aguas residuales en la zona.

Observaciones finales

El Mediterráneo ha sido considerado como un modelo reducido y más accesible de los océanos del mundo. De forma similar, el mar Catalán concentra muchos de los procesos ecológicos y socioeconómicos que ocurren en todo el Mediterráneo. La información procedente de estudios oceanográficos y series temporales en el mar Catalán y otras zonas marinas del mundo ayuda a revelar cómo las interacciones entre la variabilidad natural y la antropogénica influyen en el ecosistema pelágico y pone de manifiesto la importancia del seguimiento a largo plazo para mejorar las proyecciones futuras y las decisiones de gestión.

Referencias

Alcaraz M., Calbet A., Estrada M., *et al.* 2007. Physical control of zooplankton communities in the Catalan Sea. Prog. Oceanogr. 74: 294-312.

Alcaraz M., Estrada M. 2022. Turbulencia y dinámica del plancton en un océano más cálido. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 139-141.

Arin L., Guillén J., Segura-Noguera M., Estrada M. 2013. Open sea hydrographic forcing of nutrient and phytoplankton dynamics in a Mediterranean coastal ecosystem. Estuar. Coast. Shelf Sci. 133: 116-128.

Estrada M., Marrasé C., Latasa M., *et al.* 1993. Variability of deep chlorophyll maximum characteristics in the Northwestern Mediterranean. Mar. Ecol. Prog. Ser. 92: 289-300.

Estrada M., Varela R.A., Salat J., *et al.* 1999. Spatio-temporal variability of the winter phytoplankton distribution across the Catalan and North Balearic fronts (NW Mediterranean). J. Plankton Res. 21: 1-20.

Estrada M., Latasa M., Emelianov M., *et al.* 2014. Seasonal and mesoscale variability of primary production in the deep winter-mixing region of the NW Mediterranean. Deep-Sea Res. Pt I. 94: 45-61.

Nunes S., Latasa M., Gasol J.M., Estrada M. 2018. Seasonal and interannual variability of phytoplankton community structure in a Mediterranean coastal site. Mar. Ecol. Prog. Ser. 592: 57-75.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14077

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

3.4. El poder de los productores primarios unicelulares

Pedro Cermeño, Carmen García-Comas, Caterina R. Giner, Ramiro Logares, Cèlia Marrasé, Ramon Massana, Carlos Pedrós-Alió, Maria Montserrat Sala, Rafel Simó, Javier Tamames, Sergio Vallina

El fitoplancton marino, que incluye tanto a las cianobacterias como a las microalgas, domina la producción primaria en dos tercios de la superficie de la Tierra, sustentando prácticamente toda la vida marina y ejerciendo un control fundamental sobre el clima global mediante el secuestro de carbono en las profundidades del océano. Estos productores primarios unicelulares son responsables de aproximadamente el 50% de la producción primaria neta mundial, lo que equivale a producir cincuenta gigatoneladas de carbono orgánico (C) al año (alrededor de 140 millones de toneladas al día). El fitoplancton produce una cantidad enorme de C orgánico a pesar de representar solo el 1-2% de la biomasa fotosintética de la Tierra, lo que pone de manifiesto sus extraordinariamente altas tasas de renovación. Casi toda la biomasa del fitoplancton que se encuentra ahora mismo en los océanos del mundo se consumirá y se producirá nuevamente en aproximadamente una semana. A diferencia de los ecosistemas terrestres, donde la biomasa vegetal domina el paisaje (imagine una exuberante selva tropical), las comunidades marinas están dominadas por microorganismos heterótrofos, tales como bacterias, protozoos, ciliados y pequeños crustáceos, cuya biomasa global excede hasta en cinco veces la biomasa de los productores primarios marinos (Bar-On *et al.* 2018). Este patrón inverso de distribución de biomasa es una de las características más destacadas de los ecosistemas de plancton oceánico, los cuales dependen de la actividad de microorganismos heterótrofos para reciclar la biomasa fotosintética y reponer los nutrientes que necesita el fitoplancton para crecer. Este estrecho acoplamiento entre los productores primarios y los recicladores forma la conocida como cadena trófica microbiana (Azam y Malfatti 2007), que mantiene los ecosistemas de plancton oceánico cerca del estado estacionario. Sin embargo, en algunos casos, las corrientes oceánicas, la escorrentía continental o las tormentas de polvo, entre otros eventos, traen nuevos nutrientes a la superficie, impulsando la productividad primaria y alejando los ecosistemas de plancton del estado de equilibrio. Debido a que la producción primaria marina incorpora aproximadamente 6,6 moles de dióxido de carbono (CO_2) por cada mol de nitrógeno, la entrada de nuevos nutrientes a la capa iluminada del océano reduce la concentración de CO_2 disuelto en las aguas superficiales. La producción primaria «nueva» resultante, para diferenciarla de la producción primaria 'reciclada', pilla por sorpresa a los heterótrofos que no pueden consumir instantáneamente el exceso de producción primaria. Como resultado, la mayor parte de esta producción primaria «nueva» termina siendo exportada a las profundidades del océano. Este fenómeno, denominado bomba biológica, genera un déficit de CO_2 en la superficie del océano, que se compensa con la absorción de CO_2 de la atmósfera. De esta forma, la bomba biológica del océano ayuda a mitigar el efecto invernadero y a enfriar el clima de la Tierra.

Comprender el funcionamiento ecológico y biogeoquímico de los ecosistemas de plancton

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

es clave para aprovechar el poder de los productores primarios unicelulares en el desarrollo de soluciones que ayuden a abordar algunos de los desafíos actuales que enfrenta nuestra sociedad, como el calentamiento global o la escasez de alimentos. Debido a que muchas de estas soluciones requieren acelerar los procesos naturales, antes de explicar cómo los productores primarios unicelulares podrían contribuir a este reto global, comencemos por ilustrar cómo influenciaron la vida en la Tierra en el pasado geológico. En última instancia, el objetivo es condensar en décadas/siglos los cambios que la naturaleza tardó cientos de miles de años en lograr.

El poderoso plancton

Existen dos mecanismos capaces de aumentar el potencial biológico del océano para impulsar la producción primaria, alimentando las redes tróficas marinas y reduciendo la concentración de CO_2 en la atmósfera. El primero consiste en un aumento en la cantidad de nutrientes inorgánicos en las aguas de los océanos. Debido a que la producción primaria en muchas regiones del océano está limitada por la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo o hierro, un aumento en el suministro de nutrientes al océano habría impulsado la producción primaria oceánica global, así como la fracción de la producción primaria que habría sido transferida hacia niveles tróficos superiores y las profundidades del océano. El segundo mecanismo tiene que ver con cambios en la estequiometría de la biomasa de fitoplancton y del material detrítico con respecto a lo descrito por Alfred C. Redfield, quien encontró que las proporciones de carbono (C): nitrógeno (N): fósforo (P) toman valores relativamente constantes de 106:16:1 en todos los océanos del mundo, tanto en la biomasa de fitoplancton como en los nutrientes disueltos en las aguas profundas. Un aumento en estas proporciones elementales implicaría un aumento en la cantidad de C exportado por unidad de N o P que entra en la superficie iluminada del océano. Hay evidencia de que estos dos mecanismos han operado a lo largo de millones de años (Falkowski 2012), i) aumentando la producción primaria «nueva», ii) promoviendo la formación de vastos depósitos de petróleo y gas, y iii) ayudando a enfriar el clima de la Tierra.

El futuro del cultivo de microalgas

Nuestro profundo conocimiento de los ecosistemas marinos nos brinda, como científicos marinos, la capacidad de desarrollar soluciones inteligentes con las que abordar algunos de los actuales retos sociales y ambientales. Durante siglos, la agricultura convencional ha tratado de impedir el colapso de los cultivos, a menudo arruinados por plagas y enfermedades. Décadas de investigación agrícola han permitido el desarrollo de medidas de protección de cultivos que han dado como resultado rendimientos de producción previamente impensables. Por ejemplo, la productividad del maíz (es decir, la producción de maíz por unidad de tierra utilizada) se ha quintuplicado en los últimos ochenta

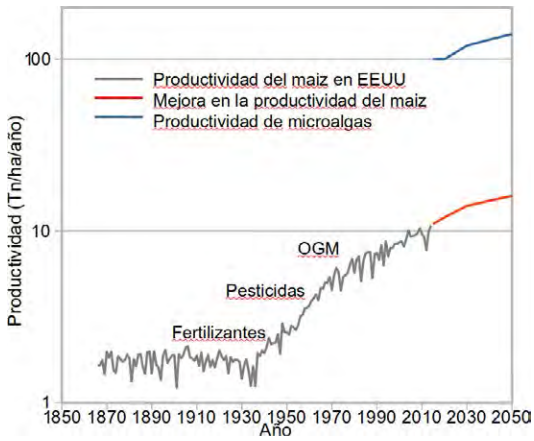


Figura 1. Productividad promedio del maíz en los Estados Unidos de 1866 a 2014, según los datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la FAO de las Naciones Unidas. La productividad (rendimiento) promedio del maíz en los Estados Unidos se mantuvo relativamente estable durante la década de 1800 hasta la década de 1930. En el período desde 1940, la productividad se ha multiplicado por más de cinco gracias a la mejora en los sistemas de riego, los fertilizantes, la mejora en el manejo de plagas y el desarrollo de organismos genéticamente modificados (OGM). La productividad de los sistemas de producción de microalgas es un orden de magnitud más alta que la productividad actual del maíz y se espera que aumenten sustancialmente a medida que la tecnología de cultivo de microalgas, actualmente subdesarrollada, mejore la productividad de las cepas y la resistencia a las plagas.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

años, gracias, en cierta medida, a los avances en el manejo de las plagas (figura 1). Los productores primarios unicelulares son de 3 a 4 veces más eficientes que las plantas terrestres a la hora de convertir la energía solar en biomasa y pueden lograr productividades por unidad de superficie hasta un orden de magnitud más altas (figura 1). Sin embargo, su uso como fuente sostenible de materia prima para la producción de alimentos, piensos o biocombustibles permanece sin explotar. El cultivo de microalgas utilizando aguas residuales o agua de mar tiene un potencial increíble para convertirse en una importante fuente de biomasa en el futuro, así como un eficiente sumidero del CO_2 resultante de los procesos industriales (Araújo *et al.* 2021). Sin embargo, el despliegue a gran escala del cultivo de microalgas adolece de los mismos problemas a los que la agricultura convencional se ha enfrentado durante siglos. Como se discutió en el párrafo inicial, los microorganismos heterótrofos pueden apoderarse de las comunidades de plancton en cuestión de días, lo que lleva al colapso de los sistemas de producción de biomasa de microalgas. Además, las cianobacterias y microalgas tienen enormes necesidades nutricionales (fertilizantes), lo que dificulta la expansión global del cultivo de algas para la producción en masa de productos básicos de bajo precio, como alimentos, piensos y biocombustibles. Proteger los cultivos de microalgas de los herbívoros, plagas y enfermedades, y encontrar formas de reabastecer los nutrientes y el CO_2 para mejorar, respectivamente, la producción primaria y la captura biológica de C es fundamental para que el cultivo de microalgas sea verdaderamente sostenible y rentable en las próximas décadas.

El advenimiento de nuevas tecnologías, como la genómica, ha permitido a los científicos marinos obtener una comprensión más profunda de cómo los productores primarios unicelulares prosperan, mueren y se descomponen en los ecosistemas naturales de plancton (Pedrós-Alió 2006). Este conocimiento nos proporciona información extremadamente valiosa para explorar formas de acelerar los procesos naturales y ayudar a i) proporcionar una fuente sostenible de biomasa y ii) reducir el CO_2 atmosférico emitido por la quema de combustibles fósiles, capturándolo en forma de compuestos orgánicos refractarios, tal como lo ha estado haciendo la naturaleza desde el origen de la fotosíntesis oxigénica hace unos dos mil quinientos millones de años. Del mismo modo que la agricultura representó un cambio trascendental en la historia de la humanidad y de nuestro planeta, la expansión del cultivo de microalgas desempeñará un papel crucial en la evolución de nuestra sociedad hacia un planeta futuro más habitable.

Agradecimientos. Las ideas plasmadas en este ensayo forman parte de los objetivos del proyecto PRODIGIO 'Desarrollo de sistemas de alerta temprana para la mejora de la producción de microalgas y la digestión anaeróbica'. El proyecto PRODIGIO ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención #101007006.

Referencias

Araújo R., Vazquez Calderon F., Sánchez López J., *et al.* 2021. Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. Front. Mar. Sci. 7: 626389.

Azam F. Malfatti F. 2007. Microbial structuring of marine ecosystems. Nature Rev. Microbiol. 5: 782-791.

Bar-On Y.M., Phillips R., Milo R. 2018. The biomass distribution on Earth. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 115: 6506-6511.

Falkowski P.G. 2012. Ocean sciences: The power of plankton. Nature 483: S17-S20.

Pedrós-Alió C. 2006. Genomics and marine microbial ecology. Int. Microbiol. 9: 191-197.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14078

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.5. Herramientas ómicas para la gestión de los recursos vivos y la protección de la biodiversidad de los océanos

Francesc Piferrer

Por herramientas ómicas se entiende un conjunto de tecnologías dirigidas al análisis y caracterización colectiva de grupos de moléculas, tales como el ADN, el ARN, las proteínas y sus modificaciones, presentes en los seres vivos (figura 1).

Una buena gestión de los ecosistemas oceánicos y el uso sostenible de los recursos marinos se puede beneficiar de las herramientas ómicas. Por tanto, no es extraño que entidades como la Administración Nacional de los Océanos y de la Atmósfera, una agencia del gobierno de los Estados Unidos, hayan depositado grandes esperanzas en ellas. Se prevé que su aplicación sirva para mejorar los sistemas de monitorización, supervisión y gestión de los recursos vivos y la conservación de la biodiversidad en un océano cambiante, todo encaminado a apoyar la Economía Azul (Godwin *et al.* 2020).

Seguidamente se dan unas breves pinceladas de cómo las herramientas ómicas se están utilizando cada vez más en la gestión de los recursos vivos, la identificación y protección de la biodiversidad de los océanos y cómo se pueden utilizar para identificar las consecuencias del cambio climático sobre la vida marina.

Aplicaciones a la pesca y la acuicultura

La genómica tiene gran potencial para la identificación de nuevas especies y variedades, lo que es muy relevante tanto para la pesca como para la acuicultura, donde hay mucha variabilidad genética todavía no bien caracterizada (Mohanty *et al.* 2019). En este sentido, el desarrollo de arrays de polimorfismos de un único nucleótido (SNPs, por sus siglas en inglés) para la mayoría de las especies de interés en acuicultura ya es una realidad, lo que posibilita ir un paso más allá de la selección genética clásica con lo que se conoce como la selección genómica, es decir, una selección basada en información proporcionada tras el examen de un conjunto de SNPs informativos distribuidos a lo largo de todo el genoma (Houston *et al.* 2020). Aplicaciones similares en pesca permitirán conocer con gran precisión la estructura genética de las poblaciones, lo que, junto con otras técnicas en desarrollo como el análisis del ADN ambiental (eDNA), permitirá un mejor conocimiento de los recursos de un ecosistema.

La epigenética integra información genómica y ambiental y puede explicar buena parte de la varianza fenotípica que no se explica por la varianza genética. Avances en epigenómica aplicada a la acuicultura han permitido identificar la base de la resistencia a enfermedades que no se pueden explicar genéticamente y el desarrollo de herramientas predictivas de sexo. Se prevé que próximamente habrá marcadores epigenéticos que puedan pronosticar el rendimiento de los cultivos bajo determinadas condiciones ambientales. En pesca, el examen de cambios en la metilación del ADN en determinados loci del genoma ha permitido desarrollar el primer reloj epigenético en peces (Anastasiadi y Piferrer 2020). La aplicación de estos relojes en especies de alto interés comercial, como el bacalao y la merluza, permitirá

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

determinar la edad de los peces sin necesidad del análisis de los otolitos, como se ha hecho hasta ahora.

La nutrigenómica es una variante de la transcriptómica que tiene por objetivo averiguar cómo la composición de los alimentos afecta la expresión génica y cómo esto influye a su vez al metabolismo y el crecimiento y la salud de los animales. Por otra parte, la proteómica y metabolómica tienen mucho interés en estudios encaminados a averiguar la composición del músculo, la parte más importante y comestible los peces. Otros avances fruto de la aplicación de herramientas ómicas incluyen la identificación de patógenos, resistencia a enfermedades y tolerancia al estrés.

Aplicaciones en biología de la conservación

Las herramientas ómicas son ideales para obtener una buena imagen del estado fisiológico de los organismos en función de los cambios ambientales. Así, la identificación de la contaminación acuática, ya sea debida a productos o contaminantes naturales, como las toxinas producidas por ciertos tipos de algas, o debida a contaminantes antrópicos, constituye una de las áreas donde más esfuerzos se están empleando. La biomonitorización, o monitorización utilizando organismos vivos como centinelas, es una forma habitual de determinar el estado de contaminación de los ecosistemas acuáticos. La

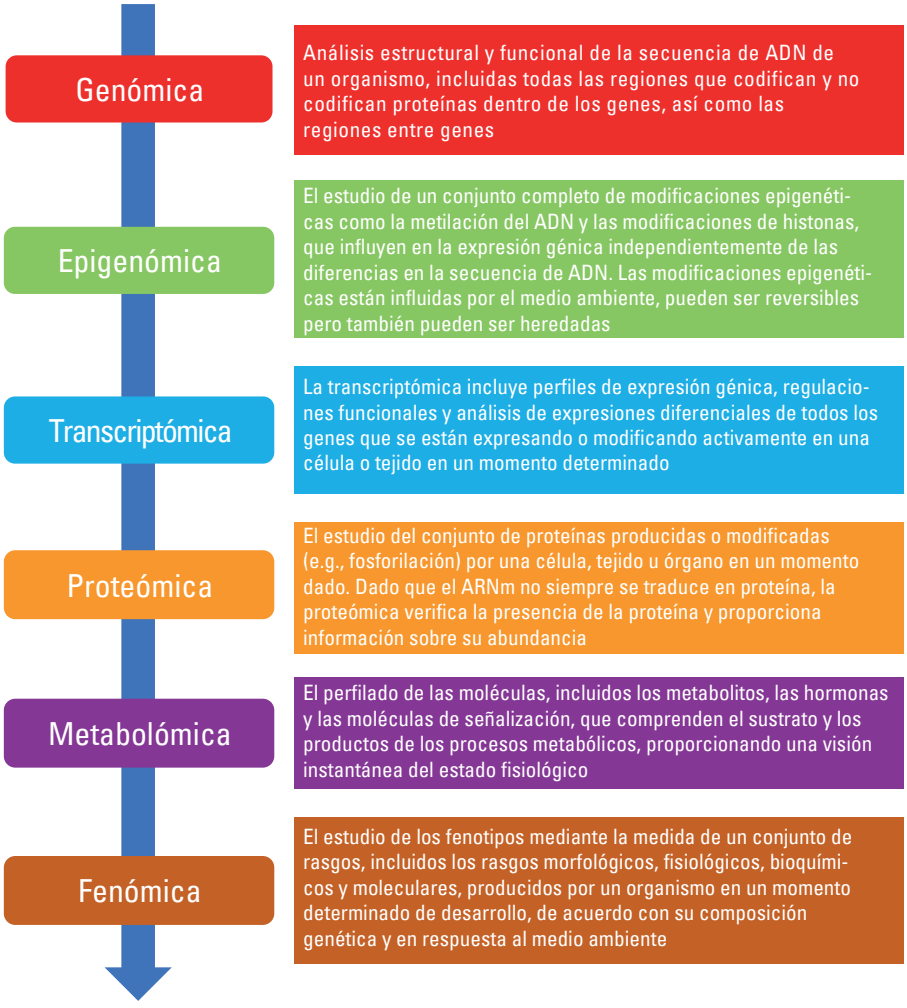


Figura 1. Las diferentes técnicas ómicas, su relación entre sí y una breve descripción de cada una de ellas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

incorporación de herramientas ómicas a programas de vigilancia ambiental no ha hecho más que empezar, pero tiene un gran futuro por su capacidad de poder incluir diferentes tipos de información hacia un objetivo común (Van Aggelen *et al.* 2010).

Finalmente, el poder integrador de las herramientas ómicas en dar una visión holística del estado de las comunidades, es un poderoso argumento para su utilización en la monitorización de los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas marinos.

Conclusiones y perspectivas

El progresivo abaratamiento del coste de secuenciación incrementará el número de genomas a nuestro alcance, que redundará en un mejor conocimiento de los recursos y la biodiversidad marina. Un reto importante es desarrollar nuevas herramientas para procesar las masivas cantidades de datos generados desde proyectos de secuenciación de genomas y su integración con datos fenotípicos. Combinar estas herramientas con estudios de asociación en todo el genoma (GWAS) permitirá identificar los cambios fenómicos (figura 1) más informativos con los subyacentes genómicos o de otro tipo.

Avances en el desarrollo de técnicas ómicas mejorarán la calidad y el coste de los datos biológicos obtenidos en comparación con las técnicas de observación tradicionales. Una vez se hayan aplicado diferentes herramientas ómicas para resolver un problema como, por ejemplo, cómo responde una especie o comunidad al calentamiento global, se podrán desarrollar marcadores compatibles con el análisis de un gran número de muestras en muy poco tiempo y a un precio muy asequible. Estos marcadores serán sin duda muy útiles en programas de vigilancia ambiental.

Por su propia naturaleza, la aplicación de herramientas ómicas al estudio de los recursos vivos y la biodiversidad de los océanos precisa de la recolección de un considerable número de muestras que pueda ser representativo de la especie, comunidad, fenómeno o zona geográfica de interés. Por lo tanto, uno de los retos más importantes es la gestión de la variación técnica y biológica. En esta estimulante y necesaria tarea hay que añadir la necesidad de formación de personal especializado en el uso de estas herramientas, con una visión pluridisciplinar de los problemas. En conclusión, hay un gran futuro en la aplicación de herramientas ómicas a las ciencias del mar, y bueno sería que se destinasen los recursos necesarios para su implementación.

Referencias

Anastasiadi D., Piferrer F. 2020. A clockwork fish: Age prediction using DNA methylation-based biomarkers in the European seabass. Mol. Ecol. Resour. 20: 387-397.

Goodwin K., Certner R., Arzayus F., *et al.* 2020. NOAA 'Omics White Paper: Informing the NOAA 'Omics Strategy and Implementation Plan.

Houston R.D., Bean T.P., Macqueen D.J., *et al.* 2020. Harnessing genomics to fast-track genetic improvement in aquaculture. Nat. Rev. Genet. 21: 389-409.

Mohanty B.P., Mohanty S., Mitra T., *et al.* 2019. Omics technologies in fisheries and aquaculture. In: Mohanty B.P. (ed.), Advances in Fish Research, vol. VII. Narendra Publishing House, Delhi, pp. 1-30.

Van Aggelen G., Ankley G.T., Baldwin W.S., *et al.* 2010. Integrating omic technologies into aquatic ecological risk assessment and environmental monitoring: Hurdles, achievements, and future outlook. Env. Health Persp. 118: 1-5.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14079

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

3.6. Bienestar animal en ciencias marinas

Mercedes Blázquez, Guiomar Rotllant, Roger Villanueva

El bienestar animal es un concepto que determina el modo en que los animales afrontan de forma óptima las condiciones en las que viven. En general, se considera que un animal está en buen estado cuando está sano, bien alimentado y es capaz de expresar su comportamiento innato sin sufrir ningún dolor, miedo o malestar. Sin embargo, demostrar si un animal experimenta dolor no es una tarea fácil. Es necesario determinar toda una escala de valores específica para cada grupo de animales y para cada etapa de desarrollo. En este ensayo nos centraremos en tres grupos diferentes; los peces marinos como representación de los vertebrados, los cefalópodos como modelos de invertebrados, ambos estrictamente regulados en materia de bienestar en los países de la UE, y los crustáceos, puesto que en breve serán sometidos a estas regulaciones. La razón por la que consideramos a estos grupos se debe a que en el ICM-CSIC se utilizan como modelos de investigación.

Consideraciones éticas en investigación animal: legislación

Los peces representan el grupo más diverso de vertebrados y su uso como modelo en biomedicina, ecología o producción animal ha aumentado considerablemente durante los últimos años. Además, su posición evolutiva al inicio de la radiación de los vertebrados, su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y sus similitudes a nivel molecular con otros vertebrados, incluidos los humanos, los convierten en excelentes modelos experimentales en disciplinas muy diversas. En muchos países, el uso de peces como animales de experimentación está estrictamente regulado e incluye recomendaciones en el caso de la piscicultura. Los estados europeos se rigen por la Directiva 2010/63/UE, modificada por el reglamento 2019/1010/UE. Además, algunos de estos países también cuentan con leyes específicas que pueden ser aún más restrictivas, como es el caso de España con el RD 53/2013. Los cefalópodos están sujetos a las mismas normas de bienestar de los peces desde 2013 en los países de la UE. Estos moluscos están considerados como unos de los invertebrados más avanzados. Poseen cerebros multilobulares relativamente grandes y un sistema nervioso desarrollados que sustentan un rico repertorio conductual y un mundo sensorial sofisticado. Los cefalópodos exhiben comportamientos cognitivos y espontáneos indicativos de la experiencia de dolor afectivo, y se debe aplicar el uso de cuidados y bienestar adecuados como analgésicos, anestésicos y sacrificio humanitario cuando sea necesario (Fiorito *et al.* 2015, Crook 2021).

La evaluación del dolor es fundamental para mejorar el bienestar animal. Sneddon *et al.* (2014) definieron dos conceptos clave para evaluar el potencial de dolor en taxones de invertebrados y vertebrados: 1) respuestas a estímulos nocivos que podrían afectar la neurobiología, fisiología y comportamiento animal, y 2) cambio en su estado motivacional. El estudio tiene en cuenta 17 criterios como indicadores de dolor en animales. Los crustáceos aún no están incluidos en la protección según la legislación de la UE en el momento de ser sacrificados, por considerarse que no presentan sufrimiento ni dolor. Sin embargo, la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) declaró que «Los grandes crustáceos decápodos tienen un comportamiento complejo y presentan cierto grado de conciencia. Tienen un sistema de dolor y una capacidad de aprendizaje considerable y todos los decápodos deberían recibir protección» (EFSA 2005). Los métodos de aturdimiento para los decápodos son obligatorios en Suiza, Nueva Zelanda, algunos estados australianos y están recomendados en Noruega. Teniendo en cuenta la

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Zona de Acuarios y Cámaras Experimentales (ZAE) del ICM-CSIC. A, vista general de la sala principal de la ZAE donde se lleva a cabo la experimentación animal. Algunas de las especies cultivadas y de interés pesquero son peces: dorada, *Sparus aurata* (B) y lubina, *Dicentrarchus labrax* (C), ambas especies prioritarias en la acuicultura mediterránea, y pez cebra, *Danio rerio* (D), utilizado como modelo de investigación de vertebrados en numerosas disciplinas; cefalópodos: sepia *Sepia officinalis* (E), pulpo, *Octopus vulgaris* (F), huevos de sepia (G); y crustáceos: cigala, *Nephrops norvegicus* (H), cangrejo ermitaño, *Dardanus arrosor* (I), y cangrejo real, *Calappa granulata* (J).

experimentación más reciente, los crustáceos decápodos cumplen los 14 criterios probados de los 17 anteriormente citados (revisado en Passatino *et al.* 2021). Por lo tanto, no parece existir un argumento convincente para descartar la capacidad de sufrir dolor en este taxón.

Técnicas humanitarias en investigación animal: el principio de las 3Rs

Todas las regulaciones y directivas de bienestar se basan en el principio de las 3Rs que tiene como objetivo reducir, refinar y, en última instancia, reemplazar el uso de animales que se utilizan con fines científicos. Este principio sienta las bases para la utilización de técnicas humanitarias en investigación. La *reducción* implica que en un procedimiento experimental se utilizará el mínimo número de animales necesario para obtener resultados reproducibles y estadísticamente fiables. El *refinamiento* consiste en la modificación de cualquier condición de alojamiento, cría o cuidado durante la vida de un animal con el fin de minimizar el posible dolor, angustia, sufrimiento o cambios fisiológicos, me-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

jorando su bienestar. El *reemplazo* incluye el uso de métodos que no involucran el uso de animales vivos. Este reemplazo puede lograrse mediante la utilización de técnicas alternativas como es el caso de los sistemas *in vitro* (tejidos y células), los sistemas *in chimico* (macromoléculas sintéticas), los sistemas *in silico* (modelos informáticos) y la prometedora bioimpresión 3D.

Compromiso del ICM con el bienestar animal

El bienestar animal está estrechamente ligado a las condiciones de alojamiento y mantenimiento de los animales. En este sentido, el ICM-CSIC se ha adherido al Acuerdo de Transparencia en Investigación Animal, en colaboración con la *European Association of Research Animals*. Todos los proyectos desarrollados en las instalaciones de la Zona de Acuarios y Cámaras Experimentales (ZAE, figura 1) que incluyen experimentos con vertebrados (peces y ranas), y cefalópodos, se adecúan a la Directiva de la UE que incluye la publicación tanto de los resúmenes no técnicos de los proyectos como de los resultados de las evaluaciones retrospectivas cuando el tipo de experimentación lo requiere. Los proyectos deben cumplir con la legislación nacional que establece las reglas básicas para la protección de los animales utilizados en experimentación y otros fines científicos, incluida la docencia. Es obligatorio que el personal que trabaja en la ZAE cuente con la formación y acreditación adecuadas para el desempeño de las distintas funciones, desde la realización de procedimientos experimentales hasta el diseño de proyectos, con animales de experimentación. Además, todos los experimentos necesitan tener la aprobación del Comité de Ética en Experimentación Animal del ICM y del Comité de Ética del CSIC que pueden formular recomendaciones sobre principios éticos y deontológicos relacionados con la investigación. Finalmente, los experimentos son revisados y aprobados por las autoridades locales que emiten un número de autorización para la realización del estudio. El compromiso del ICM con el bienestar animal es fundamental para un uso responsable de los modelos animales marinos. Frente a los desafíos de la investigación actual, el uso de animales no puede omitirse por completo, aunque la aplicación del principio de las 3Rs garantiza un trato humanitario. De hecho, los modelos animales se han utilizado para respaldar avances científicos en muchos campos de la investigación marina, en particular en temas de pesca y acuicultura como la reproducción, la nutrición, las enfermedades, la genética y la sostenibilidad de los recursos marinos vivos. La regulación ARRIVE *(Animal Research: Reporting In Vivo Experiments)* se desarrolló en 2020 para garantizar la transparencia, fiabilidad y reproducibilidad en la investigación con animales. Consiste en una lista de veintiún ítems, diez de ellos considerados esenciales, que deben ser incluidos en cualquier estudio con animales. Sin embargo, aunque estas pautas han sido avaladas por más de mil revistas científicas, su implementación, en particular la información relacionada con las condiciones ambientales de estabulación, aún debe mejorarse. La inclusión de pautas de métodos éticos para brindar protección a los animales durante la experimentación es importante no solo para asegurar un estándar apropiado de bienestar, sino también para mantener el apoyo de la ciudadanía a la investigación animal. Es una apuesta firme en el ICM-CSIC concienciar sobre el bienestar de los animales marinos y proporcionar todas las herramientas para la protección de estos modelos experimentales.

Referencias

Crook R.J. 2021. Behavioral and neurophysiological evidence suggests affective pain experience in octopus. iScience 24: 102229.

EFSA. 2005. Opinion of the Scientific Panel on Animal Health and Welfare (AHAW) on a request from the Commission related to the aspects of the biology and welfare of animals used for experimental and other scientific purposes. EFSA Journal 3: 292.

Fiorito G., Affuso A., Basil J., *et al.* 2015. Guidelines for the care and welfare of cephalopods in research - a consensus based on an initiative by CephRes, FELASA and the Boyd Group. Lab. Anim. 49: 1-90.

Passantino A., Elwood R. W., Coluccio, P. 2021. Why Protect Decapod Crustaceans Used as Models in Biomedical Research and in Ecotoxicology? Ethical and Legislative Considerations. Animals 11: 73.

Sneddon L.U., Elwood R.W., Adamo S.A., Leach M C. 2014. Defining and assessing animal pain. Anim. Behav. 97: 201-212.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14080

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.7. Contribución de los bivalvos a los servicios ecosistémicos del litoral

Montserrat Ramón, Eve Galimany

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las sociedades obtienen de los ecosistemas. Este concepto se originó en los años setenta del siglo xx y adquirió importancia cuando Naciones Unidas impulsó la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en 2005 (http://millenniumassessment.org). El objetivo de dicha evaluación fue analizar las consecuencias del cambio en los ecosistemas para el bienestar humano y promover las acciones necesarias para mejorar su conservación y uso sostenible.

La franja costera provee numerosos servicios ecosistémicos relacionados con la disponibilidad de hábitat, la educación ambiental y el ocio, la provisión de alimento y la mitigación del cambio climático, entre otros. Los moluscos bivalvos que allí habitan intervienen en importantes procesos ecológicos que contribuyen a la mejora de nuestra calidad de vida (Smaal *et al.* 2019).

Servicios de regulación

Los bivalvos actúan como reguladores del ecosistema contribuyendo al ciclo de nutrientes, creando y modificando el hábitat, previniendo la erosión costera y favoreciendo la biodiversidad (figura 1). La descarga de nutrientes a las aguas costeras, especialmente nitrógeno y fósforo procedente de las actividades terrestres, es un factor importante en el desarrollo de la eutrofización, fenómeno que desencadena el aumento de la producción primaria y la degradación de la calidad del agua. Los bivalvos marinos filtran partículas en suspensión y las transforman en tejido propio y biodepósitos (heces y pseudoheces) que se transfieren al bentos. Gracias a esta capacidad de filtración reducen la aparición de proliferaciones microalgales y aumentan la transparencia del agua, permitiendo una mayor penetración

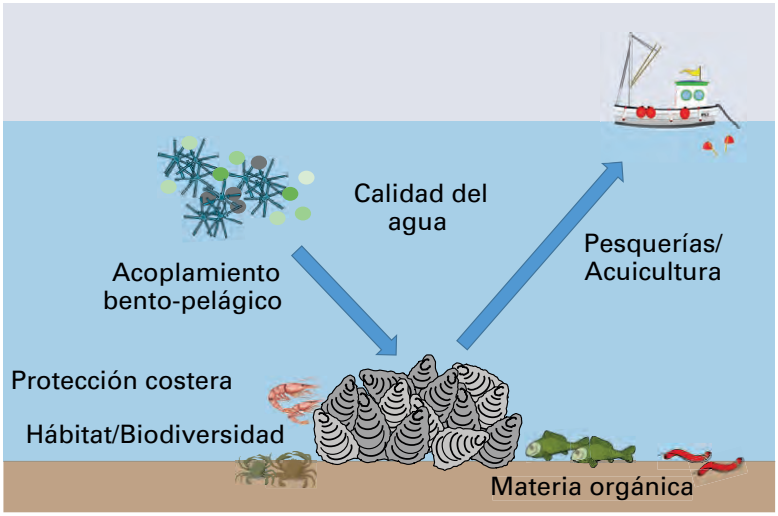


Figura 1. Diagrama de los servicios ecosistémicos de regulación aportados por los bivalvos.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 2. Agregaciones de mejillones *(Mytilus edulis)* en la plana mareal del mar de Wadden.

de la luz, lo que a su vez favorece la supervivencia de las praderas de fanerógamas. También reducen el déficit de oxígeno causado por la respiración nocturna del fitoplancton y por la sedimentación sobre el fondo de las proliferaciones fitoplanctónicas. Cuando la población de bivalvos es muy densa, la transformación del fitoplancton y la materia orgánica particulada en biodepósitos puede provocar condiciones hipóxicas o anóxicas sobre el fondo en zonas con poca circulación de agua. Estos desechos suelen tener altas concentraciones de nitrógeno orgánico que, una vez en el sedimento, son utilizadas por las bacterias desnitrificantes, de manera que se favorece la mineralización y regeneración de los nutrientes inorgánicos. La elevada capacidad de extracción de partículas orgánicas del medio que tienen las poblaciones de bivalvos, tanto naturales como cultivadas, se considera una solución basada en la naturaleza (SbN) para mitigar el exceso de materia orgánica de ecosistemas eutrofizados y mejorar la calidad de las aguas en zonas costeras (Galimany *et al.* 2017).

Por otro lado, las agregaciones de mejillones y los arrecifes de ostras constituyen estructuras tridimensionales complejas que influyen en la morfodinámica del fondo, en los hábitats circundantes y en las especies asociadas (figura 2). Estas bioestructuras ayudan a prevenir la erosión costera y son puntos calientes de biodiversidad, albergando altas densidades de invertebrados y proporcionando refugio a peces juveniles.

Servicios de abastecimiento

Los bivalvos también contribuyen a la producción de materia y energía de los ecosistemas. A lo largo de la historia los moluscos han estado presentes en la vida cotidiana de todas las civilizaciones. Los primeros grupos humanos asentados en la costa recolectaban moluscos para alimentarse, y en los yacimientos prehistóricos es habitual encontrar conchas utilizadas como herramientas, utensilios y ornamentos. Estos moluscos proporcionan una amplia gama de productos naturales basados tanto en su carne como en su concha. Su consumo es beneficioso para la salud al ser una carne baja en grasas y rica en proteínas, lípidos y minerales (sodio, potasio, fósforo, calcio, yodo, zinc y magnesio). Es uno de los alimentos que aporta más hierro a nuestra dieta (4,5 gramos por cada 100 de carne de mejillón) y una excelente fuente de lípidos de alta calidad al concentrar ácidos grasos omega-3. Se cree que la ingesta de ácidos grasos a través del consumo de bivalvos fue crítica en el desarrollo del cerebro y la evolución humana (Crawford 2002). Hay que destacar que los bivalvos se sitúan en un nivel bajo de la cadena alimentaria humana, y su cultivo no precisa del

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

empleo de piensos ni medicamentos pues aprovecha la productividad natural del medio en el que se desarrollan.

Además de alimento, los bivalvos nos brindan otros beneficios directos como materiales de construcción (áridos) y ornamentos (perlas, joyas). Algunas especies como los mejillones se anclan a sustratos duros segregando unos filamentos denominados biso. Estos filamentos están recubiertos por una cutícula proteica que les otorga notables propiedades mecánicas y una gran resistencia y adherencia. Su estudio ha estimulado el desarrollo de materiales biomédicos adhesivos para la reconstrucción de tejidos humanos.

Servicios culturales

El tercer tipo de servicios que proporcionan los bivalvos son los que obtenemos a través de su uso y disfrute, tales como el entretenimiento y el placer estético. La recolección de conchas es un hábito muy extendido entre las personas que pasean por las playas y los coleccionistas. Estas prácticas sin embargo ocasionan perjuicios medioambientales hasta el punto que en algunos países se ha prohibido su recolección. De manera análoga a los jardines terrestres, los «jardines de bivalvos» son una actividad reciente en la que mejillones y ostras se cultivan de manera comunitaria para consumo personal. En la costa este de EE.UU. estas prácticas se han desarrollado a partir de programas de restauración de los sistemas estuarinos degradados.

La sociedad está perdiendo los beneficios que obtiene de los bivalvos a medida que sus poblaciones desaparecen de nuestras costas. El declive de los bancos de bivalvos en el Mediterráneo es causado por la combinación de factores como enfermedades, sobreexplotación, contaminación, pérdida del hábitat, etc. (Baeta *et al.* 2014). Para mitigar esta pérdida se están llevando a cabo varias iniciativas. La *Native Oyster Network* junto con la *Native Oyster Restoration Alliance* (NORA) son dos redes interconectadas para favorecer la restauración de los bancos de ostras en Europa. Es necesario extender este tipo de proyectos mediante la rehabilitación del hábitat, la siembra de juveniles procedentes de cultivo y programas eficientes de manejo de stocks para recuperar las poblaciones de bivalvos y poder así seguir disfrutando de sus servicios.

Referencias

Baeta M., Ramón M., Galimany E. 2014. Decline of the *Callista chione* (Bivalvia: Veneridae) beds in the Maresme coast (northwestern Mediterranean Sea). Ocean Coast. Manag. 93: 15-25.

Crawford M.A. 2002. Cerebral evolution. J. Nutr. Health 16: 29-34.

Galimany E., Wikfors G.H., Dixon M.S., *et al.* 2017. Cultivation of the ribbed mussel *(Geukensia demissa)* for nutrient bioextraction in an urban estuary. Envir. Sci. and Tech. 51: 13311-13318.

Smaal A.C., Ferreira, J.G., Grant J., *et al.* (eds.). 2019. Goods and services of marine bivalves. Springer Open. 598 pp.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14081

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

3.8. Hacia el seguimiento y la recuperación de las especies afectadas por la pesca en ecosistemas marinos de aguas profundas: un esfuerzo conjunto entre biología y tecnología

Jacopo Aguzzi, Joan Navarro, Maria Vigo, Ivan Masmitja, Nixon Bahamon, José Antonio García, Guiomar Rotllant, Laura Recasens, Jordi Grinyó, Marc Carreras, Joaquín del Río, Spartacus Gomariz, Joan B. Company

Los océanos proporcionan importantes servicios ecosistémicos, siendo el suministro de proteínas uno de los principales beneficios para la humanidad. La actividad pesquera del Mediterráneo constituye hoy en día casi la mitad de todas las pesquerías de la UE y el uso de métodos de pesca de alto impacto ha convertido a esta actividad en una de las principales impulsoras de la degradación de los ecosistemas de aguas profundas (Puig *et al.* 2012). El arte de pesca de arrastre provoca la eliminación de sedimentos y pone en peligro los recursos vivos demersales y sus ecosistemas, y las especies de epi-fauna frágiles son reemplazadas por especies carroñeras o depredadoras y las especies longevas son reemplazadas por especies de vida corta. En el mar Mediterráneo, muchas poblaciones de especies comerciales que habitan hábitats demersales están siendo sobreexplotadas, lo que reduce los beneficios económicos de la pesca y los servicios ecosistémicos asociados a los aspectos culturales de algunas especies consideradas icónicas.

Ante esta situación, el uso de redes ecológicas de Áreas Marinas Protegidas (AMP), donde no se permite ningún tipo de actividad pesquera (es decir, zonas de exclusión pesquera) y con las cuales se asegura la conectividad del hábitat a escalas adecuadas de proximidad geográfica (Vigo *et al.* 2021). Si bien el objetivo principal de las AMP es la conservación de la naturaleza, también permiten la recuperación de los recursos pesqueros, incluida la frágil fauna sésil así como la restauración del hábitat.

Tecnologías de monitoreo ecológico no invasivo

El desarrollo de tecnologías de seguimiento no invasivo mediante videocámaras instaladas en observatorios submarinos cableados y modulares autónomos (desplegables desde barco) y las orugas móviles (Aguzzi *et al.* 2020), es cada vez más necesario para evaluar el progreso de los hábitats y la recuperación de las poblaciones de peces en las AMP y sus alrededores. Dichas tecnologías contribuyen a cumplir con los objetivos de la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina, encaminados a lograr un Buen Estado Ambiental. Se espera que esta tecnología de monitoreo ecológico, que opera de forma remota y autónoma (es decir, independiente de la asistencia humana), rastree los cambios en los siguientes descriptores que incluyen: biodiversidad, especies exóticas, poblaciones de peces, redes tróficas, eutrofización, integridad de los fondos marinos, condiciones

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

hidrográficas, contaminantes del agua de mar, contaminantes de los alimentos del mar, basura y energía.

Plataformas autónomas como complemento de los muestreos oceanográficos

En los últimos años, los enfoques robóticos marinos han permitido cada vez más un seguimiento económicamente rentable y de vanguardia de los ecosistemas bentónicos y pelágicos, de forma remota, a escalas diarias, estacionales y plurianuales. La tecnología de observatorios submarinos vídeo-cableados que adquieren datos oceanográficos y biogeoquímicos ha sido un elemento clave para monitorear los ecosistemas marinos (del Río *et al.* 2020). La recopilación de datos replicados espacialmente permite la extracción de indicadores ecológicos, cuantificando la eficiencia de la restauración, en términos de la abundancia y biomasa de especies (contando y dimensionando los individuos), así como la biodiversidad (compilando listas de especies y su uniformidad relativa). Sin embargo, el área de estudio está circunscrita al lugar de despliegue, y los costes de operación y mantenimiento de la tecnología submarina son considerables, lo que limita su uso. Además, el monitoreo de pesquerías se está utilizando para recopilar información sobre la biología de las especies explotadas, pero su manejo debe incluir el ecosistema completo para que sea efectivo (Aguzzi *et al.* 2020). Para superar estas limitaciones, se han utilizado plataformas independientes como complemento de los cruceros oceanográficos estándar a bordo de buques de investigación.

El papel de los vehículos submarinos autónomos para la recopilación de datos ecológicos

Recientemente, estas implementaciones se han utilizado mediante el uso de Vehículos Submarinos Autónomos (AUVs) (figura 1). Mientras que el uso de AUVs para estudios remotos de aguas profundas de larga duración es raro, un aumento en su autonomía en la navegación y las capacidades de recopilación y transmisión de datos puede aumentar su atractivo para amplias exploraciones marinas (Masmitja *et al.* 2020). Los científicos y los tecnólogos están comprometidos en el desarrollo de una plataforma modular espacialmente adaptable y no invasiva que consta de estaciones bentónicas independientes y conectadas de forma inalámbrica y AUVs para monitorear y mapear los ecosistemas marinos durante períodos prolongados bajo supervisión en tiempo real.

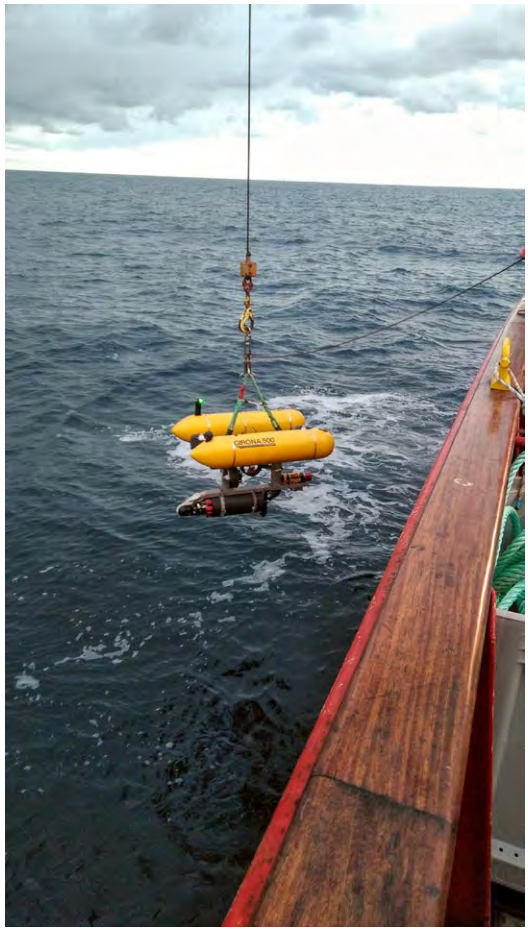


Figura 1. El AUV Girona 500 utilizado para rastrear cigalas *(Nephrops norvegicus)* a 400 m de profundidad en el noroeste del mar Mediterráneo.

Los AUVs podrían desempeñar un papel central para el seguimiento ecológico y de stock en una red recientemente establecida de AMP en el noroeste del Mediterráneo español (figura 2). Cuando se asocian con observatorios modulares autónomos e independientes, los AUVs permitirán la extrapolación de in-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

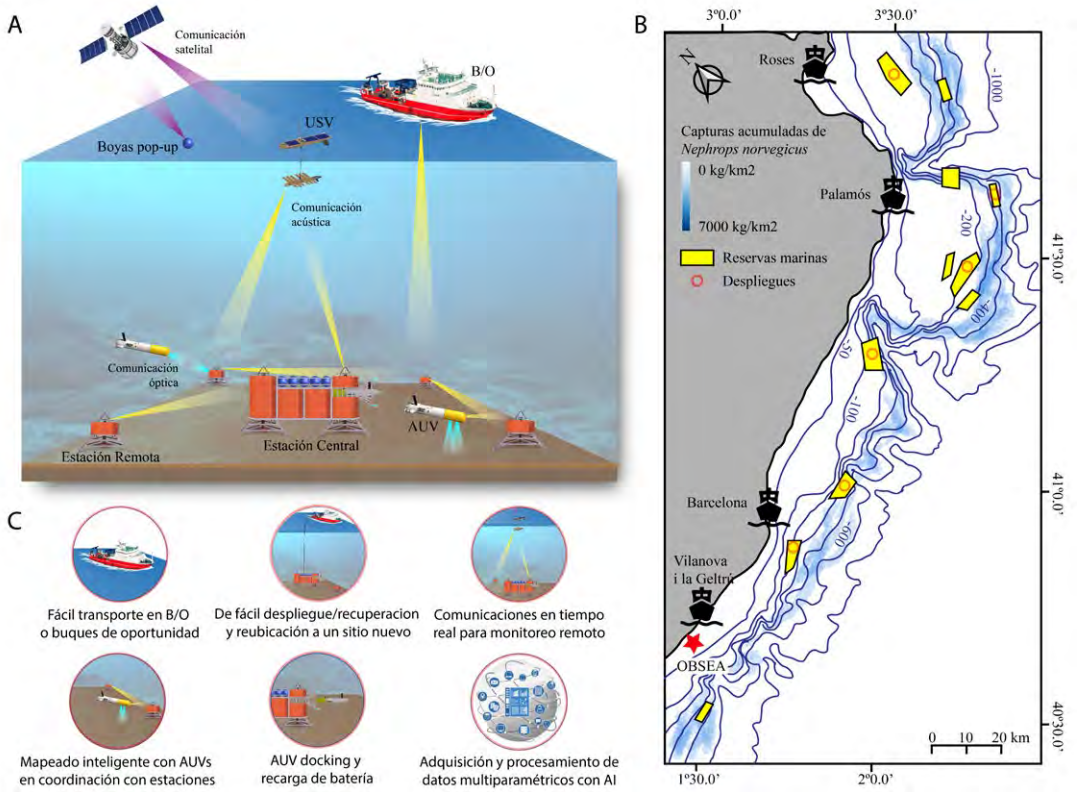


Figura 2. Red espacialmente adaptativa de estaciones bentónicas independientes y conectadas de forma inalámbrica entre sí y con AUV (A), diseñada para observar, monitorear y mapear inteligentemente los ecosistemas marinos durante períodos prolongados (B) con adquisición y trasmisión de datos en tiempo real (C).

dicadores biológicos y ambientales en cada zona, escalables a toda la red, para tener una visión geográfica global del sistema ecológico objeto de protección. Las redes de monitoreo de observatorios modulares y AUVs tienen el potencial de convertirse en una solución generalizada para la evaluación del impacto humano en contextos ecológicos muy diferentes y relevantes para la agenda de Crecimiento Azul. Es decir, para asesorar a las partes interesadas y a los responsables políticos en el logro de mares limpios, saludables y productivos en el contexto del crecimiento de actividades marítimas en las costas y en las aguas profundas).

Referencias

Aguzzi J., Chatzievangelou D., Marini S., *et al.* 2019. New high-tech interactive and flexible networks for the future monitoring of deep-sea ecosystems. Environ. Sci. Technol. 53: 6616-6631.

Aguzzi J., Chatzievangelou D., Company J.B., *et al.* 2020. Fish-stock assessment using video imagery from worldwide cabled observatory networks. ICES J. Mar. Sci. 77: 2396-2410.

del Río J., Nogueras M., Aguzzi J., *et al.* 2020. A decadal balance for a cabled observatory deployment. IEEE Access 8: 33163-33177.

Masmitja I., Navarro J., Gomariz S., *et al.* 2020. Mobile robotic platforms for the acoustic tracking of deep water demersal fishery resources. Sci. Rob. 5: eabc3701.

Puig P., Canals M., Company J.B., *et al.* 2012. Ploughing the deep seafloor. Nature 489: 286.

Vigo M., Navarro J., Masmitja I., *et al.* 2021. Spatial ecology of Norway lobster *(Nephrops norvegicus)* in Mediterranean deep-water environments: implications for designing no-take marine reserves. Mar. Ecol. Prog. Ser. 674: 173-188.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14082

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

3.9. Ciencia y recursos marinos vivos: hacia un futuro diferente

Francesc Sardà, Isabel Palomera

La sostenibilidad de las poblaciones explotadas de los recursos marinos ha sido ampliamente estudiada desde principios del siglo pasado. El efecto de las dos guerras mundiales hizo avanzar la denominada dinámica de las poblaciones aplicada a la pesca. Durante las paradas forzosas de algunas flotas en el contexto de los conflictos bélicos, se pudo constatar cómo algunas poblaciones de peces se recuperaban de la explotación que habían sufrido anteriormente. Esto hizo que, sobre los principios dados por Hjort (1914) y otros, se desarrollaran los modelos sobre los que hoy en día se basan las propuestas de regulaciones científicas de las pesquerías mundiales.

Desde entonces, estos modelos se han aplicado a muchos mares y océanos del mundo. Concretamente han sido aplicados en el mar Catalán por miembros del antiguo Instituto de Investigaciones Pesqueras (CSIC) y más tarde, pero de forma continuada, por miembros del Departamento de Recursos Marinos Renovables del Institut de Ciències del Mar de Barcelona (CSIC). Desde los años setenta del siglo pasado los conocimientos sobre las pesquerías del Mediterráneo han ido avanzando con estudios sobre las biologías de las principales especies explotadas (crecimiento, reproducción y ciclos larvarios, alimentación, ecología, etc.).

El papel de la Ciencia

Encontrar los *puntos de referencia,* como indicadores para poder gestionar las pesquerías, ha sido la meta tecno-científica que permite determinar el *máximo rendimiento sostenible* y explotable anualmente de las poblaciones comerciales de peces, crustáceos y cefalópodos. La aparición durante los años ochenta de la tecnología digital ha permitido tener al alcance herramientas precisas para evaluar estas pesquerías y poder disponer y trabajar gran cantidad de información biológica y datos oceanográficos e, incluso últimamente, verlas bajo una perspectiva eco-sistémica con la aplicación de modelos globales y de producción (Coll y Palomera 1990). La tarea y rigor de la Ciencia en nuestro país ha quedado patente con el hecho de haber previsto y advertido de la sobre-explotación previa que ha llevado al colapso actual (Lleonart 1996).

Actualmente, con una pesquería mermada y una gestión fallida en gran parte de las poblaciones, cabe preguntarse cómo se puede encarar un futuro sostenible para estos recursos. Lo primero es reconocer lo que se ha hecho o no hasta ahora, para haber llegado a esta situación insostenible y, en segundo lugar, saber qué es lo que se debe rectificar (Sardà 2017).

Podemos decir que la Ciencia es, por definición y por método, la manera más objetiva e inteligible de anticipar la incertidumbre. A pesar de las investigaciones y advertencias científicas durante los últimos cincuenta años, las decisiones finales en los foros de pesca de gestión nacional e internacional en el Mediterráneo, nunca se han tenido en cuenta al menos de una manera prioritaria y efectiva (Cury y Miserey 2008) (salvo en contadas ocasiones como, por ejemplo, la prohibición de pescar con redes de arrastre a más de mil metros de profundidad).

Las propuestas de reducciones directas de flota y esfuerzos, así como otras medidas de control propuestas por los científicos, representaban un

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

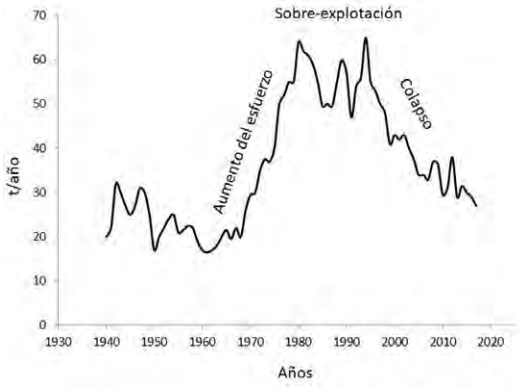


Figura 1. Evolución histórica de las capturas totales en Cataluña. El año 2020 no ha sido considerado por el posible efecto pandemia. Fuente: Servei de Pesca de la Generalitat de Catalunya.

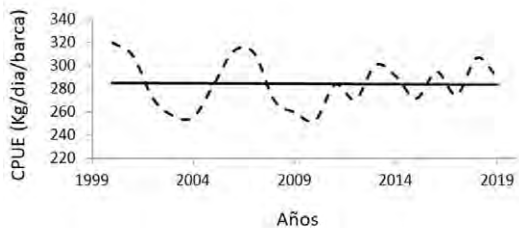


Figura 2. Evolución de la capturas por unidad de esfuerzo en Cataluña (CPUE) desde el año 2000 y línea de tendencia (horizontal). En el año 2020 no ha sido considerado por el posible efecto pandemia. Fuente: Servei de Pesca de la Generalitat de Catalunya.

estorbo para el desarrollo socio-económico del sector a corto plazo. En Cataluña el resultado está a la vista: un sector mermado a mínimos históricos, unas capturas escasas y una captura por unidad de esfuerzo (CPUE) que, pese a la reducción forzosa de la flota, aún no se recupera (figuras 1 y 2).

Se ha llegado a esta situación al valorar más el rendimiento económico de un sector ya subvencionado, y por el funcionamiento de una política electoralista, no haciendo caso a los científicos para lograr un rendimiento verdaderamente sostenible de la pesquería.

La política de parches, llevada a cabo hasta ahora, no ha sido efectiva. Si las ampliaciones de malla, la reducción de horarios, las limitaciones de profundidades, las vedas, las áreas protegidas, etc., no han logrado frenar el colapso actual es que las medidas tomadas han sido demasiado tímidas ante unas flotas sobre-dimensionadas en número y poder de pesca individual, aparte de un desarrollo tecnológico descontrolado e ignorado. Por otra parte, la administración se ha mantenido supeditada al sector extractivo para no incomodarlo, sin aplicar estrictamente las recomendaciones científicas.

Lo que se debería hacer

La Ciencia, con total libertad e independencia y en representación de la sociedad, es quien debe liderar las directrices de la recuperación fuera de las interferencias del sector o la Administración. Sin duda, el sector pesquero debe ser escuchado para que la Administración pueda gestionar la explotación técnica, económica y social del recurso, pero no pueden actuar como grupo de presión ante las decisiones técnico-científicas. Se han de otorgar licencias y establecer directrices bajo criterios absoluta y estrictamente científicos hasta llegar a ser un servicio público-privado de calidad, estable y duradero.

La Ciencia es quien debe determinar cómo, cuándo y de qué manera se explota el recurso para alcanzar la *producción máxima sostenible*. Y, por su parte, la Administración debe gestionar con el sector la manera de ajustar la pesquería a los indicadores bio-ecológicos, velando por no sobrepasar las capturas máximas sostenibles, redimensionando la flota, gestionando las vedas, ampliando áreas protegidas, compensando el desarrollo tecnológico, asumiendo las tareas de vigilancia y frenando la desinversión económica.

En «La Tragedia de los Comunes» (Harding 1968) explica que en un escenario de explotación de recursos compartidos, los usuarios, actuando de forma individual e independiente pero racionalmente en función de su propio interés, acaban comportándose contrariamente al interés común, llegando a agotar el mismo recurso que comparten. Por «Comunes», se entiende cualquier recurso compartido y no reglamentado o poco reglamentado, como la atmósfera, los ríos y océanos, las poblaciones de peces, bosques y selvas, etc. Un buen ejemplo de esto es cómo se ha llegado a la crisis global

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

actual provocada por el desarrollo industrial sin límites, a base de quemar combustibles fósiles, esquilmar los recursos minerales y destruir la biodiversidad. Incluso la pandemia actual del COVID-19 nos ha enseñado con creces el valor predictivo y resolutivo de la Ciencia.

Supeditar la recuperación de los recursos marinos a una Ciencia ineludiblemente vinculante e independiente, es la gran meta que se debe alcanzar en la próxima década para un desarrollo realmente sostenible de los recursos marinos vivos.

Referencias

Coll M., Palomera I. 1990. Hacia el estudio y la gestión pesquera basada en los ecosistemas. Ecología Política. Crisis global de la pesca. 32: 87-89. Editorial Icaria.

Cury Ph., Miserey Y. 2008. Une mer sans poissons. Calman-Lévy. 283 pp.

Harding G. 1968. The Tragedy of Comons. Science 162: 1243-1248.

Hjort J. 1914. fluctuaciones in the great fisheries of northern Europe viwed in the ligth of biological research. Rapp. P. v. Reun. Cons. int. Explor. Mar. 20: 228 pp.

Lleonart J. 1996. La pesca en Cataluña y su gestión. Butll. Inst. Hist. Nat., 64: 135-158.

Sardà F. 2017. La sostenibilidad de la pesca en Cataluña. Perspectivas desde la ciencia. 166 pp., Ed. Laertes. Barcelona.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14083

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

3.10. La primera cogestión pesquera en Cataluña: el caso de la pesca del sonso

Pilar Sánchez, Montserrat Demestre, Ana I. Colmenero

La pesca del lanzón la realizan tradicionalmente 25 embarcaciones artesanales repartidas por 6 puertos pesqueros de la costa norte de Cataluña (Barcelona, Arenys de Mar, Blanes, Sant Feliu de Guíxols, Palamós y L'Estartit). La «sonsera» es una red de cerco que se utiliza para capturar *Gymnammodytes cicerelus* y *G. semisquamatus* (Sabatés *et al.* 1990), conocida como «sonso». Los individuos de ambas especies de *Gymnammodytes* son peces forrajeros de vida corta que rara vez alcanzan los 15 cm de longitud y viven en fondos arenosos poco profundos (entre 5 y 10 m de profundidad) generalmente excavando en la arena.

«Sonsera» puede referirse tanto al arte como al barco (figura 1). La captura de esas especies no es posible con ningún otro método debido al tamaño de malla necesario para capturar la especie objetivo y una profundidad inferior a 50 m. Los barcos de pesca operan cinco días a la semana, yendo a pescar temprano en la mañana cuando los lanzones salen de sus agujeros. Los pescadores buscan cardúmenes de lanzón utilizando el sonido del eco, y después de uno a tres lances regresan al puerto para vender la captura. Ambas especies de lanzón pueden aparecer mezcladas en la captura que se destina íntegramente al consumo humano directo, ya que la especie es muy apreciada en la región.

El problema

En 2006, la Unión Europea adoptó el primer marco normativo integral sobre medidas técnicas y de gestión para los países europeos mediterráneos. Uno de los pilares de este reglamento era una disposición para la adopción obligatoria por los estados miembros de planes de gestión para algunas pesquerías realizadas dentro de sus aguas territoriales a más tardar en diciembre de 2007. Al mencionar específicamente las redes de cerco, esta disposición afectó directamente a la «sonsera». Además, el mismo reglamento incluyó medidas técnicas relacionadas con el tamaño de malla, la distancia mínima a la costa y las profundidades permitidas para las redes remolcadas, que también tienen impacto en las pesquerías. El tamaño de malla para los artes remolcados se estableció en julio de 2008 y se prohibió su uso dentro de las tres millas náuticas de la costa, aunque ambas medidas técnicas se beneficiaron de una excepción transitoria hasta finales de mayo de 2010. Además, ambas medidas podrían incluso beneficiarse de una derogación permanente si está debidamente justificada con pruebas científicas y en el contexto de un plan de gestión. Un requisito adicional indispensable para que los buques obtengan la exención posterior (distancia mínima a la costa) es tener un historial de dichas pesquerías de más de cinco años sin posibilidad de un aumento futuro del esfuerzo pesquero. Esta última medida tuvo un impacto crucial en el tamaño de la flota de pesca del lanzón en la región catalana, ya que resultó en una lista efectiva de veinticinco barcos autorizados a pescar estas especies.

El plan de gestión necesario para la pesquería que aborda las excepciones mencionadas se envió inicialmente a la Comisión Europea en 2010, y las versiones revisadas del plan en 2011. En enero de 2012, el plan fue rechazado debido a la falta de un estudio científico que respaldase las medidas propuestas y las excepciones. Por lo tanto, la pesquería fue considerada ilegal y obligada a cerrar, produciendo una gran crisis en el sector. Ante esta situación, los pescadores se acercaron a las organizaciones no gubernamentales (ONG), científicos

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Arte de sonsera. (Foto: Alba Rojas).

y las diferentes administraciones pidiendo apoyo. En abril de 2012 se constituyó por primera vez un Comité de Cogestión (Administración, pescadores de sonsera, científicos y ONG) como figura jurídica responsable de la ejecución del Plan de Gestión en Cataluña. La única pesquería autorizada de lanzón se dedicó a brindar la información necesaria para desarrollar el Plan de Manejo (Lleonart *et al.* 2014, Sánchez *et al.* 2013). Los científicos del ICM-CSIC fueron los encargados de realizar el estudio de investigación solicitado por la Comisión de la UE. Tras la aprobación de las autoridades competentes, el plan de gestión permitió la apertura de la pesquería comercial en la temporada de pesca de 2014.

En la actualidad, el Comité de Cogestión de Lanzón tiene varios objetivos a largo plazo: implementar el plan, controlar su implementación, monitorear los indicadores, ajustar la actividad pesquera de acuerdo con las reglas de control de captura y decidir las sanciones en caso de incumplimiento.

La cogestión

¿Por qué es tan importante la cogestión? La ordenación pesquera a través de la cogestión transfiere la responsabilidad a todas las partes interesadas involucradas en la pesca del lanzón. Bajo este enfoque innovador, las medidas de gestión, incluidas las medidas de seguimiento y control, son diseñadas conjuntamente por las partes interesadas. La plena participación del sector pesquero en el proceso de toma de decisiones es particularmente relevante ya que asegura su participación proactiva y compromiso genuino con la sostenibilidad (Nielsen et al 2004).

Este compromiso es fundamental para proporcionar un incentivo real para el cumplimiento riguroso de las normas de gestión. El enfoque también reconoce los valores sociales y culturales del sector pesquero y, por lo tanto, su larga tradición, particularmente relevante en las regiones costeras (Castilla y Defeo 2001).

El Comité de Cogestión del Lanzón recibió el Premio WWF al Mérito de Conservación en 2013.

Referencias

Castilla J.C., Defeo O. 2001. Latin America benthic shellfisheries: emphasis on co-management and experimental practices. Rev. Fish. Biol. Fish 11: 1-30.

Lleonart J., Demestre M., Martín P., *et al.* 2014. The co-management of the sand eel fishery of Catalonia (NW Mediterranean): the story of a process. Sci. Mar. 78S1: 87-93.

Nielsen J.R., Degnbol P., Viswanathan K.K., *et al.* 2004. Fisheries Co-Management-An Institutional Innovation? Lessons from South East Asia and Southern Africa. Mar. Policy 28: 151-160.

Sabatés A., Demestre M., Sánchez P. 1990. Revision of the familiy Ammodytidae (Perciformes) in the Mediterranean with the first record of *Gymnammodytes semisquamatus*. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 70: 493-504.

Sánchez P., Colmenero A.I., Demestre M, *et al.* 2013. Management plan for the boat seine «sonsera». Rapp. Comm. int. Mer Médit. 40: 759.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14084

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Josep-Maria Gili

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

4. Océano predecible

Marta Coll, Carolina Gabarró, David Casas

Cambio global, crisis climática, crecimiento sostenible, declive económico, crecimiento azul, acuerdo ecológico, colapso... son palabras habituales presentes en todos los foros sociales y científicos. Son conceptos que configuran el marco actual donde se han activado todas las alarmas, son auténticos avisos para nuestra supervivencia. Estas palabras evidencian que nos enfrentamos a grandes retos que tienen implicaciones en diferentes aspectos económicos, sociales y ecológicos de nuestras actividades.

Los sistemas terrestres tienen roles complementarios que contribuyen al equilibrio que necesitamos para mantener un planeta sano. En este contexto, el océano es un actor importante. Por ejemplo, el 40% de la población mundial vive en las zonas costeras, el océano regula el clima y produce parte del oxígeno que respiramos, y tanto los hábitats marinos como el fondo marino son grandes sumideros de carbono.

Todos los procesos geológicos, físicos, bioquímicos y ecológicos están íntimamente relacionados y pequeños cambios en una variable pueden producir importantes cambios en el sistema oceánico global. La gran incertidumbre sobre el funcionamiento del océano requiere continuar realizando un importante esfuerzo científico: la generación de conocimiento es clave para avanzar en nuestra capacidad de predecir la dinámica oceánica futura.

En este contexto, es esencial mejorar la exploración y comprensión de los elementos que controlan los cambios en el océano y sus relaciones con la atmósfera y la criosfera, y especialmente en relación con el cambio climático. Esto requiere conocimientos de los océanos que van desde la costa hasta las llanuras abisales, incluyendo las condiciones oceánicas pasadas, actuales y futuras, y desde los organismos más pequeños hasta los más grandes.

Un océano predecible permitirá a la sociedad adaptarse y responder a sus condiciones cambiantes. Una comprensión completa de las interconexiones en los procesos oceánicos mejorará las predicciones necesarias para una sociedad resistente que afronte los retos del futuro.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.1. De mar para arriba: océanos, aire, nubes y clima

Rafel Simó, Martí Galí, Manuel Dall'Osto

«¿Dónde se halla, el agua prometida de Kane? Allí sobre el océano, en el aguacero de soslayo, en el Arco Iris, en las nieblas nacientes, en la lluvia de sangre, en la forma espectral de la nube. Allí está, el agua de la vida» (Sinclair 2019).

Los navegantes de la Polinesia llevan milenios mirando hacia arriba para encontrar el camino en el desierto del océano. Leen las estrellas, el vuelo de los pájaros, las formas y colores de las nubes, porque saben que mar y cielo son inseparables, que uno no se explica sin el otro.

También los oceanógrafos tenemos motivos sobrados para mirar hacia arriba. De la atmósfera llega la mayoría de la energía que moviliza el mar y la vida, sea en forma de luz y calor del sol, o de energía mecánica transmitida por el viento. El aire también suplementa algunos elementos esenciales para la vida, como el hierro o el nitrógeno; y, desgraciadamente, también deposita contaminantes de todo tipo. Asimismo, la atmósfera es receptora del aliento y el latido del mar. Ya se ha demostrado sobradamente que no podemos entender ni la composición ni la dinámica de la atmósfera si no entendemos la influencia que tienen en ellas los océanos: toman, transportan y retornan calor y gases de efecto invernadero, proveen la mayoría del vapor de agua, y emiten sustancias que regulan la reactividad y las propiedades ópticas (Brévière *et al.* 2015). Dado que todos estos procesos son fundamentos del clima, podemos decir que los océanos son un elemento esencial en la regulación del clima.

El aliento del mar vivo

El impacto de los océanos en la atmósfera y el clima se ve muy reforzado por la presencia de la vida. Lo que de otro modo habría funcionado a base de simples procesos de exhalación y disolución, de evaporación y precipitación, de salpicadura y deposición, de fotoquímica y de intercambio de energía entre fluidos diferentes, la vida lo convierte en una red complejísima de metabolitos, nutrientes, residuos de excreción, reciclajes, detritus. El aliento de un mar muerto sería fundamentalmente vapor, sal, dióxido de carbono y oxígeno, y el del océano vivo añade gases de azufre, nitrógeno, yodo, bromo, compuestos orgánicos –la mayoría aún desconocidos–, virus, bacterias y restos celulares (Simó 2011). Algunas de estas sustancias exhaladas por el mar hacen la atmósfera más o menos oxidante, o ácida, o participan en la destrucción del ozono. Otras devuelven a los continentes elementos importantes que de otro modo se irían perdiendo por efecto del lavado de la lluvia. Otras sustancias forman partículas atmosféricas, aerosoles, que intervienen en la óptica de la atmósfera y, por tanto, en el balance de energía del planeta (figura 1). Descifrar el aliento del mar y qué lo regula es uno de los retos más formidables de las ciencias del mar y del clima para los próximos años.

Aerosoles y clima

A pesar de que los aerosoles han despertado siempre el interés científico, éste se ha multiplicado en los últimos años. En buena parte porque respirar bien, de forma eficiente y sana, es una de las funciones que más necesitamos. Los aerosoles, el polvo del aire, no los vemos como vemos las aguas sucias y la basura, pero sabemos que nos traen contaminantes, alérgenos y vectores de

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

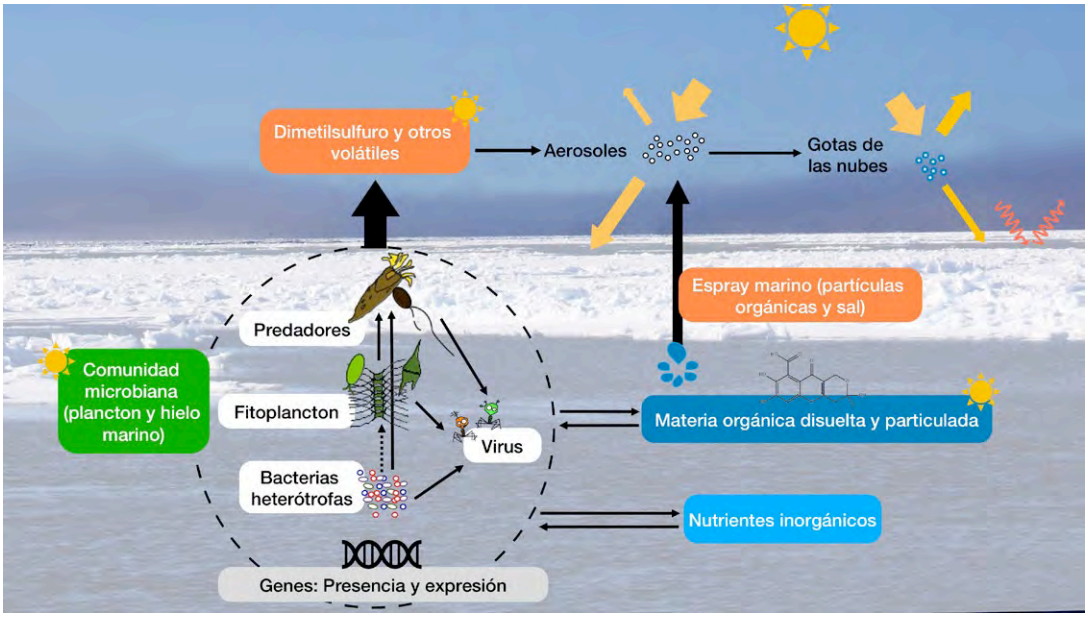


Figura 1. El aliento del mar: además de intercambiar calor, CO_2, O_2 y vapor de agua, el mar emite al aire sustancias que intervienen en la química de la atmósfera, en la formación de partículas (aerosoles) y como semillas para la formación de las nubes. Muchas de estas sustancias son producidas por el plancton y, según en qué ecosistemas, también por la vida que habita el hielo, por las excreciones de los animales, y por los vertidos de los ríos.

enfermedades. Por ello se implementan medidas para la mejora de la calidad del aire en los ambientes donde vivimos y trabajamos. Por eso cada vez conocemos mejor cómo se forman y transforman los aerosoles. La crisis climática también ha ayudado a aumentar el interés por las partículas atmosféricas: el IPCC reconoce los aerosoles como la principal fuente de incertidumbre en las proyecciones del calentamiento global. Esto es porque son un agente climático muy potente; de hecho, son un agente enfriante del clima. Por un lado, oscurecen el aire, aunque sea de forma imperceptible, al absorber y dispersar una parte de la radiación solar; este efecto, llamado efecto directo, parece que está disminuyendo a medida que los humanos hacemos combustiones más eficientes y limpias, que emiten menos partículas. Por otra parte, los aerosoles tienen también un efecto climático indirecto, aún más potente: son indispensables en la formación de las nubes (Brooks y Thornton 2018). Desde finales del siglo XIX sabemos que, para que el vapor de agua condense para formar nubes, no solo se necesitan condiciones de saturación sino también partículas que actúen de «semillas» en torno a las que se formen las gotas, los llamados *núcleos de condensación*. Las nubes cubren dos terceras partes de la superficie de la Tierra, reflejan y filtran la radiación solar y, aunque también atrapan el calor que irradia la superficie del planeta, en conjunto son el principal factor de enfriamiento del clima, especialmente sobre los océanos; conocer su ciclo de formación y desaparición es una de las piezas más anheladas y escurridizas del rompecabezas de los modelos climáticos. Puesto que una nube formada sobre más núcleos de condensación es más enfriante y tiene mayor duración, sobran los motivos para investigar los aerosoles sobre los océanos, cómo son, de dónde salen, qué los regula, cómo devienen buenos núcleos de condensación, cómo responden a los cambios en el clima.

El rápido desarrollo de los instrumentos de medida de la abundancia, distribución de tamaños y composición química de los aerosoles está permitiendo describirlos en aires tan limpios como los marinos. Sabemos que predominan dos componentes: los cristales de sal levantados por el viento con las salpicaduras, las espumas y las burbujas, y el azufre proveniente de la actividad del plancton. La sal forma parte de

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

lo que llamamos *aerosoles primarios*, los que se incorporan al aire ya como partícula. Junto con la sal encontramos azúcares, proteínas y células enteras. El azufre es el componente principal de los *aerosoles secundarios*, los que se forman por conversión de gases en partículas y crecen por reacción y condensación de más gases. Lo acompañan compuestos de carbono, nitrógeno y yodo. En los estudios más recientes buscamos seguir el proceso de nacimiento de los aerosoles primarios y secundarios marinos, y determinar sus ingredientes (Brean *et al.* 2021). Simultáneamente a la investigación sobre los aerosoles, ponemos en juego los conocimientos adquiridos en el estudio de la genética, la fisiología y la ecología del plancton para entender los procesos biológicos que constituyen la base de la formación de los aerosoles marinos. Con toda esta información, pretendemos elaborar modelos numéricos de predicción de los aerosoles y las nubes. Mientras estos modelos están apenas en construcción, las aproximaciones estadísticas con datos de satélites orbitales nos ofrecen atajos para ir convirtiendo los resultados de nuestras observaciones locales en patrones regionales y globales (Galí *et al.* 2019). Después de todo, se trata de llegar a descifrar si los océanos vivos, con sus exhalaciones naturales moldeadas por millones de años, tienen capacidad de amortiguar el calentamiento global.

Referencias

Brean J., Dall'Osto M., Shi Z., Beddows D.C.S., Simó R., Harrison R.M. 2021. Open ocean and coastal new particle formation from sulfuric acid and amines in the Northern Antarctic. Nat. Geosci. 14: 383-388.

Brévière E.H.G., Bakker D.C.E., Bange H.W. *et al.* 2015. Surface ocean-lower atmosphere study: Scientific synthesis and contribution to Earth system science. Anthropocene 12.

Brooks S.D., Thornton D.C.O. 2018. Marine Aerosols and Clouds. Annu. Rev. Mar. Sci. 10: 289-313.

Galí M., Devred E., Babin M., Levasseur M. 2019. Decadal increase in Arctic dimethylsulfide emission. PNAS 116: 19311-19317.

Simó R. 2011. The role of marine microbiota in short-term climate regulation. A: C. Duarte (ed.), The Role of Marine Biota in the Functioning of the Biosphere. Fundación BBVA, Rubes Ed., Bilbao, pp. 107-130. ISBN 978-84-92937-04-2.

Sinclair M. (ed.). 2019. The path of the ocean. Traditional poetry of Polynesia. University of Hawaii Press, Honolulu, pp. 13-14. ISBN 9780824883881.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14087

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.2. Descifrando la recurrencia de los procesos sedimentarios marinos

Belén Alonso, David Casas, Gemma Ercilla, Ferran Estrada

Los procesos sedimentarios forman parte de la historia de nuestros océanos a lo largo del tiempo geológico. Estos procesos son los mismos desde hace varios millones de años y han dado lugar a una amplia gama de fenómenos geológicos recurrentes y su frecuencia depende del contexto geológico de la región. La recurrencia de estos procesos depende de si estos procesos se generan en condiciones geológicas estables o durante eventos geológicos convulsivos. Estos últimos hacen referencia a eventos extraordinariamente energéticos que afectan a una región, como pueden ser las erupciones volcánicas explosivas, grandes masas deslizadas, inundaciones catastróficas, grandes terremotos, y tsunamis gigantes. A continuación, se presenta la forma en la que los geólogos abordan la ciclicidad y la recurrencia de los procesos sedimentarios formulando algunas preguntas.

¿Cuál es el interés?

El interés que han despertado en los últimos tiempos los estudios sobre la recurrencia de los procesos sedimentarios marinos que incluyen desde flujos en masa, corrientes turbidíticas y corrientes de fondo, es para mejorar la comprensión de la evolución geológica de los márgenes

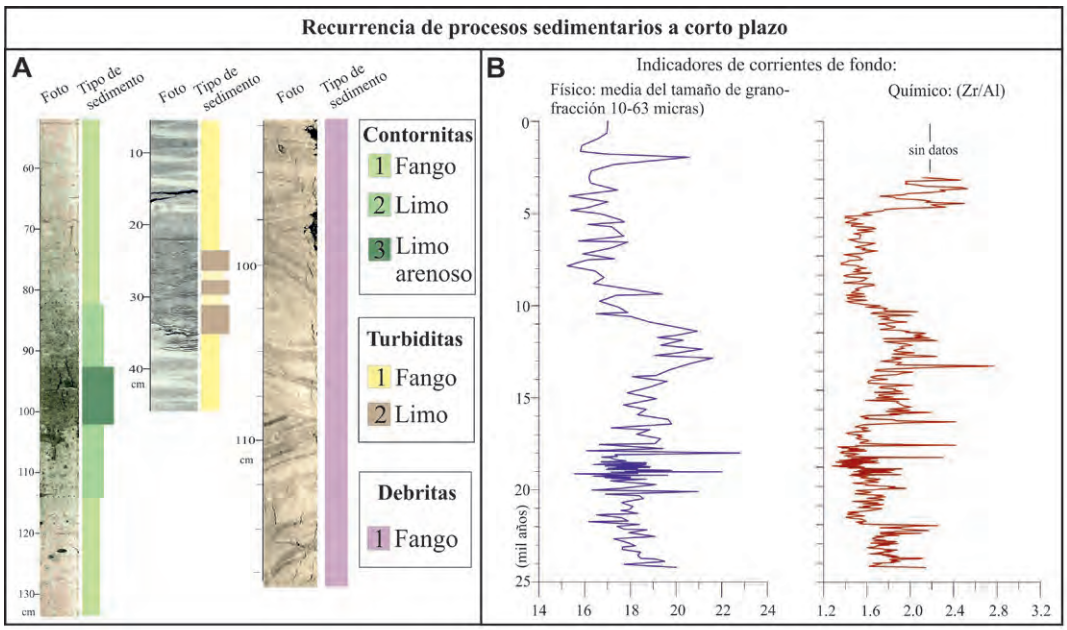


Figura 1. A, testigos de sedimento mostrando tres tipos de sedimentos marinos (contornitas, turbiditas y debritas; modificado de Alonso *et al.* 2016). B, registro de los cambios de corrientes de fondo durante los últimos 25 000 años.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

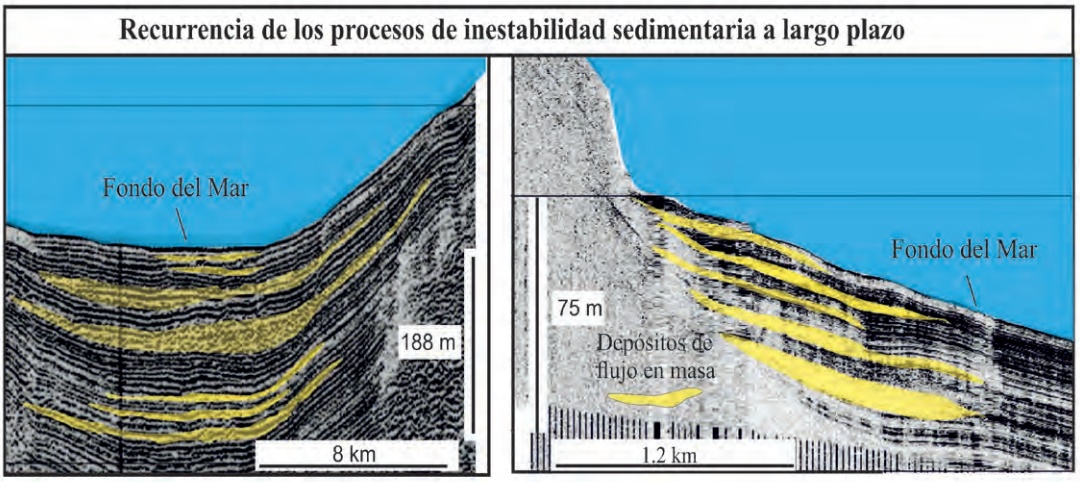


Figura 2. Perfiles sísmicos mostrando la recurrencia de los depósitos formados por flujos en masa durante el Cuaternario (2,6 millones de años) en el Mediterráneo Sur Occidental (modificado de Alonso *et al.* 2014).

continentales y cuencas de los océanos. Este tema es relevante también para identificar los peligros geológicos potenciales que pueden representar la recurrencia de eventos sedimentarios.

¿Cómo lo hacemos?

Para llevar a cabo el estudio de la recurrencia de procesos sedimentarios, los geólogos marinos decodifican los registros sedimentarios preservados en el fondo marino (márgenes continentales y cuencas). El conocimiento de los registros sedimentarios es alcanzado con el estudio de perfiles de sísmica y testigos de sedimento (figuras 1 y 2). Ambos tipos de imágenes geológicas son esenciales para identificar los tipos de sedimentos y además proporcionan información acerca de sus relaciones laterales con otros depósitos y de sus características granulométricas y composicionales. El segundo paso consiste en fijar la escala temporal de los procesos sedimentarios. Para ello, se pueden aplicar dos métodos: directo e indirecto. El método directo consiste en la cuantificación de la edad de las muestras de sedimento, siendo la datación isotópica de oxígeno y la datación por radiocarbono 14, los métodos más difundidos. El método indirecto posibilita determinar la cronología de los depósitos registrados en los perfiles de sísmica mediante la identificación y correlación de los límites sísmicos (horizontes) con las edades absolutas de testigos de sedimento. Complementarios con estas técnicas, herramientas invasivas (muestreo) de utilidad para conocer las características sedimentológicas y mineralógicas y no invasivas (escaneado en continuo de testigos de sedimentos) de utilidad para conocer las propiedades físicas y químicas, son utilizadas para interpretar los procesos sedimentarios y por lo tanto la integración de estos con la edad permiten calcular su recurrencia.

Los dos tipos de registros sedimentarios (testigos de sedimento y perfiles de sísmica) proporcionan información a dos escalas temporales: centenas a miles de años (figura 1B) y millones de años (figura 2).

¿Cuál es la recurrencia de los procesos sedimentarios en los márgenes Ibéricos?

En el mar de Alborán, se ha estimado que la recurrencia de los eventos relacionados con flujos en masa varía desde moderada (1 evento cada cuarenta mil años) a baja (1 evento cada ~trescientos mil años) siendo esta recurrencia la predominante durante el Cuaternario (2,6 millones de años, figura 2; Alonso *et al.* 2014). La recurrencia de estos eventos está estrechamente relacionada con los pulsos tectónicos y/o sísmicos que caracterizan la evolución geológica del NE de Alborán. Por otro lado, la recurrencia

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

de las corrientes turbidíticas fundamentalmente está relacionada con el transporte de sedimentos de los ríos a los cañones durante periodos de descenso del nivel del mar, o durante el ascenso del nivel del mar en el caso de que los cañones estén encajados en la plataforma continental y próximos a un río. Esta variabilidad hace que la frecuencia de los eventos sea muy amplia (desde miles a centenas de miles de años) y a veces con patrones impulsados por ciclos del nivel de mar 400, 200 y 100 mil años. En otros contextos geológicos, como el entorno del océano profundo del Banco de Galicia, en donde no existe la influencia del aporte fluvial, se ha descrito una recurrencia dominante de un evento turbidítico cada tres mil años (Alonso *et al.* 2008). Otro proceso sedimentario vinculado con la dinámica de corrientes de fondo está influenciado con la variabilidad y las tasas de cambios de masas de agua. En el Mediterráneo occidental se ha determinado una frecuencia alta de paleo corrientes de fondo (ejemplo: 1 evento cada 1900, 2300, 4000, y 6200 años; figura 1B; Alonso *et al.* 2021). Estos eventos se registran en las contornitas y estarían potencialmente vinculados a mecanismos de forzamientos tanto oceánicos como solares.

La Tierra y los océanos están en constante evolución y el tiempo geológico implica una enorme cantidad de años desde la perspectiva humana. Sin embargo, la ocurrencia de eventos geológicos instantáneos, incluso a escala humana, es posible, y es una probabilidad que no puede ser olvidada.

Referencias

Alonso B., Ercilla G., Casas D., *et al.* 2008. Late Pleistocene and Holocene sedimentary facies on the SW Galicia Bank (Atlantic NW Iberian Peninsula). Mar. Geol. 249: 46-63.

Alonso B., Ercilla G., Garcia M., *et al.* 2014. Quaternary Mass-Transport Deposits on the North-Eastern Alboran Seamount (SW Mediterranean). In: Krastel S., Behrmann J.-H., Volker D. *et al.* (eds). Submarine Mass Movements and Their Consequences. Chapter 50. pp. 561 -570.

Alonso B., Ercilla G., Casas D., *et al.* 2016. Gravity flow deposits vs contourite deposits and the sediment provenance of the Pleistocene deposits in the Faro Drift (Gulf of Cadiz): sedimentological and geochemical approaches. Mar. Geol. 377: 77-94.

Alonso B., Juan C., Ercilla G., *et al.* 2021. Paleoceanographic and paleoclimatic variability in the Western Mediterranean during the last 25 cal. kyr BP. New insights from contourite drifts. Mar. Geol. 437: 106488.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14133

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.3. Cartografiando el fondo marino: la resolución es la solución

Ferran Estrada, Gemma Ercilla, David Casas i Belén Alonso

La predictibilidad del fondo oceánico es uno de los grandes logros perseguidos por la Década de las Ciencias Oceánicas para el desarrollo sostenible, y ha sido uno de los principales objetivos del Institut de Ciències del Mar (ICM), a lo largo de sus 70 años de historia. La cartografía del fondo marino es un elemento clave para la comprensión del pasado, el presente y el futuro de los procesos geológicos submarinos y, por tanto, para la consecución de un océano predecible. Este logro aún está lejos de ser una realidad, ya que gran parte del fondo oceánico aún permanece inexplorado o su conocimiento se limita a imágenes de poco detalle. La resolución ha sido la solución para comprender la dinámica de los procesos sedimentarios y de las estructuras tectónicas. Esto se debe a que nos ha permitido cartografiar características previamente no descubiertas y mejorar nuestras observaciones anteriores con interpretaciones morfológicas más sólidas y fiables. El detalle de nuestros estudios, estrechamente ligados al desarrollo tecnológico, y la mejor comprensión de los procesos geológicos nos permite su modelización y predictibilidad.

Imágenes batimétricas del fondo marino: de baja a muy alta resolución

La precisión de cualquier medición geomorfológica depende de los datos en relación a la escala del objeto estudiado. En muchos casos, es posible realizar mediciones fiables de elementos de primer orden utilizando datos de batimetría multihaz de resolución media (a menudo montada en el casco del barco). Ejemplos de elementos de primer orden son: la longitud total de un sistema turbidítico o de sus canales y lóbulos principales; fallas y pliegues de primer orden, elementos contorníticos de gran escala o la presencia de inestabilidades sedimentarias. Sin embargo, muchos elementos morfológicos clave, de pequeña escala, pasan desapercibidos cuando se usan datos de baja resolución. Por ejemplo, formas de fondo indicativas de corrientes locales, la morfometría detallada de un deslizamiento para establecer los procesos involucrados en su generación o la identificación de cuñas sedimentarias derivadas de fallas para identificar períodos relativos de recurrencia.

Para ilustrar que en ocasiones la resolución es la solución, ver la figura 1 donde se muestran tres imágenes de diferente detalle (resolución) de la misma zona del talud en el margen continental de Garrucha, cercano al Cabo de Gata (Almería, SE de España). La imagen de menor resolución (figura 1B) está creada a partir de una malla de 667×667 m (base de datos GEBCO); la segunda (figuras 1A y C) a partir de una malla de 50×50 m (datos multihaz montados en el casco); y la tercera imagen (figura 1D) con una malla de 1×1 m, obtenida cerca del fondo marino desde un vehículo autónomo (batimetría multihaz AV). En cada caso, si la dimensión de una determinada estructura geológica está por debajo de la resolución utilizada, ésta pasará desapercibida para nosotros y, por tanto, nuestra interpretación será sesgada. En la práctica, el enfoque del problema de la resolución es principalmente una cuestión de equilibrio entre el tiempo y el espacio, es decir, la disponibilidad de tiempo de barco frente a la superficie del fondo marino que se va a investigar. Cuanto mayor sea el

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

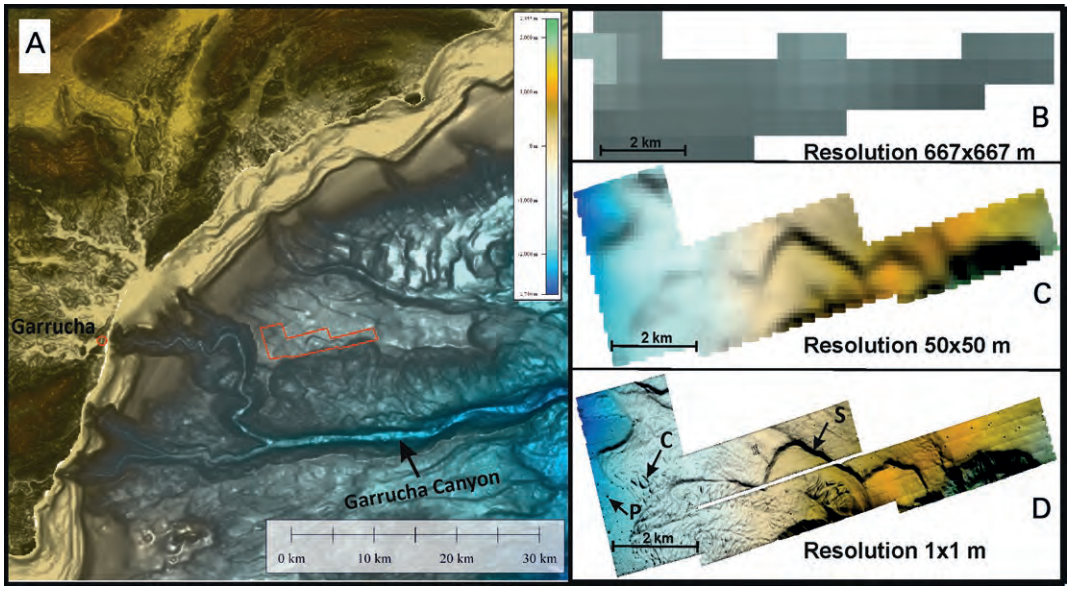


Figura 1. Nuestras interpretaciones dependen de la resolución de los datos. A, mapa batimétrico (50×50 m) del Cañón de Garrucha, Almería (España). El polígono rojo indica la zona de batimetría ampliada; B, base de datos GEBCO (resolución de la malla 667x667 m); C, batimetría multihaz montada en el casco del barco (50×50 m), proyecto FAUCES; y D, batimetría multihaz de vehículo autónomo (AV) (1×1 m). Nótese las pequeñas depresiones redondeadas de escapes fluidos (pockmarks, P) solo observadas en AV (d), y las crestas (c) relacionadas con bloques deslizados y escarpes (s) relacionados con cicatrices de deslizamiento no identificadas en la batimetría general del océano (GEBCO).

detalle, menor será el área investigada. Esto se debe a que, en general, primero reconocemos las principales características geológicas del área a estudiar a baja resolución priorizando la extensión recuperada en detrimento de la resolución. Una vez que se han reconocido los objetivos potenciales, el área investigada se reduce en aras de la resolución.

Alta resolución en la investigación geológica marina: una demanda social

A medida que ha ido incrementado el conocimiento de los procesos geológicos submarinos, principalmente aquellos que pueden afectar a la población y a sus infraestructuras, o los de interés económico o de ciencia básica, la predictibilidad se ha convertido en una demanda social que requiere estudios geomarinos de alta resolución.

Algunos ejemplos llevados a cabo en el ICM están relacionados con tipos de deslizamientos de talud que afectan el fondo marino y si son activos o no (Casas *et al.* 2011). El análisis estructural detallado ha permitido modelizar el tsunami asociado a una falla activa en el mar de Alborán y verificar el modelo de propagación, las áreas costeras afectadas, la altura y velocidad de la ola, el tiempo de llegada y el área de inundación (Estrada *et al.* 2021). La comprensión de la dinámica de los valles submarinos y su compleja jerarquía nos ha permitido ofrecer nuevos conocimientos sobre las características de los flujos turbidíticos y la definición de modelos análogos para comparar (predecir) con otras áreas (Ercilla *et al.* 2002, Estrada *et al.* 2005). La cartografía detallada de la extensión y de los cambios laterales entre cuerpos contorníticos, así como de las terrazas contorníticas, ha sido esencial para decodificar la circulación de masas de agua y para caracterizar sus capas inferiores cercanas al fondo marino.

La «resolución es la solución» es una estrategia que toma relevancia frente al enfoque de la Década de las Ciencias Oceánicas por un océano predecible y sostenible. Los casos planteados en este texto son algunos ejemplos entre una gran variedad de estudios llevados a cabo en el ICM pero no debemos olvidar que la tarea futura a la que nos enfrentamos es enorme y

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

requerirá un esfuerzo común de la comunidad científica y tecnológica para lograr un mejor entendimiento de los procesos geológicos y, por tanto, su modelización y predictibilidad.

Referencias

Casas D., Ercilla G., Yenes M., *et al.* 2011. The Baraza slide. Model and dynamics. Mar. Geophys. Res. 32: 245-256.

Ercilla G., Alonso B., Estrada F., *et al.* 2002. The Magdalena Turbidite System (Caribbean Sea): present-day morphology and architecture model. Mar. Geol. 185: 303-318.

Estrada F., Ercilla G., Alonso B. 2005. Quantitative study of a Magdalena submarine channel (Caribbean Sea): implications for sedimentary dynamics. Mar. Pet. Geol. Vol 22: 623-635.

Estrada F., González-Vida J.M., Peláez J.A., *et al.* 2021. Tsunami generation potential of a strike-slip fault tip in the westernmost Mediterranean. Sci. Rep. 11(1): 16253.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14088

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.4. *Mare salis intellegere*. Comprender la sal de los océanos

Nina Hoareau, Mikhail Emelianov, Joaquim Ballabrera, Carolina Gabarró, Verónica González-Gambau, Maribel Lloret, Estrella Olmedo, Marcos Portabella, Jordi Salat, Joaquín Salvador, Marta Umbert, Antonio Turiel

En 1987, el Prof. Fedorov, destacado oceanógrafo soviético de la época, dedicó una de sus charlas divulgativas a la salinidad del océano y la llamó «La Cenicienta de la oceanología dinámica». Fedorov decía que «El destino de la salinidad como parámetro físico está estrechamente relacionado con la dinámica de las aguas del océano y es muy similar al destino de la pobre Cenicienta del cuento de hadas de Charles Perrault. Y, como el destino de la pobre Cenicienta, hace tiempo que la salinidad clama justicia».

De hecho, históricamente, las observaciones de salinidad han sido menos valoradas que otros parámetros físicos del océano tales como temperatura, corrientes, oleaje o nivel del mar.

Tradicionalmente, la salinidad se ha medido mediante campañas oceanográficas, empezando por la Challenger Expedition, entre 1872 y 1876 y más tarde también desde estaciones fijas. Mientras que su medida sistemática a escala global, empezó en los años dos mil, con los primeros perfiladores Argo, y mas adelante con el lanzamiento del primer satélite (Font *et al.* 2012) dedicado a medir la salinidad superficial desde el espacio, el *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS).

¿Por qué es necesario medir la salinidad?

La salinidad es una variable oceánica fundamental. Contribuye, junto con la temperatura, a la determinación de la densidad, que modula la intensidad de los procesos de mezcla en la capa superior del océano, a la formación de masas de agua y corrientes.

Los principales procesos que influyen en la variabilidad de la salinidad están relacionados con los intercambios de agua entre el océano y la atmósfera (evaporación, precipitación), y con la advección. Si observamos un mapa de salinidad superficial o un transecto del océano Atlántico de norte a sur, vemos que la salinidad varía de un lugar a otro (figura 1), con unos valores, en océano abierto, que se encuentran generalmente entre 32 y 38. Sin embargo, se ha observado que la concentración de sal en los océanos no presenta cambios notables a escala climática, y su valor medio es de 35.

Cerca de la costa, la salinidad superficial puede verse influenciada por la escorrentía de los ríos, y en las zonas polares por los mecanismos de formación y fusión del hielo marino. Esta formación de hielo marino contribuye a la formación de las aguas profundas, el principal forzamiento de la circulación general termohalina. Todo ello, junto con la evaporación y la precipitación, modifican la salinidad superficial, lo cual permite utilizarla como trazador del ciclo de agua. También, dado que solo se modifica en superficie, la salinidad se utiliza junto a la temperatura como trazador de masas de agua.

¿Cómo medir la salinidad?

Una de las principales observaciones de la primera expedición oceanográfica mundial, *Challenger Expedition* (1872-1876), fue que «la salinidad varía de un mar a otro, pero las proporciones relativas de las sales que la componen se mantienen». Gracias a esta observación clave,

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

medir la concentración de un único componente de las sales que contiene en el agua de mar permite recuperar la concentración de los otros y, por lo tanto, la salinidad. Hasta la primera mitad del siglo xx, la salinidad (expresada en partes por mil; ppt o ‰) se estimaba por métodos químicos a partir del contenido de cloruros, el componente mayoritario de las sales disueltas en el agua de mar (Knudsen 1901).

A partir de los años cuarenta se observó que, a una temperatura fija, la conductividad eléctrica del agua de mar dependía de la salinidad, por lo que se fue sustituyendo el método químico por la medida de la conductividad a una temperatura fija. Este método supuso la llegada de nuevos instrumentos, los salinómetros. A partir de aquí, se fijó la salinidad de una muestra de agua como la relación de conductividades a 15 °C, entre la muestra y un patrón salinidad de 35 ppt, de manera que esta nueva escala (salinidad práctica de 1978; PSS-78 o PSU en inglés) ya no tiene unidades. Finalmente, en 2010 se vuelve también al concepto de concentración con la salinidad absoluta en g kg^{-1} (TEOS-10). Lo que hace que en la literatura la salinidad se encuentre en las diferentes unidades.

Así desde finales de los años sesenta hasta hoy, el desarrollo instrumental incluye un sensor de temperatura y de presión, junto al de conductividad, llegando al famoso Conductividad-Temperatura-Profundidad (CTD en inglés), capaz de medir continuamente perfiles verticales u horizontales de temperatura y salinidad. En base a esta tecnología, se desarrollaron otros instrumentos autónomos, los llamados termosalinógrafos (TSG), instalados en buques, que proporcionan mediciones continuas de temperatura y salinidad superficial durante la navegación. La mayoría de esos instrumentos se utilizan comúnmente durante las campañas

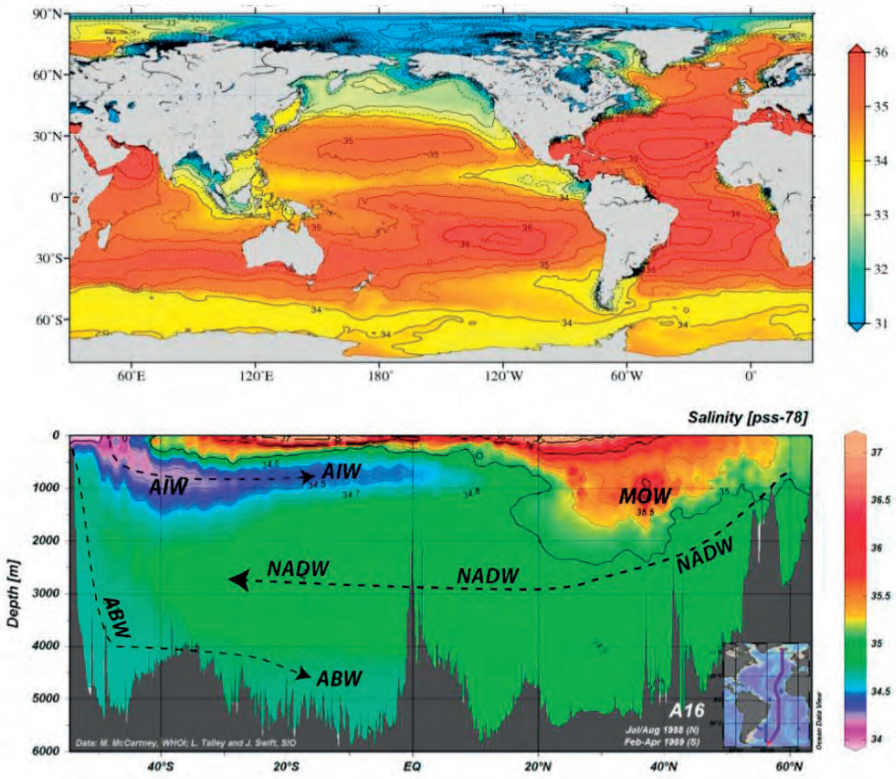


Figura 1. Arriba: salinidad superficial anual media (World Ocean Atlas 2018). Abajo: transecto de salinidad del Atlántico - Agua Antártica de Fondo (ABW), Agua de Antártica Intermedia (AIW), Agua Profunda del Atlántico Norte (NADW) y Agua Originada en el Mediterráneo (MOW).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

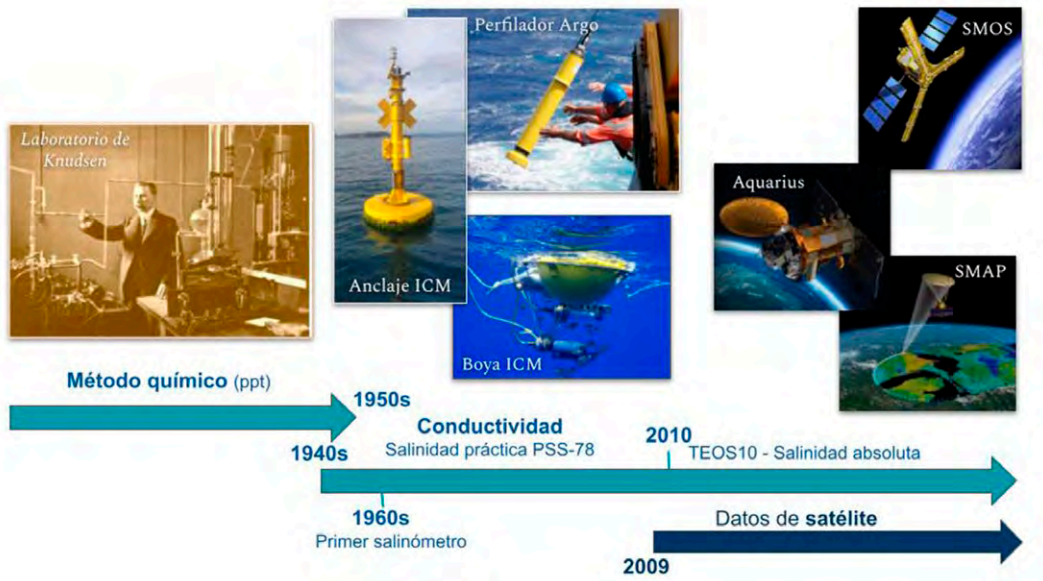


Figura 2: Cronología de los métodos de medición de la salinidad del mar. Fotos de izquierda a derecha: Martin Knudsen (1901); instrumentos basados en la tecnología CTD; los satélites SMOS, Aquarius y SMAP.

oceanográficas desde los años 70, pero también se utilizan en anclajes, estaciones fijas o boyas a la deriva, como por ejemplo el anclaje de L'Estartit o la boya ICM (Salvador *et al.* 2010), diseñados en el Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC). Con el objetivo y la necesidad de medir la salinidad de manera sistemática y global, la comunidad científica inició a principios de los dos mil, el programa internacional Argo que realiza mediciones rutinarias en la columna de agua, proporcionando un seguimiento continuo de los océanos mediante unos cuatro mil perfiladores autónomos Argo activos.

En paralelo, la comunidad científica perfeccionó las técnicas para poder medir la salinidad superficial desde el espacio. Una nueva generación de satélites en banda L (1.4 GHz) llegó 40 años después de los primeros satélites oceanográficos (1970). SMOS fue el primer satélite diseñado para medir la salinidad superficial. Fue lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en 2009, en colaboración con varias instituciones europeas, y el *Barcelona Expert Center* del ICM-CSIC que lideró la parte científica. Actualmente, junto con la llegada posterior de las misiones Aquarius (2011-2015) y SMAP (2015) de la NASA, ya se dispone de más de 10 años de datos de la salinidad superficial del océano.

Al final gracias al esfuerzo continuo de la comunidad científica, la «Cenicienta-salinidad» tiene la relevancia que merece, con un amplio rango y diversidad de instrumentación para medirla a diversas escalas (figura 2). Y hoy en día, las observaciones de salinidad siguen aumentando en todos los océanos incluyendo las zonas polares, que a pesar de su influencia en el clima siguen estando poco estudiadas.

Referencias

Font J., Ballabrera-Poy J., Camps A., *et al.* 2012. A new space technology for ocean observation: the SMOS mission, Sci. Mar., vol. 76S1: 249-259.

Knudsen M. 1901. Hydrographical tables, Copenhagen, 63 pp.

Salvador J., Fernández P., Julià A., *et al.* 2010. A new buoy for measurement and real time transmission of surface salinity, CIESM 2010, Venice, Italy.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14089

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.5. Observatorios microbianos: centinelas del cambio global

Ramon Massana, Dolors Vaqué, Maria Montserrat Sala, Josep M. Gasol

La biosfera siempre ha experimentado cambios, forzados por modificaciones del sustrato geológico, alteraciones climáticas, y la aparición de especies con nuevas funciones e interacciones. Sin embargo, hoy en día nos encontramos en un escenario único, donde una sola especie amenaza de manera drástica y rápida todos los ecosistemas. Más que nunca, necesitamos herramientas para hacer un seguimiento de los sistemas naturales, entender los cambios a diferentes escalas temporales, documentar el estado actual, y aplicar modelos para hacer predicciones de futuro. Este conocimiento será fundamental para proponer estrategias de mitigación de los cambios antropogénicos.

El mar, por su extensión y volumen de agua, representa un componente crucial del sistema Tierra. Ha sido donde la vida se originó y se diversificó, y contiene hoy en día una biodiversidad enorme. Las sociedades humanas han establecido un vínculo estrecho con el mar, de donde extraen alimentos, les sirve de medio de transporte y se ha convertido en un atractivo espacio de ocio. El mar está también bajo la influencia del cambio global, con retos como el calentamiento, la acidificación, y la contaminación. Los microorganismos marinos, invisibles pero omnipresentes, se ven también afectados (Hutchins y Fu 2017). Dado que se dividen muy rápido, pueden actuar como centinelas de estos cambios, y esto justifica la necesidad de observatorios microbianos.

Los microorganismos como sensores del medio marino

Los microorganismos marinos desarrollan un abanico amplísimo de reacciones metabólicas que, dada su elevada biomasa y rápido crecimiento, tienen implicaciones globales. Participan en los ciclos biogeoquímicos, son los principales productores primarios en el mar, y sustentan las redes tróficas. Son también agentes de biorremediación y fuente poco explorada de compuestos utilizables en biotecnología y biomedicina. Además, los microorganismos pueden ser indicadores del estado y resiliencia del ecosistema, ya que cada especie suele tener diferentes tolerancias ambientales. Ante cambios repentinos, la composición taxonómica de la comunidad puede cambiar, y producirse una sustitución hacia especies mejor adaptadas a las nuevas condiciones. Cuando hay cambios sutiles, como el aumento lento y continuado de la temperatura que estamos viviendo, puede haber esta sustitución o una adaptación gradual de las especies originales. La consideración de los microorganismos como actores en el sistema marino es relativamente nueva: en la década de 1970 se vio que eran muy abundantes, en la de 1980 que eran muy activos, y en la de 1990 que eran muy diversos. Sin embargo, han sido las nuevas técnicas de secuenciación masiva del ADN las que han permitido un estudio profundo de la diversidad taxonómica y funcional de los microorganismos marinos y de su variabilidad (Pedrós-Alió *et al.* 2018). Hoy en día las técnicas –ómicas nos permiten conocer en detalle la composición en especies de la comunidad microbiana, la capacidad genética de los organismos que la forman, los genes que expresan en cada momento y los compuestos que producen.

La escala temporal en la observación marina

El estudio temporal de los organismos marinos no es trivial, ya que cada visita implica tener

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

barcos equipados y se hace laborioso tener un muestreo biológico recurrente. Las campañas oceanográficas son eventos únicos, de duración limitada y con una dimensión básicamente espacial. Las primeras expediciones globales en el océano tuvieron lugar en los siglos XVIII y XIX, entre ellas la del Beagle con Charles Darwin, y recientemente encontramos las circunnavegaciones Malaspina y TaraOceans. A nivel temporal, hay dos casos muy relevantes en los giros oceánicos del hemisferio norte, las estaciones ALOHA (Pacífico) y BATS (Atlántico), donde desde 1988 se organiza una campaña oceanográfica mensual desde las islas cercanas. Inicialmente planteadas como un esfuerzo a diez años, estas iniciativas han continuado hasta convertirse en estaciones de referencia (Karl y Church 2014). En sistemas costeros, el muestreo temporal es mucho más asequible y varios institutos oceanográficos han establecido una estación de muestreo temporal cercana. En la costa catalana, es de destacar el esfuerzo realizado por Josep Pascual en L'Estartit, que ha generado el registro más largo de temperatura del agua en el mar Catalán, comenzado en 1969. De estas estaciones costeras recogemos muestras de agua para hacer estudios exhaustivos de los microorganismos que habitan y que son nuestros centinelas del cambio global.

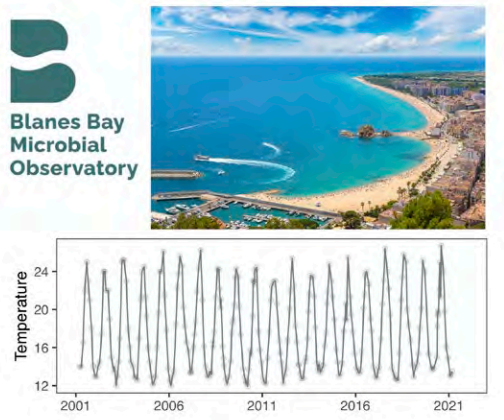


Figura 1. Bahía de Blanes, lugar del muestreo del BBMO, un sistema con fuerte estacionalidad ejemplificada por la temperatura del agua tomada mensualmente durante más de 20 años.

El Observatorio Microbiano de la Bahía de Blanes (BBMO)

La Bahía de Blanes (figura 1) fue uno de los primeros lugares donde investigó el ecólogo pionero Ramon Margalef y ha sido el escenario de muchos estudios posteriores. En 2001 se comenzó un muestreo mensual de diversidad microbiana, primero ligado a proyectos de investigación concretos, hasta establecerse como un observatorio indefinido. El BBMO tiene un fuerte enfoque microbiano y se determina la

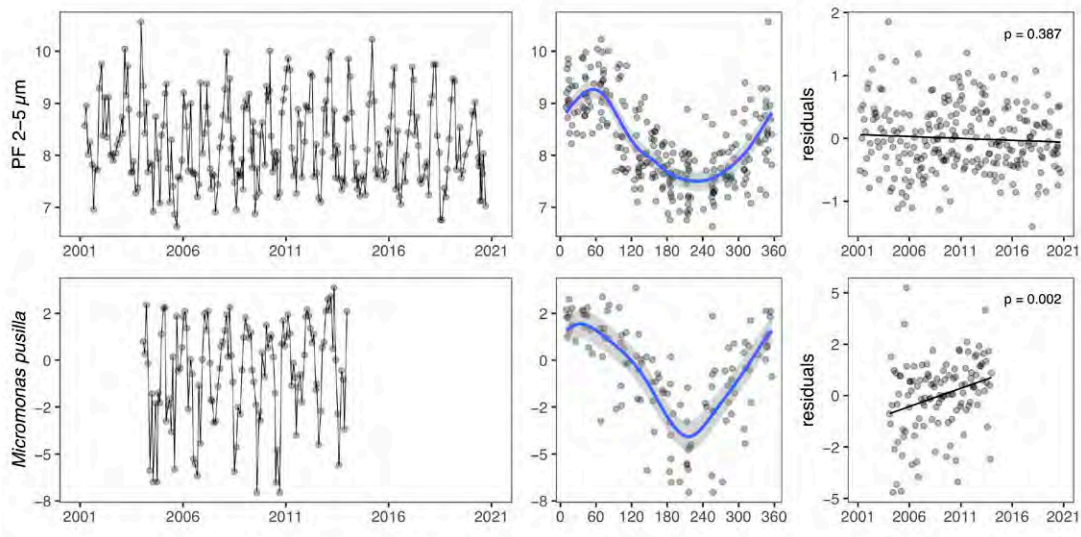


Figura 2. Estacionalidad y tendencia interanual de protistas fotosintéticos (PF) y *Micromonas pusilla*. Izquierda: abundancias medidas. Centro: abundancias en un año y su ajuste. Derecha: dinámica de los residuos.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

abundancia, diversidad, actividad, y potencial genético de virus, bacterias, arqueas y protistas planctónicos (Gasol *et al.* 2016). Lo más relevante de este esfuerzo es la toma desde el inicio de material genético de la comunidad microbiana, cuando aún no se sabía cómo procesarlo (en 2001 los estudios moleculares eran aún limitados). Es a partir de la aparición de la secuenciación masiva del ADN que la explotación de este material genético ha sido posible. Esta serie de veinte años nos permite estudiar la estacionalidad propia de sistemas templados y las tendencias a largo plazo. Como ejemplo, analizamos la abundancia por microscopía de un grupo microbiano, los protistas fotosintéticos de dos a cinco micras, y la abundancia relativa de la especie más relevante del grupo, *Micromonas pusilla*, determinada por secuenciación del ADN ambiental (Giner *et al.* 2019) (figura 2). Las dos variables presentan una marcada estacionalidad, observada tanto en los picos repetitivos como en la representación de los valores en un solo año, con un máximo en invierno. En cuanto a las tendencias interanuales, expresadas por la dinámica de los residuos (valor medido menos valor estimado) no hay cambios en la primera medida y sí un aumento significativo en la segunda.

Además de permitir determinar tendencias temporales, el muestreo en el BBMO ha provisto de comunidades microbianas para experimentar y hacer aislamientos, y ha sido protagonista de más de cien artículos. El BBMO se ha convertido en un lugar de referencia internacional de los estudios de diversidad y genómica de los microorganismos que, a pesar de ser invisibles, son extraordinariamente importantes para el mantenimiento saludable de los ecosistemas marinos.

Referencias

Gasol J.M., Cardelús C., Morán X.A.G., *et al.* 2016. Seasonal patterns in phytoplankton photosynthetic parameters and primary production at a coastal NW Mediterranean site. Sci. Mar. 80S1: 63-77.

Giner C.R., Balagué V., Krabberød A.K., *et al.* 2019. Quantifying long-term recurrence in planktonic microbial eukaryotes. Mol. Ecol. 28: 923-935.

Hutchins D.A., Fu F. 2017. Microorganisms and ocean global change. Nature Microbiol. 2: 17058.

Karl D.M., Church M.J. 2014 Microbial oceanography and the Hawaii Ocean Time-series programme. Nature Rev. Microbiol. 12: 699-713.

Pedrós-Alió C., Acinas S.G., Logares R., Massana R. 2018. Marine microbial diversity as seen by high-throughput sequencing. In: Gasol J.M., Kirchman D.L. (eds.), Microbial Ecology of the Oceans, Third Edition, pp. 47-97. John Wiley & Sons, Inc.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14090

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.6. Turbulencia y dinámica del plancton en un océano más cálido

Miquel Alcaraz, Marta Estrada

La energía del viento, diferencias en la temperatura y el contenido de sales del agua que determinan su densidad, y la rotación de la Tierra, impulsan un sistema de circulación oceánica complejo y variable. La energía mecánica así generada, imprescindible para mantener la dinámica de los ecosistemas marinos, produce remolinos turbulentos que se dividen en remolinos cada vez más pequeños, hasta que llegan a un tamaño, la escala de Kolmogorov, en que la viscosidad vence a la inercia.

Turbulencia: características y efectos sobre el plancton

Los movimientos turbulentos a las escalas mayores (meso- y macroescala, de metros a cientos de kilómetros) tienen un papel principalmente de transporte. A las escalas más pequeñas, del orden de milímetros (turbulencia de pequeña escala y de microescala), los gradientes de velocidad generados por la turbulencia afectan directamente partículas en el rango de tamaños de los organismos del plancton, una comunidad que vive suspendida en la columna de agua y que incluye prácticamente todos los grupos biológicos, desde virus y bacterias, a larvas de pez.

La materia orgánica que hace funcionar la red trófica marina la produce el fitoplancton o «plancton vegetal», que comprende algas unicelulares de características muy diversas (figura 1). De los grupos dominantes en la comunidad fitoplanctónica dependen en gran medida tanto la producción pesquera, como la captación de CO_2 por el ecosistema marino. Los cambios estacionales de los grupos dominantes a lo largo del ciclo anual fueron explicados por el Prof. Ramón Margalef mediante un modelo conceptual. En la representación gráfica del modelo, conocido internacionalmente como el *Mandala de Margalef*, las diferentes formas biológicas (grupos que comparten determinadas características fisiológicas) de fitoplancton se sitúan en un plano en el que los ejes de coordenadas son la intensidad de la turbulencia y la concentración de nutrientes.

Preguntas derivadas del *Mandala de Margalef* han dado origen a una fructífera línea de trabajo del Institut de Ciències del Mar (ICM) sobre los efectos de la turbulencia de pequeña escala en el conjunto del plancton marino, y propiciaron la celebración del primer curso internacional sobre el tema: *Lectures on Plankton and Turbulence*, financiado por la UE, y coordinado por investigadores del ICM, la UB y otras organizaciones científicas (Marrasé *et al.* 1997).

La imposibilidad de aislar en el medio natural los efectos de la turbulencia de los que originan otros factores exige experimentación de laboratorio. Tanques o acuarios que contienen desde litros (microcosmos) a metros cúbicos de agua de mar (mesocosmos), permiten controlar la intensidad de la turbulencia y las condiciones de temperatura, nutrientes o iluminación, así como las especies o comunidades de plancton a estudiar (Estrada *et al.* 1988).

La importancia de la turbulencia sobre la selección de formas biológicas de fitoplancton se debe a que puede favorecer la absorción de nutrientes por las células, o contribuir a mantenerlas en suspensión en la columna de agua. La turbulencia también afecta la estrategia migratoria de algunos grupos (dinoflageladas), o puede actuar negativamente cuando es muy alta (Berdalet *et al.* 2007).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

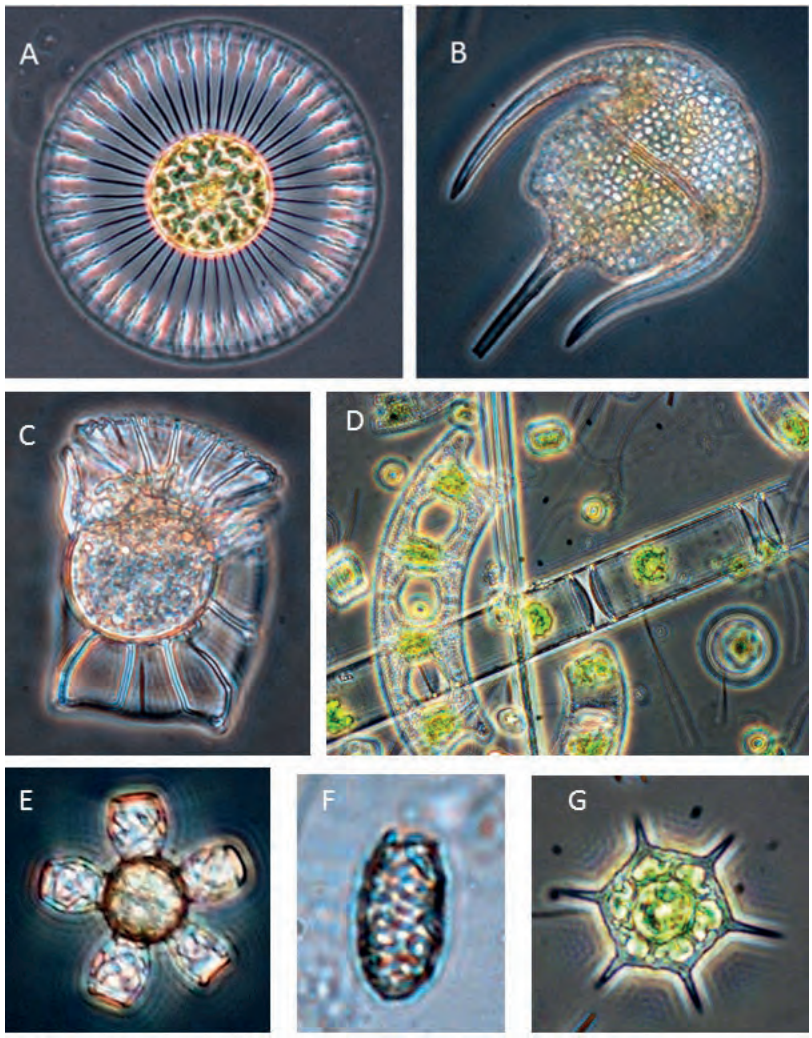


Figura 1. Diversidad de formas en el fitoplancton (fotografías al microscopio óptico). A, D, diatomeas; B, C, dinoflageladas; E, F, cocolitóforos; G, silicoflagelada. El diámetro de las células oscila entre poco más de unos 10 micrómetros en E y F, y más de 100 micrómetros en B y C. (Fotos: M. Estrada)

Cambios en su intensidad interaccionan con la motilidad, forma y tamaño celular o de las colonias de células y ayudan a mantener una elevada diversidad específica (figura 1)

Para el zooplancton, provisto de microsensores químicos y del movimiento, la turbulencia puede representar un aumento de la ingestión de alimento (mayor frecuencia de contacto con partículas alimenticias), o afectar la localización de una posible pareja borrando los rastros de feromonas que dejan las hembras como señal. También puede confundir el movimiento turbulento con distorsiones en el movimiento del agua generadas por posibles presas o depredadores, induciendo el ataque o aumentando la frecuencia de las reacciones de escape que tienen un alto consumo metabólico (figura 2). Otros efectos de la turbulencia son cambios en la proporción entre sexos, con mayor abundancia de machos, y reducción del tamaño medio de los individuos (Saiz 1991).

Turbulencia y plancton en un Océano más cálido

El cambio climático ya en marcha predice un Océano futuro no solo más cálido, sino también

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

expuesto a una mayor frecuencia e intensidad de episodios atmosféricos altamente energéticos que generan turbulencia. Ambas variables, temperatura y turbulencia, no solo son análogas en su naturaleza (desorden molecular la temperatura, desorden hidrodinámico la turbulencia), sino que provocan respuestas muy similares en algunas propiedades y actividades fundamentales de los organismos.

El incremento de turbulencia y temperatura supone, entre otros efectos, una mayor actividad metabólica, un aumento de las tasas de ingestión, y una reducción en el tamaño medio de los individuos. Esto último tiene un efecto acumulativo sobre el metabolismo, ya que las tasas metabólicas por unidad de biomasa son inversamente proporcionales al tamaño individual.

Mientras se sabe que las funciones vitales son solo posibles entre unos márgenes de temperatura inversamente proporcionales a la complejidad del organismo o función, y que la respuesta de la actividad tiene forma de campana (aumenta con la temperatura hasta un valor óptimo a partir del cual decrece), se desconoce la dinámica de los procesos en el caso de la turbulencia. Además, experimentos de laboratorio demuestran que la turbulencia incrementa el cociente entre el carbono producido por el fitoplancton y el respirado por toda la comunidad (Alcaraz *et al.* 2002). Aunque parte de las consecuencias de un aumento de temperatura se amplificarían por la similitud de los efectos derivados de la turbulencia, el papel de esta última en el balance producción/respiración introduce una nueva incógnita, por lo que debe ser tenida cuenta en los modelos predictivos de un futuro Océano más cálido.

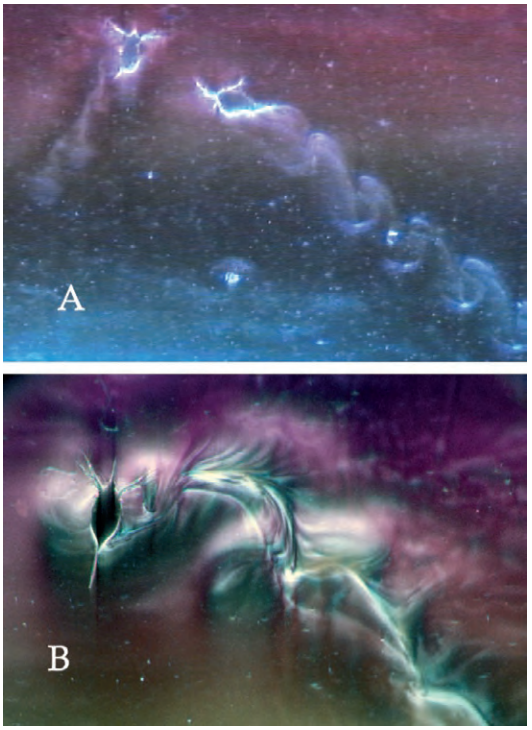


Figura 2. Huellas o pistas hidrodinámicas creadas por la natación del zooplancton. A, de un copépodo carnívoro persiguiendo una presa, y la de esta antes de percibir la señal del depredador y escapar. B, reacción de escape de la presa, un cladócero de agua dulce (Óptica de Schlieren, Foto: J.R. Strickler).

Referencias

Alcaraz M., Marrasé C., Peters F., Arin L., Malits A. 2002. Effects of the turbulence conditions on the balance between production and respiration in marine planktonic communities. Mar. Ecol. Prog. Ser. 242: 63-71.

Berdalet E., Peters F., Koumandou V.L., Roldán C., Guadayol Ò., Estrada M. 2007. Species-specific physiological response of dinoflagellates to quantified small-scale turbulence. J. Phycol. 43: 965-977

Estrada M., Marrasé C., Alcaraz M. 1988. Phytoplankton response to intermittent stirring and nutrient addition in marine microcosms. Mar. Ecol. Prog. Ser. 48: 225-234.

Marrasé C., Saiz E, Redondo J.M., eds. 1997. Lectures on plankton and turbulence. Sci. Mar. 61 (Suppl. 1). 238 pp.

Saiz E. 1991. Importància de l'energia auxiliar en la dinàmica dels sistemes pelàgics: Turbulència i zooplancton. PhD thesis, UB. 154 pp.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14091

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.7. Tendencias de la clorofila oceánica en tiempos de cambios globales

Francesc Peters

La clorofila es un pigmento necesario para la fotosíntesis, y sirve como medida indirecta de la biomasa de productores primarios (principalmente fitoplancton) en el océano. Todos los ecosistemas dependen total o parcialmente del carbono orgánico producido por la fotosíntesis, es decir, el uso de CO_2 y H_2O para sintetizar azúcares mediante la energía de la radiación solar. Además, el fitoplancton, como las plantas terrestres, necesita nutrientes inorgánicos para crecer, y es aquí donde entra en escena el cambio global.

La preocupación sobre los efectos del cambio climático se ha adentrado en la sociedad en los últimos años desde que los científicos tienen ahora una alta certidumbre que la causa del cambio climático es humana (IPCC 2013). El incremento de la media de la temperatura global es incuestionable. Este incremento también se está trasladando a una subida de la temperatura del océano. La cantidad de calor por unidad de volumen que se necesita para incrementar la temperatura del agua de mar es 4500 veces más grande que para el aire y da una idea de la magnitud del calentamiento global. Las masas de agua superficiales de las regiones tropicales, subtropicales y templadas suelen estar desprovistas de nutrientes inorgánicos, limitando el crecimiento del fitoplancton, mientras que las capas profundas son ricas en estos nutrientes, pero faltas de luz solar. Los nutrientes se difunden lentamente hacia arriba. Una de las consecuencias del calentamiento del océano superficial es que la difusión vertical de los nutrientes desde aguas profundas todavía disminuye más y, por tanto, se espera que el fitoplancton decrezca.

El mar Mediterráneo, sobre todo por la profundidad de su cuenca y por su circulación «anti-estuárica» respecto del océano Atlántico, es un mar oligotrófico con una concentración naturalmente baja de nutrientes superficiales y una biomasa clorofílica también baja. Esta oligotrofia incrementa aún más hacia el Mediterráneo oriental, que se considera una de las áreas ultraoligotróficas del mundo. Al mismo tiempo, la Mediterránea es una región donde el cambio climático se ve exacerbado, con un potencial de empobrecer todavía más las aguas superficiales. Mi hipótesis es que esta tendencia tendría que estar presente en la señal de la clorofila satelital. Así, en este trabajo analizo una serie temporal de 20 años de clorofila satelital en el mar Mediterráneo.

Aproximación al problema con datos de satélite

Uso la concentración de clorofila superficial en el Mediterráneo a partir de observaciones de múltiples satélites y de Sentinel-3 OLCI (Volpe *et al.* 2019). Los datos han sido promediados espacialmente en 179 celdas de 1×1 grados. Para eliminar la tendencia estacional (ciclo anual) he utilizado un ajuste de spline cúbico a los años superpuestos para cada una de las celdas, y he trabajado con los residuos de este ajuste. Luego he ajustado una ecuación lineal a estos residuos. La significación estadística se ha establecido en α=0,05. Finalmente, para visualizar y comparar estas tendencias a largo plazo he calculado un parámetro Q_{10}, que da el factor de multiplicación de la clorofila después de 10 años, según $Q_{10} = 10^{b*10}$, donde b es la pendiente de la recta. He promediado los valores de Q_{10} para todo el Mediterráneo y para subregiones. Los valores medios se han comparado contra una hipótesis nula de $Q_{10} = 1$ con un test de t de dos colas.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

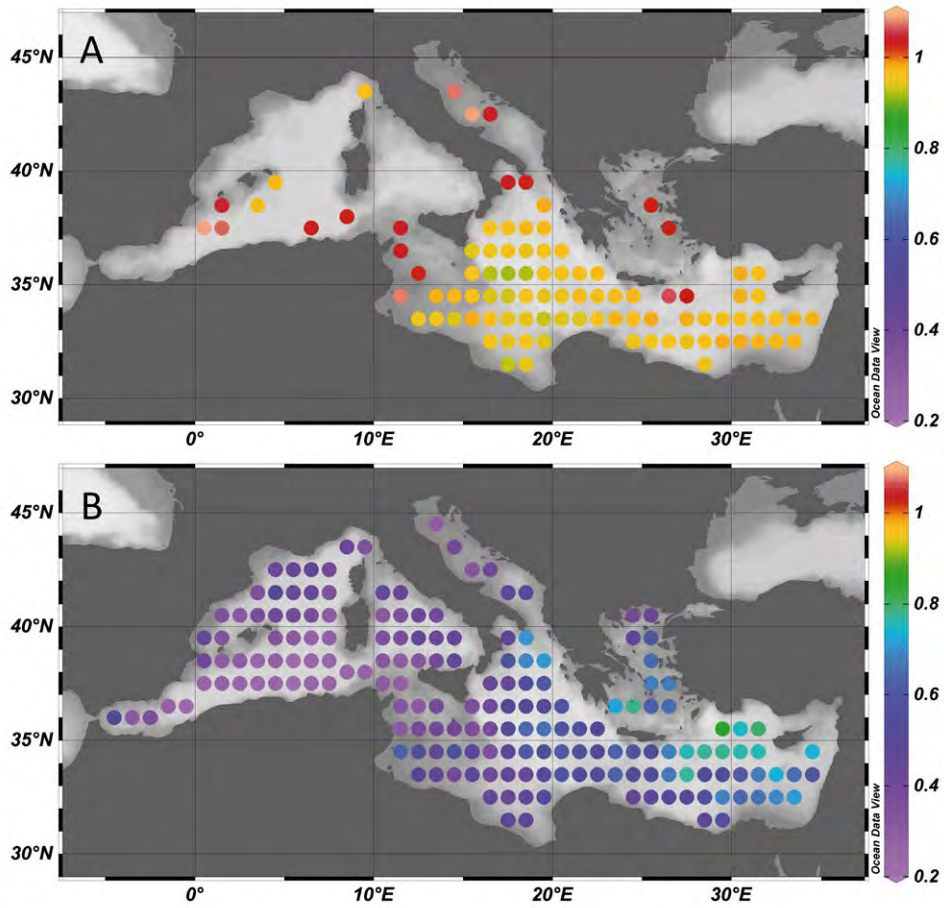


Figura 1. Valores de Q_{10} derivados de las series temporales de clorofila satelital. Solo se muestran celdas con tendencias significativas ($p \leq 0{,}05$). A, tendencias para la serie entera (1998 a 2017). B, tendencias derivadas para los últimos años (2013-2017).

Tendencias de la clorofila en el Mediterráneo

En la serie 1998-2007 hay una ligera, pero estadísticamente significativa tendencia de la clorofila a disminuir en el Mediterráneo con una Q_{10} de 0,98 (figura 1A). Pero hay diferencias regionales. No se observa ninguna tendencia significativa en el Mediterráneo occidental ni en el mar Egeo. Hay una tendencia a incrementar la clorofila en el Adriático, mientras que decrecimientos de la clorofila se observan en el Jónico y en el Mediterráneo oriental. Sin embargo, la serie temporal de los residuos del ajuste estacional no suele ser una tendencia monotónica creciente o decreciente. En general se observan tendencias crecientes en la primera mitad de la serie y decrecientes después. En un segundo análisis, he focalizado en los últimos 5 años de la serie (2013-2017). Ahora se observa una tendencia fuerte y decreciente de la clorofila (figura 1B) con una Q_{10} media para el Mediterráneo de 0,47 (tabla 1). Los decrecimientos más grandes se encuentran en el Mediterráneo occidental, en el Adriático y en el mar Jónico, mientras que en el mar Egeo y en el Mediterráneo oriental se observan decrecimientos un poco menores.

Mensaje que nos llevamos

Parece que hay un punto de cambio en el sistema en cuanto al decrecimiento de la clorofila en el Mediterráneo que se encuentra entre el 2007 y el 2017, dependiendo de la celda específica consi-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Tabla 1. Sumario de valores Q_{10} para la concentración de clorofila (media, se: error estándar, i n: número de celdas) en el mar Mediterráneo y las subregiones†. Significación del test de t contra Q_{10}=1 es p<0,05 (*), p<0,01 (**) o p<0,001 (***).

	Mediterráneo	Mediterráneo occidental	Adriático	Jónico	Egeo	Mediterráneo oriental
n	179	65	6	49	11	48
Años 1998-2017						
Media	0,985***	1,002	1,041*	0,966***	1,004	0,970***
(se)	(0,003)	(0,003)	(0,013)	(0,005)	(0,005)	(0,003)
Años 2013-2017						
Media	0,474***	0,336***	0,400***	0,483***	0,601***	0,633***
(se)	(0,012)	(0,010)	(0,036)	(0,015)	(0,039)	(0,016)

† Mediterráneo occidental (desde el estrecho de Gibraltar al estrecho de Sicilia), el mar Adriático (bajando hasta 40°N), el mar Jónico (desde 40°N hasta África y desde el estrecho de Sicilia hasta los 20°E), el mar Egeo (desde Creta hacia el norte, entre Grecia en el oeste y Turquía en el este), y el Mediterráneo oriental (desde los 20°E hacia el este, excluyendo el mar Egeo).

derada. Podemos especular que el declivio en los aportes continentales de fósforo debido a cambios legislativos en el Mediterráneo norte parcialmente explicarían el decrecimiento de la clorofila. Pero cuando se observa una tendencia sinóptica para todo el Mediterráneo, se espera un efecto a gran escala relacionado con la disponibilidad de nutrientes más que declivios locales o costeros. Esta tendencia encajaría con la hipótesis de una mayor separación entre las masas de agua superficiales y profundas debido al incremento de la temperatura del agua. Otros estudios también están observando tendencias en el decrecimiento de la clorofila oceánica (Gregg y Rousseaux 2019), aportando confianza a estos resultados. A pesar de todo, los valores absolutos del decrecimiento permanecen inciertos.

La clorofila refleja la biomasa fitoplanctónica y sabemos que la biomasa está relacionada con la biodiversidad (Irigoien *et al.* 2004). Para una biomasa fitoplanctónica baja hay una relación directa con la riqueza de especies y, por tanto, esperaríamos una reducción de la biodiversidad del fitoplancton. Este es un aspecto preocupante considerando que el Mediterráneo se considera un exponente en biodiversidad marina (Coll *et al.* 2010). Así mismo, si las altas tasas de extinción observadas para organismos terrestres son extrapolables al plancton, un estrés adicional ligado a la biomasa podría desestructurar fuertemente los ecosistemas marinos. Más allá de aspectos de estabilidad del ecosistema, se prevé consecuencias importantes para las pesquerías que dependen directa o indirectamente de la biomasa fitoplanctónica. Este trabajo también destaca la importancia de tener series temporales largas cuando direccionamos temas de cambio climático. Las tendencias son a menudo pequeñas y las series largas son cruciales para determinar la significación estadística entre el ruido inherente.

Si las tendencias decrecientes observadas para los años 2013-2017 se mantienen, los niveles de clorofila en el Mediterráneo en diez años serán aproximadamente la mitad de los actuales para toda la cuenca, un poco más en el este y decreciendo hacia el oeste. Esto será un cambio drástico para todo el ecosistema.

Referencias

Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., *et al.* 2010. The biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, patterns, and threats. PLoS ONE 5: e11842.

Gregg W.W., Rousseaux C.S. 2019. Global ocean primary production trends in the modern ocean color satellite record (1998-2015). Environ. Res. Lett. 14: 124011.

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker T.F., Qin D., *et al.* (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Irigoien X., Huisman J., Harris R.P. 2004. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. Nature 429: 863867.

Volpe G., Colella S., Brando V.E., *et al.* 2019. Mediterranean ocean colour Level 3 operational multi-sensor processing. Ocean Sci. 15: 127-146.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14092

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.8. El fitoplancton y los elementos de la vida

Mariona Segura-Noguera, Elisa Berdalet, José Manuel Fortuño

Los organismos vivos están compuestos principalmente de seis elementos: hidrógeno (H), carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), fósforo (P) y azufre (S) que, en los océanos, se encuentran disueltos en forma de gases y de sales nutritivas. Los organismos fitoplanctónicos, microalgas y cianobacterias, que debido a su pequeño tamaño son arrastrados por las corrientes marinas, incorporan estos elementos y utilizan energía solar, mediante la fotosíntesis, para construir materia orgánica para vivir y reproducirse, a la vez que producen oxígeno. El crecimiento del fitoplancton, por lo tanto, depende de la combinación de la disponibilidad de luz –restringida a las aguas superficiales– y de nutrientes, procedentes de los continentes o de aguas profundas de los océanos.

Estas pequeñas criaturas ejercen un papel clave en el mantenimiento de nuestra vida en la Tierra, afectando nuestra salud, nuestros alimentos y regulando el clima. El fitoplancton constituye el primer peldaño de las redes tróficas marinas, del que se alimentan desde microorganismos heterotróficos, pequeños crustáceos, larvas de peces, hasta ballenas. Especialmente en las zonas de afloramiento de aguas profundas ricas en nutrientes, el fitoplancton puede sustentar grandes pesquerías de las que nos nutrimos los seres humanos y que son fuente de riqueza para muchos países. Además, a partir de la incorporación de CO_2 por parte del fitoplancton mediante la fotosíntesis, y la posterior conversión en diferentes formas de biomasa en las redes tróficas, el C es transportado por sedimentación hacia zonas profundas del océano, donde permanece largos periodos de tiempo. Mediante este proceso, conocido como la «bomba biológica» del carbono, el fitoplancton participa de manera determinante en la regulación del clima de nuestro planeta. De todos modos, cuando por la combinación de determinados factores ambientales se favorecen rápidas proliferaciones de fitoplancton, el exceso de biomasa no puede ser consumido eficientemente y su degradación comporta un deterioro de la calidad del ecosistema en general (Berdalet *et al.* 2022).

Estequiometría de Redfield: entre taxonomía y fisiología

A mediados del siglo pasado, el oceanógrafo Alfred Redfield descubrió que en las aguas profundas de todos los océanos había una relación constante entre nitratos, fosfatos, carbono inorgánico y oxígeno disuelto. Puesto que las concentraciones de dichos compuestos aumentan en profundidad por la remineralización de la materia orgánica, mayoritariamente plancton que sedimenta desde la superficie, Redfield dedujo que la estequiometría (es decir, la proporción entre los correspondientes elementos) del fitoplancton tenía que coincidir con la relación entre los mismos elementos disueltos en aguas afóticas (no iluminadas), siendo $-O_2$/C/N/P = –138/106/16/1 (Redfield 1934). Redfield puntualizó que estos valores se correspondían a un promedio que podría variar según la composición taxonómica (en especies) de la materia que sedimentaba. De hecho, se ha comprobado que grupos de fitoplancton de los más abundantes –diatomeas, dinoflagelados y cocolitoforales (figura 1)– presentan estequiometrías diferentes. Las diatomeas tienen una pared celular de sílice amorfa, las cocolitoforales están recubiertas por

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

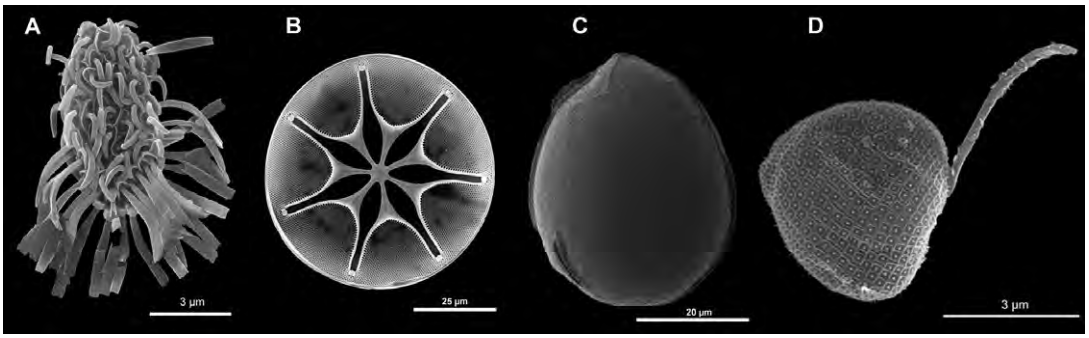


Figura 1. Imágenes de MEB de fitoplancton representativo, obtenidas en el Servicio de Microscopía Electrónica del ICM: A, *Picarola margalefii*, cocolitoforal; B, *Asterolampra marylandica*, diatomea; C, *Ostreopsis* cf. *ovata*, dinoflagelado; D, *Pyramimonas* sp., clorófito.

unas placas (cocolitos) de carbonato de calcio, mientras que las dinoflageladas tienen una pared celular de celulosa rica en C y un núcleo relativamente grande. Por lo tanto, la concentración de C por unidad de volumen es mayor en dinoflagelados y cocolitoforales que en diatomeas, y que los dinoflagelados requieren más P por unidad de volumen que las diatomeas (Segura-Noguera *et al.* 2016), con grandes vacuolas citoplasmáticas. La estequiometría del plancton, además, es flexible: cuando los nutrientes son abundantes, el fitoplancton se podrá reproducir, aumentando la síntesis de proteínas (ricas en N) y de ADN, ARN y ATP (ricos en P) y, al enriquecerse en N y P, la estequiometría C/P y C/N disminuye. En cambio, cuando faltan nutrientes, aumenta la proporción de compuestos ricos en C (carbohidratos, lípidos), y la relación C/N y C/P aumenta.

La relación de Redfield todavía es hoy en día un parámetro clave para caracterizar el estado nutricional del fitoplancton –y del componente microbiano en general– y para comprender los flujos de los principales elementos de la vida en los océanos, combinando medidas *in situ* y modelos. La metodología clásica consistente en concentrar el agua de mar en filtros y estimar la concentración elemental total de la muestra, sobreestima las cantidades de C y N en el plancton y no permite discriminar el estado fisiológico o nutricional de los microorganismos a nivel individual. Esto se ha conseguido muy recientemente, gracias a los adelantos técnicos producidos en el campo de la microscopia electrónica.

Taxonomía y estequiometría del fitoplancton en un solo instrumento

En el Servicio de Microscopía Electrónica del ICM disponemos de las herramientas para caracterizar la composición química de células a nivel individual gracias al Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y sus detectores. Con el MEB podemos obtener imágenes de gran resolución (hasta 3 nm) y cuantificar la concentración elemental del fitoplancton mediante el Microanálisis de Rayos X (XRMA, en inglés).

El primer MEB fue adquirido en 1975 por el ICM (entonces Instituto de Investigaciones Pesqueras, IIP) y desde 1987 los MEB del ICM disponen de detectores de rayos X y un espectrómetro para el microanálisis elemental, hecho que demuestra el gran interés de los investigadores del IIP-ICM por el estudio de los organismos del plancton. El Servicio de Microscopía ha contribuido a la realización de numerosísimas publicaciones científicas, describiendo por primera vez nuevas especies de cocolitoforales, dinoflagelados y también de estructuras de crustáceos, cefalópodos y peces.

Recientemente, en el ICM hemos mejorado un método para el estudio de la composición elemental en fitoplancton mediante XRMA (Segura-Noguera *et al.* 2012; figura 2). Con esta técnica se pueden cuantificar cambios estequiométricos que experimentan las células según la disponibilidad de nutrientes y luz. Así, el ICM contribuirá a comprender en detalle la transferencia de los elementos químicos por la red trófica, y en situaciones de desequili-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

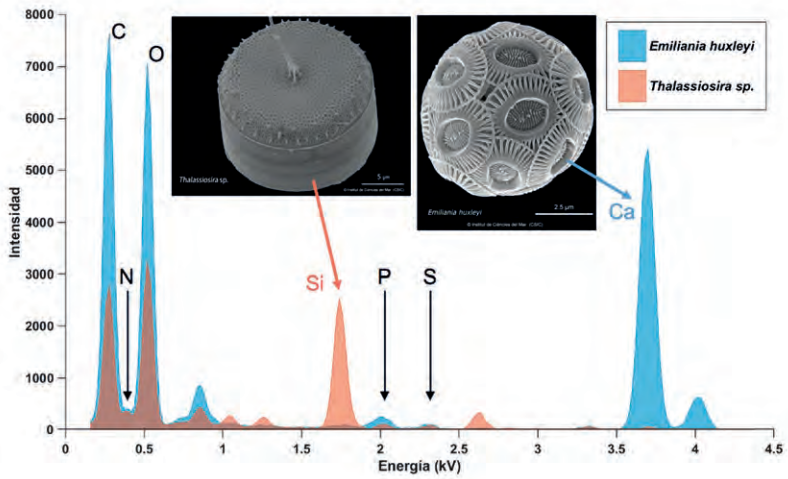


Figura 2. Espectros de rayos-X resaltando picos de elementos vitales y elementos característicos de diferentes grupos del fitoplancton: calcio (Ca) en la cocolitoforal *Emiliania huxleyi* y silicio (Si) en la diatomea *Thalassiosira* sp.

brios como en las proliferaciones nocivas de fitoplancton. También permitirá describir los ciclos biogeoquímicos actuales y en diferentes escenarios de cambio climático, donde el calentamiento de los océanos puede comportar cambios en la dinámica de estratificación y mezcla de la columna de agua. Estos cambios, como hemos explicado, condicionan la disponibilidad de nutrientes y luz para el fitoplancton del cual dependen los organismos marinos, y en última instancia, la humanidad.

Referencias

Berdalet E., Arin L., Vila M., Viure L. 2022. Proliferaciones de organismos fotosintéticos: cara y cruz de los pilares de los ecosistemas marinos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 56-58.

Redfield A.C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In: James Johnstone Memorial Volume, pp. 170-192.

Segura-Noguera M., Blasco D., Fortuño J.-M. 2012. An improved energy-dispersive X-ray microanalysis method to analyse simultaneously carbon, nitrogen, oxygen, phosphorus, sulfur, and other cation and anion concentrations in single natural marine microplankton cells. Limnol. Oceanogr. Methods 10: 666-680.

Segura-Noguera M., Blasco D., Fortuño J.-M. 2016. Taxonomic and Environmental Variability in the Elemental Composition and Stoichiometry of Individual Dinoflagellate and Diatom Cells from the NW Mediterranean Sea. PLoS ONE 11: e0154050.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14093

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.9. ¿Qué papel jugará el zooplancton en un océano futuro?

Albert Calbet, Enric Saiz

Las cosas buenas a menudo vienen en envases pequeños y, de hecho, los organismos más pequeños son los más numerosos y con frecuencia los más importantes para el funcionamiento de la naturaleza. El plancton es en su mayoría invisible al ojo humano, pero crucial para las redes tróficas marinas. Los organismos del plancton son responsables de la vida en la Tierra: nos proporcionan la mitad del oxígeno que respiramos y, sin ellos, no comeríamos pescado. Por el contrario, también son los precursores de los combustibles fósiles como el petróleo. Qué le vamos a hacer, nadie es perfecto.

Los principales componentes del plancton y sus funciones

En una cucharadita de agua de mar (aproximadamente 5 ml), podemos encontrar unos 50 millones de virus (¡no os preocupéis, no son dañinos para los humanos!), cinco millones de bacterias, algunos cientos de miles de pequeños flagelados unicelulares, aproximadamente cinco ciliados (figura 1) o dinoflagelados y, si tenemos suerte, un pequeño crustáceo como los copépodos (figura 2). La parte vegetal del plancton se llama fitoplancton y la parte animal zooplancton. Aunque el término zooplancton incluye tanto organismos unicelulares como multicelulares, normalmente separamos estos grupos por tamaño en microzooplancton (principalmente unicelular; 20-200 micras) y mesozooplancton (animales pluricelulares; 0,2-20 mm).

Cada grupo de zooplancton tiene su función en el ecosistema marino (Steinberg y Landry 2017), aunque podemos considerarlos a todos consumidores de bacterias, fitoplancton e incluso de otros miembros del zooplancton. Los organismos del microzooplancton, por ejemplo, son los principales herbívoros de los océanos y, por lo tanto, constituyen un eslabón clave en la transferencia de materia y energía a través de la red trófica (Schmoker *et al.* 2013). Los integrantes del mesozooplancton, en su mayoría pequeños crustáceos como los copépodos, también son consumidores voraces de fitoplancton

Figura 1. El ciliado tintínido *Favella* sp., un miembro habitual del microzooplancton (fuente: Albert Calbet).

Figura 2. *Calanus hyperboreus*, un importante copépodo ártico, cuyo hábitat se ve amenazado por el cambio climático (fuente: Albert Calbet).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

y microzooplancton, y son el principal alimento de muchos peces (y en ocasiones de las ballenas, aunque la mayoría prefiere el krill). A su vez, a través de su actividad metabólica, el zooplancton también ayuda a liberar los nutrientes acumulados en la materia viva, haciéndolos disponibles nuevamente para las algas; este proceso se llama reciclaje de nutrientes. ¿Pensabais que los humanos habíamos inventado el reciclaje? Pues resulta que existe desde hace millones y millones de años. De hecho, en el mar se utiliza casi todo y se desperdicia muy poco.

El zooplancton en un océano futuro

Es innegable que la Tierra se está calentando a un ritmo más rápido de lo que debería debido a causas meramente naturales. Sin embargo, es importante comprender que el clima de la Tierra no se puede entender sin el océano y viceversa. Por lo tanto, se espera que un aumento de la temperatura tenga consecuencias en la estabilidad de la columna de agua, y que afecte la extensión y la intensidad de los crecimientos estacionales de fitoplancton. Este hecho, a su vez puede influir en el reclutamiento de especies clave de copépodos en muchos ecosistemas. Por ejemplo, un mayor grado de estratificación y un menor contenido de nutrientes inorgánicos en las capas superficiales del océano pueden provocar cambios en la composición y el tamaño (serán más pequeños) de sus componentes microbianos. Esto a su vez resultará en una transferencia menos eficiente y rentable de energía hacia los copépodos y, por lo tanto, tendrá un efecto negativo sobre la producción de los copépodos, los peces, y la pesca en general. El calentamiento de los océanos también podría modificar la periodicidad y la intensidad de determinados afloramientos marinos, y tener consecuencias importantes para la productividad de todo el ecosistema marino y las principales pesquerías. A través de retroalimentaciones climáticas complejas, una temperatura más alta puede resultar en variaciones en la dirección e intensidad de las corrientes e influir en la distribución de las especies marinas. Por ejemplo, fenómenos como El Niño que controlan las pesquerías de la costa oeste de América del Sur dependen directamente de las condiciones climáticas. A una escala más local, el aumento de la frecuencia y amplitud de las proliferaciones de medusas y de algas nocivas (también relacionadas con otros impactos antropogénicos), la introducción de especies invasoras, y la expansión de zonas anóxicas en los mares y océanos son algunos ejemplos de los cambios que nos esperan en un futuro inmediato.

Aunque no todo está perdido (o tal vez sí)

A lo largo de la evolución, las características funcionales del plancton se han desarrollado estrechamente con su entorno, lo que los hace muy susceptibles al cambio climático. Sin embargo, el plancton también tiene cierta plasticidad y puede adaptarse a los cambios de temperatura, especialmente si son graduales. En la mayoría de los casos, las observaciones han demostrado que los organismos planctónicos en condiciones más cálidas terminan siendo más pequeños que a temperaturas más bajas. En el laboratorio también se ha visto que, tras un periodo de adaptación a temperaturas más elevadas, tanto el fitoplancton como el zooplancton acaban regulando sus tasas metabólicas y compensando los efectos de la temperatura. Si, por ejemplo, exponemos algas a temperaturas cinco grados por encima de la que normalmente viven, su tasa respiratoria superará su tasa de fotosíntesis. Esto se debe a que la respiración es más sensible que la fotosíntesis a los cambios térmicos. Sin embargo, después de muchas generaciones en las nuevas condiciones de temperatura, ambas tasas volverán a su equilibrio original.

¿Por qué debería importarnos? El problema es que, durante este proceso de adaptación, que puede durar años, la especie en cuestión se encuentra en desequilibrio metabólico y no es competitiva con otras especies mejor adaptadas. Un claro ejemplo es el desplazamiento del copépodo *Calanus finmarchicus* (que tiene afinidad por aguas frías) por *Calanus helgolandicus* (que tiene afinidad por aguas más calientes) en el mar del Norte (Edwards *et al.* 2013). La primera especie es muy prolífica y nutritiva, y gracias a ella se mantiene la pesquería de bacalao de la zona. Parece que *C. helgolandicus* tiene menos reservas

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

de lípidos que *C. finmarchicus*, por lo que el rendimiento de estas importantes pesquerías está cambiando. Encontramos otro ejemplo en los cambios biogeográficos en la composición de la comunidad de zooplancton causados por el calentamiento de los océanos. Estos desplazamientos de comunidades que buscan su temperatura idónea ciertamente afectarán la retención de carbono mediado por el zooplancton y su transferencia hacia la producción pesquera, aunque las comunidades en cuestión tendrán al menos la posibilidad de migrar. Sin embargo, aún se desconoce qué va a pasar en los trópicos, donde las especies locales ya se encuentran al límite de sus capacidades térmicas. ¿Sobrevivirá el plancton de estos ecosistemas a un aumento de temperatura como el esperado a finales de siglo? Es difícil de predecir, pero muchas especies seguramente se perderán en el camino.

Referencias

Edwards M., Bresnan E., Cook K., *et al.* 2013. Impacts of climate change on plankton. MCCIP Science Review, pp. 98-112.

Schmoker C., Hernandez-León S., Calbet A. 2013. Microzooplankton grazing in the oceans: impacts, data variability, knowledge gaps and future directions. J. Plankton Res. 35: 691-706.

Steinberg D. K., Landry M.R. 2017. Zooplankton and the ocean carbon cycle. Ann Rev Mar Sci. 9: 413-444.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14094

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.10. El océano recicla materia orgánica y secuestra carbono

Miguel Cabrera-Brufau, Pedro Cermeño, Cèlia Marrasé

El fitoplancton marino son microorganismos fotosintéticos que utilizan radiación solar y carbono y nutrientes inorgánicos para producir materia orgánica (MO) y liberar oxígeno molecular. La fotosíntesis del fitoplancton produce tanto materia orgánica particulada (MOP) como materia orgánica disuelta (MOD), estas dos fracciones están sujetas a diferentes consumos y transformaciones biológicas, así como a distintos procesos de transporte físico. La MOP fitoplanctónica puede ser ingerida directamente por el zooplancton, animales microscópicos que a su vez sirven como alimento para organismos más grandes. Mientras que la MOD entra a la red trófica a través de microbios, que consumen los compuestos disueltos y a su vez luego son ingeridos por otros organismos. Ambas fracciones pueden ser exportadas a aguas profundas; la MOP puede hundirse por sí sola, y ser transportada por organismos y hundimiento de masas

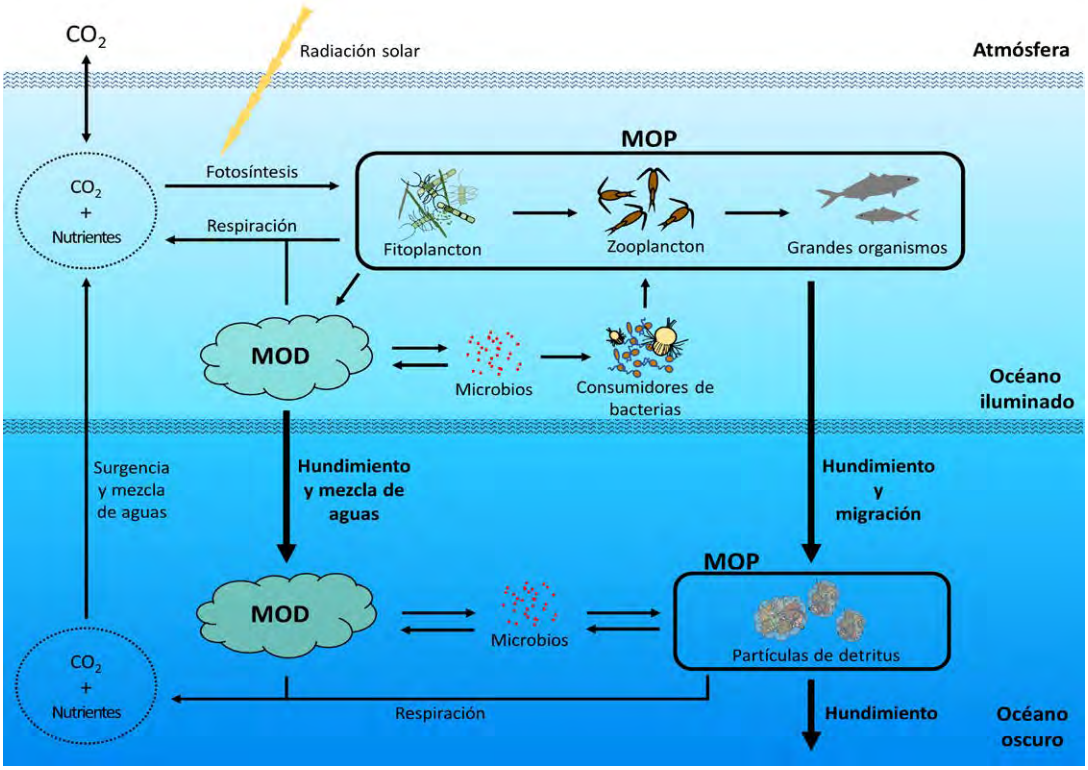


Figura 1. Esquema de los principales procesos de exportación de materia orgánica de la bomba biológica de carbono (BBC). MOD (materia orgánica disuelta); MOP (materia orgánica particulada).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

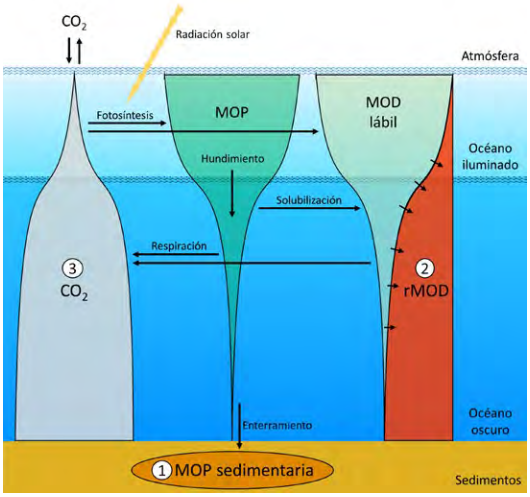


Figura 2. Esquema de las tres formas de almacenamiento de carbono marino que dependen de la bomba biológica de carbono: MOP sedimentaria (1), MOD recalcitrante (2) y CO_2 en el océano profundo (3).

de agua, mientras que la MOD solo puede exportarse a través de procesos físicos de hundimiento y de mezcla. Los diferentes procesos que transportan MO de la superficie a aguas más profundas se conocen colectivamente como la bomba biológica de carbono (BBC) (figura 1). A medida que la MO se transporta hacia abajo, es degradada y respirada, liberando nutrientes y CO_2. La BBC, a través de la exportación y procesado de materia orgánica, mantiene gradientes verticales de nutrientes, CO_2, MOD y MOP que tienen importantes consecuencias para el funcionamiento de los ecosistemas marinos y la modulación del clima terrestre.

Reciclaje de materia orgánica

La producción primaria del fitoplancton marino está generalmente limitada por la disponibilidad de luz solar y por la concentración de nutrientes inorgánicos (principalmente fósforo y nitrógeno). Por lo tanto, la dinámica y distribución de estos nutrientes inorgánicos son de suma importancia para sustentar los ecosistemas marinos que, a su vez, influyen en la distribución de los nutrientes inorgánicos a través de actividades biológicas. Esta interconexión de nutrientes y fitoplancton está en gran medida gobernada por la radiación solar: la superficie del océano iluminado por el sol está dominada por la fotosíntesis, que consume nutrientes inorgánicos, mientras que en la oscuridad del océano profundo la respiración de MO libera nutrientes que se acumulan hasta que el afloramiento de aguas y la mezcla vertical los trae de vuelta a la superficie.

La mayor parte de la MO es degradada y respirada en las capas superficiales del océano, reciclando nutrientes que pueden sustentar algo de producción primaria. Esto se denomina producción reciclada y es el principal proceso que suministra nutrientes a regiones como los giros tropicales, donde la marcada estratificación térmica evita que las aguas profundas, ricas en nutrientes, lleguen a la superficie. Estos sistemas son relativamente improductivos; el reciclaje microbiano mantiene comunidades dominadas por fitoplancton de pequeño tamaño, incapaces de sostener pesquerías importantes o de exportar MO más allá de la zona iluminada. Por el contrario, en regiones donde las aguas profundas ricas en nutrientes emergen a la superficie, la producción primaria es potenciada; el fitoplancton puede utilizar no solo los nutrientes reciclados localmente, sino también los acumulados en aguas profundas durante su viaje por el océano profundo. Este aporte «externo» de nutrientes mantiene lo que se conoce como producción nueva y permite el crecimiento de especies de fitoplancton de gran tamaño, que sustentan las pesquerías mundiales y la exportación de MO a las profundidades del océano a través de la cadena trófica clásica. En general, toda la vida en los océanos depende del reciclaje de materia orgánica y nutrientes, ya sea en la superficie (producción reciclada) o en las profundidades del océano (producción nueva) (Eppley y Peterson 1979).

Secuestro de carbono

La capacidad de los océanos para secuestrar carbono está determinada por procesos físicos, químicos y biológicos y el carbono puede ser almacenado en formas tanto orgánicas como inorgánicas. La exportación de materia orgánica a las profundidades mediante la BBC deriva en tres principales mecanismos de secuestro de car-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

bono importantes para la regulación del clima terrestre (figura 2).

Primero, el hundimiento de MOP hace que una parte de ésta quede enterrada en los sedimentos marinos. Esta fracción se estima que representa menos del 1% de la MO producida cada año en la superficie, sin embargo, es uno de los principales mecanismos biológicos que regulan los niveles de CO_2 atmosférico a escalas de tiempo geológicas (De La Rocha 2007). Un segundo mecanismo de almacenamiento de carbono orgánico consiste en la acumulación de MOD recalcitrante (rMOD) en las profundidades del océano como subproducto de la degradación microbiana de MOD lábil. Múltiples factores pueden hacer que la MOD sea resistente a la degradación, desde su intrínseca complejidad y diversidad química hasta las condiciones ambientales de las profundidades marinas o la identidad de los descomponedores bacterianos. La cantidad de carbono acumulado en forma de rMOD es comparable a la del CO_2 atmosférico y puede ser secuestrado con mínimas pérdidas durante miles de años (Hansell 2013). Finalmente, incluso si todo el carbono fijado en la materia orgánica por el fitoplancton es respirado y liberado como CO_2 en los océanos, la profundidad a la que esto sucede puede tener un impacto importante en el clima de la Tierra. Cuanto más profundo se respire la MO, más tiempo tardará su carbono en entrar de nuevo en contacto con la superficie. El gradiente vertical de CO_2 limita el intercambio de este gas con la atmósfera y hace que el océano almacene más carbono del que podría si ningún proceso biológico interviniera. Si toda la vida en los océanos desapareciera, este gradiente eventualmente desaparecería y el exceso de CO_2 se liberaría, duplicando aproximadamente la concentración atmosférica de este gas de efecto invernadero (Boyd 2015).

Estos tres mecanismos de secuestro de carbono dependen, en mayor o menor medida, de la degradabilidad de la MO producida por el fitoplancton. El carbono de la MO resistente alcanza mayores profundidades, donde puede acumularse bien disuelto como rMOD y CO_2 o enterrado en los sedimentos en forma de MOP. Se prevé que el cambio climático modifique las distribuciones de diferentes tipos fitoplanctónicos, favoreciendo a grupos cuya MO es fácil de degradar en detrimento de otros que producen MO más resistente (Cabrera-Brufau *et al.* 2021). Estos cambios probablemente reducirán la capacidad biológica del océano para secuestrar carbono, lo que podría exacerbar el calentamiento global.

El fitoplancton marino no solo regula a la distribución de nutrientes y, en esencia, sustenta toda la producción biológica marina, incluyendo recursos importantes como la pesca. Mediante la regulación del clima de la Tierra, las consecuencias de sus actividades alcanzan a toda la vida en nuestro planeta. Sin embargo, estamos lejos de comprender completamente todos los procesos que controlan el reciclaje de MO y su eventual acumulación en el océano, lo que será fundamental para predecir con precisión y, con suerte, mitigar las consecuencias del cambio climático.

Referencias

Boyd P.W. 2015. Toward quantifying the response of the oceans' biological pump to climate change. Front. Mar. Sci. 2: 77.

Cabrera-Brufau M., Arin L., Sala M.M., *et al.* 2021. Diatom dominance enhances resistance of phytoplanktonic POM to mesopelagic microbial decomposition. Front. Mar. Sci. 8: 683354.

De La Rocha C.L. 2007. The Biological Pump, In: Treatise on Geochemistry (Elsevier), 1-29.

Eppley R.W., Peterson B.J. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. Nature 282: 677-680.

Hansell D.A. 2013. Recalcitrant dissolved organic carbon fractions. Ann. Rev. Mar. Sci. 5: 421-445.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14095

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.11. Estudiar el litoral. Entender la frontera

Jordi Camp, Eva Flo, Albert Reñé, Nagore Sampedro, Esther Garcés

Litoral es la parte de la superficie terrestre próxima a la línea de contacto entre tierra y mar. Como toda frontera es más concepto que lugar. No tiene entidad física ni por tanto propiedades. Lo relevante es lo que sucede a cada lado y las interacciones mutuas que se materializan en flujos a su través. Esta aproximación al litoral como frontera es una simplificación que resulta muy útil para abordar las problemáticas de las aguas marinas litorales y su relación con las actividades humanas.

Entender la frontera

El mar próximo al continente es muy distinto del resto –más heterogéneo, variable y productivo (Flo *et al.* 2011)– principalmente por efecto de los flujos de materia procedentes de tierra firme (figura 1). Las comunidades de organismos marinos litorales están modeladas de acuerdo con estos flujos. Todo el ecosistema litoral depende de ellos y evoluciona a lo largo del espacio y el tiempo en función de las modificaciones de los flujos.

Los flujos continentales están hoy totalmente influidos por las actividades humanas. El proceso comenzó tímidamente en el neolítico cuando superamos la etapa de cazadores-recolectores e iniciamos el proceso de asentamiento y organización del territorio, actividad que no ha hecho más que crecer desde entonces. Los mapas actuales de usos del suelo son el mejor indicador, no solo del estado de los continentes, sino también de las características que podemos esperar de las aguas marinas litorales y los organismos que las habitan (Flo *et al.* 2019, Basterretxea *et al.* 2018).

El litoral fue y es importante para la humanidad. *Homo sapiens* nació tierra adentro del continente africano, pero ahora sabemos que, en momentos críticos de su evolución, cuando toda la humanidad eran unos pocos centenares de individuos, necesitó del litoral para sobrevivir como especie. Hoy, con cerca de ocho mil millones, más de la mitad de la humanidad vive en el litoral, que representa menos del 10% de la superficie terrestre. El mar litoral sigue siendo el que más interesa a la sociedad pues es el que más conoce, aprovecha y disfruta.

Estudiar el litoral

Las ciencias de la naturaleza surgen como respuesta a la necesidad de prever el futuro para sobrevivir. Hay que estudiar para entender, es necesario entender para gestionar y así gobernar en lo posible el futuro y permanecer como especie. Las ciencias de la naturaleza como herramienta de gestión en tierra se apoyan sobre más de diez mil años de experiencia de prueba y error. En el mar, la gestión del ecosistema tiene apenas cien años de recorrido; recordemos que durante el primer tercio del siglo xx aún se consideraban los recursos marinos como prácticamente inagotables.

La gran inercia del sistema marino hace que las respuestas a las presiones sean poco aparentes a corto plazo, y también de lenta recuperación. Cuando la capacidad de generar presiones es muy alta, como pasa en la actualidad con la acción humana, y los impactos y retornos se dilatan mucho en el tiempo, la prueba y el error no sirve. En este caso, se necesita anticipación, que requiere a su vez un conocimiento profundo

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

de los mecanismos y procesos fisicoquímicos y biológicos que gobiernan el funcionamiento del sistema. Obtener este conocimiento profundo es la razón última de la existencia de los centros de investigación marina.

Hay una fuerte presión social para primar los valores de uso de la naturaleza sobre cualquier otro y en el mar más aún, al ser menos aparente la conexión entre conservación y funcionamiento. Gran parte de los objetivos de los centros de investigación marina durante el siglo xx han estado ligados a resolver problemas de exploración y gestión pesquera, extracción de minerales del fondo marino, dinámica marina relacionada con la navegación, etc. Nuestro propio instituto nació como Instituto de Investigaciones Pesqueras en un momento en que la pesca era una parte importante de la economía del país. Aun hoy, los criterios de gestión siguen muy ligados a los valores de uso, prueba de lo cual es que seguimos hablando de servicios ecosistémicos, mar limpio y productivo, pesca sostenible, etc.

Sin renunciar a todo ello, hay que ir más allá. Necesitamos profundizar en el conocimiento del funcionamiento íntimo del ecosistema marino litoral aprovechando las posibilidades que nos ofrecen las nuevas tecnologías, desde la biología molecular a los sensores remotos. Debemos trabajar más en visiones holísticas como, por ejemplo, las que relacionan la ordenación y usos del territorio con los flujos continentales que llegan al mar. Solo así, tendremos herramientas de gestión de la calidad del agua costera, de la que depende el estado y la evolución del ecosistema litoral. Hay que fijar prioridades de estados deseables y posibles de las comunidades biológicas litorales, sin olvidar los valores de uso del litoral, que la sociedad sigue demandando fuertemente. Pero como no todo es posible en todas partes y al mismo tiempo, hay que abordar con valor los problemas de planificación espacial. En la segregación de actividades hay que ir más allá de los criterios basados solo en los servicios ecosistémicos, que frecuentemente se sesgan por motivos especulativos. Hay que introducir cada vez más criterios de conservación fundamentados en valores éticos y patrimoniales.

Figura 1. Costa sur de Cataluña. Al fondo, el pueblo de Alcanar. La circulación compleja de sedimentos litorales resuspendidos en el mar por un viento incipiente, contrasta con un continente perfectamente controlado y ordenado. La imagen ilustra las diferencias de conocimiento y predictibilidad entre ambos lados de la frontera litoral (Autor J. Camp).

Nuestra institución participa de esta historia ligada al uso del mar, pero desde siempre ha mantenido la inquietud por el conocimiento básico y la visión holística. Gracias a ello, fue y sigue siendo referente en muchos campos de las ciencias del mar. Esta posición de privilegio obliga, frente a la sociedad que nos paga, a marcar directrices en la relación de la humanidad con el mar en general y, muy especialmente, con su parte más amenazada: el litoral. Nuestra acreditada excelencia científica da autoridad moral para que se nos escuche y a ello debemos dedicar parte de nuestro esfuerzo.

Referencias

Basterretxea G., Torres-Serra F.J., Alacid E., Anglès S., Camp J., Ferrera I., Flo E., Font-Muñoz J.S., Jordi A., Reñé A., Salgado-Hernanz P.M., Sampedro N., Garcés E. 2018. Cross-Shore Environmental Gradients In The Western Mediterranean Coast And Their Influence On Nearshore Phytoplankton Communities. Front. Mar. Sci. 5: 78.

Flo E., Garcés E., Manzanera M., Camp J. 2011. Coastal Inshore Waters In The NW Mediterranean: Physicochemical And Biological Characterization And Management Implications. Estuar. Coast Shelf Sci. 93: 279-289.

Flo E., Garcés E., Camp J. 2019. Land Uses Simplified Index (LUSI): Determining Land Pressures And Their Link With Coastal Eutrophication. Front. Mar. Sci. 6: 18.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14096

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.12. ¿Por qué estudiamos las zonas polares?

Clara Cardelús, Vanessa Balagué, Magda Vila

Los polos siempre han tenido un atractivo inherente al propio hecho de tratarse de zonas remotas, con un acceso limitado, en el que llegar recuerda los viajes épicos de los primeros exploradores y exploradoras, y este sentimiento de aventura también acompaña muchas de las actuales campañas polares. Pero, aparte de este espíritu aventurero, la investigación en los polos hace años que se lleva a cabo con la voluntad de profundizar en el conocimiento científico que se tiene de estas zonas (Balagué *et al.* 2021).

Descubriendo los polos

En el caso de las expediciones científicas a la Antártida, en particular, el Institut de Ciències del Mar (ICM) ha estado estrechamente involucrado desde hace muchos años, sobre todo gracias a la voluntad, esfuerzo y perseverancia de personas como Antoni Ballester, Josefina Castellví, Marta Estrada, Joan Rovira y Agustí Julià, que fueron pioneras de la investigación antártica estatal desde el ICM, impulsando la creación de la primera base antártica española, la BAE Juan Carlos I, en 1987 (Castellví 2007, Estrada 2020). En el caso de la investigación en el Ártico, la presencia de campañas con personal investigador y técnico del ICM empezó más tardíamente que en el Polo Sur. Fue durante la primera década de los dos mil, y concretamente con la incorporación de España como miembro del Consejo Ártico en 2006, cuando se hicieron más frecuentes los trabajos de investigación en este polo.

Los océanos Ártico y Antártico ocupan el 10% de la superficie total del océano. A pesar de representar esta pequeña proporción, tienen un papel crucial en la regulación climática global, ya que es donde tiene lugar la formación de agua profunda, lo que podríamos interpretar como el inicio de la llamada cinta transportadora, que distribuye calor y nutrientes a lo largo del viaje por el océano global y mantiene estable el clima de la Tierra, la producción y la vida en el océano. Además, las regiones polares son laboratorios naturales en que las condiciones naturales extremas y las localizaciones tan aisladas hacen posible el estudio de fenómenos naturales y procesos fundamentales que no son factibles en otras zonas. Por poner un ejemplo, es especialmente relevante para los estudios de la interacción entre el océano y la atmósfera que, por su condición prístina y la lejanía de la actividad antropogénica, se realiza en las condiciones más puras posibles. De todos modos, no debemos olvidar que la contaminación ambiental es un fenómeno global que incluso llega a los polos, donde los contaminantes se introducen y afectan las redes tróficas polares. El estudio de estos procesos nos da, a la vez, información de la capacidad que tienen algunos de estos compuestos químicos de persistir en el tiempo y de viajar largas distancias, impactando de esta manera en la contaminación global.

Océanos polares y cambio global

La presencia de hielo y nieve permanente en las zonas polares es objeto de estudio multidisciplinar. En cuanto al aspecto atmosférico y climático, esta cubierta blanca hace incrementar el efecto albedo en los polos, reflejando la luz solar y manteniendo la temperatura del planeta. Indudablemente, el estudio de la pérdida de hielo marino como consecuencia del calentamiento planetario se hace indispensable para poder entender las predicciones futuras, todavía muy inciertas, en un clima cambiante (figura 1). La fusión de capas de hielo y glaciares en las regiones polares puede ejercer, pues, una fuerte influencia tanto en la meteorología presente como en el clima futuro y en la circulación oceánica (Programa Mundial de Investigación del

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Paisaje helado en el estrecho de Gerlache, Antártida. Se puede apreciar el hielo marino casi derretido, en contraste con el hielo continental permanente del glaciar. Autora: Clara Cardelús.

Clima). Por lo tanto, la investigación de la criosfera y su dinámica es especialmente relevante en el contexto actual de emergencia climática.

La reducción del 40 por ciento del espesor del hielo marino ártico durante las últimas cuatro décadas y el colapso de las plataformas de hielo en la Antártida occidental son algunos de los ejemplos más dramáticos de los últimos cambios que han captado el interés general y han suscitado diversas reflexiones en un escenario de cambio global. En cuanto a los eventos extremos relacionados con la actividad sísmica presente bajo el hielo, se sabe que en el caso de generarse más erupciones en zonas polares, la deposición de grandes cantidades de cenizas volcánicas sobre el hielo de los glaciares podría afectar a su albedo, y acelerar aún más la fusión de hielo.

Esta retirada de hielo de los glaciares también haría cambiar la estructura del permafrost y modificaría la actividad metabólica de los microorganismos polares terrestres, adaptados a vivir en estas condiciones extremas y, a la larga, facilitaría su colonización por parte de otros organismos vegetales y animales. Respecto a la vida en los océanos polares, hay muchos procesos aún poco conocidos, en los que la contribución de cada grupo de la red trófica es vital para entender la recirculación de nutrientes, su intervención en los ciclos biogeoquímicos, su participación en procesos como la formación de nubes gracias, en parte, a los gases exhalados por algunos organismos, y también como la actividad biológica puede capturar el CO_2 atmosférico y acabar siendo transportado a las profundidades. Si los organismos planctónicos y bentónicos de los océanos no son capaces de adaptarse al aumento de temperatura actual, el equilibrio ecológico de estos ecosistemas gélidos podría verse amenazado, afectando toda la red trófica hasta los grandes depredadores.

El hielo es también un elemento de interés en los estudios de paleoclimatología, para conocer cómo fue el clima del pasado y tratar de entender y prever cómo será en el futuro. La extracción de testigos de hielo y el estudio de los componentes retenidos en las burbujas de aire del pasado nos puede ayudar a saber, por ejemplo, cómo es la relación que existe entre el CO_2 y la temperatura, y llegar a comprender lo que está sucediendo en estos momentos, en que el aumento de temperatura no había tenido tanto empuje como actualmente.

La necesidad de entender cómo funciona la física, química, geología y biología de los polos, ya sea recogiendo datos en expediciones oceanográficas o haciendo uso de las observaciones por satélite, es de gran importancia. La ciencia polar puede beneficiar a los seres vivos que la habitan, incluida la humanidad, y ayudar a proteger el planeta. En este sentido, el papel fundamental de los polos en el contexto climático actual lleva consecuentemente a la necesidad de protección ambiental, y en especial la sensibilización y formación que se puede dar en el ámbito educativo. Es necesario que llegue a las escuelas el mensaje de que todo lo que ocurre en los polos tiene repercusiones globales, y las nuevas generaciones entiendan que estas regiones remotas son parte protagonista de cuestiones tan actuales como el cambio global y la emergencia climática.

Referencias

Balagué, V., Cardelús, C., Vila, M. (eds.). 2021. Observando los polos. Colección Divulgación CSIC, Editorial Los Libros de la Catarata.

Castellví J. 2007. De cómo España abrió su ruta para la investigación antártica. Arbor. Ciencia, Pensamiento y Cultura. CLXXXIII 727: 739-747.

Estrada M. 2020. Antoni Ballester i l'Antàrtida. Del Magga Dan a la Base Antàrtica Espanyola. Homenatge a Antoni Ballester i Nolla. Recull d'escrits. ICM - CSIC. Barcelona, pp. 41-50.

Programa Mundial d'Investigació del Clima: https://www.wcrp-climate.org/grand-challenges/grand-challenges-overview

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14097

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.13. La acidificación oceánica: tendencias, efectos y qué nos queda por aprender

Carles Pelejero, Blanca Figuerola, Eva Calvo

Desde la Revolución Industrial, debido a la quema de combustibles fósiles, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera está aumentando progresivamente, pasando de unas 278 ppm (partes por millón en volumen) hasta las actuales 414 ppm (media para el año 2020 en el observatorio de Mauna Loa, Hawai). Esta concentración sería aún mayor si no fuera por los océanos, que actualmente absorben aproximadamente una cuarta parte del CO_2 que los humanos emitimos a la atmósfera. En contrapartida, sin embargo, esta absorción está provocando cambios en la química del agua de mar. Una vez el CO_2 pasa del aire al agua, interviene en una serie de reacciones y equilibrios químicos que se traducen en un aumento de la acidez y, por tanto, en una disminución del pH.

Tendencias

Se calcula que, hoy en día, el pH de la superficie de los océanos ha disminuido ya unas 0,1 unidades (de 8,2 a 8,1) desde la época preindustrial, y las proyecciones de futuro indican que, a finales del siglo XXI, dependiendo de las emisiones antropogénicas de CO_2, el pH continuará disminuyendo unas 0,3 - 0,4 unidades más (figura 1).

Para determinados puntos de los océanos en mar abierto, disponemos de series temporales donde se han hecho medidas instrumentales de pH durante varias décadas que corroboran la progresiva acidificación (Bates *et al.* 2014). En zonas costeras, la suma de diferentes procesos (p.e. respiración, disolución, producción primaria, calcificación, mezcla vertical, eutrofización) hacen que la variabilidad en el pH sea más amplia y rápida que en mar abierto, y que a menudo se requieran series más largas para detectar su progresiva disminución.

Efectos

Los organismos calcificadores son, *a priori*, los que se verán afectados por la acidificación de una manera más evidente. Al mismo tiempo que disminuye el pH también lo hace la concentración de iones carbonato, que es un parámetro crítico

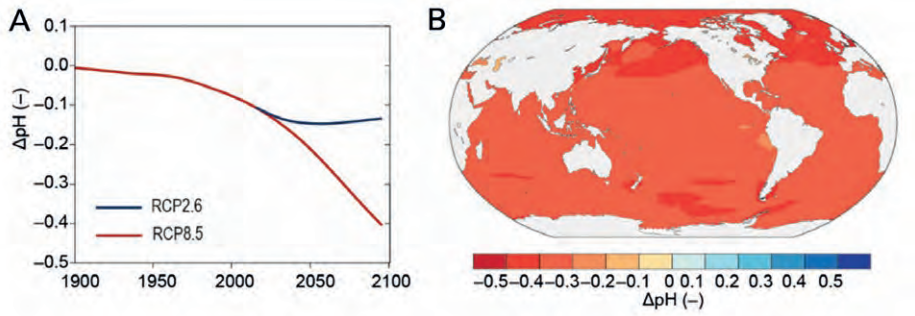


Figura 1. A, simulación de los cambios pasados y futuros del pH superficial global de los océanos según escenarios optimistas (RCP2.6) y pesimistas (RCP8.5). B, cambios en el pH superficial de los océanos para finales del siglo XXI en relación con el período 1850-1900 según un escenario pesimista (RCP8.5). Figura de IPCC (2019, página 470). RCP (del inglés, *Representative Concentration Pathways*).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

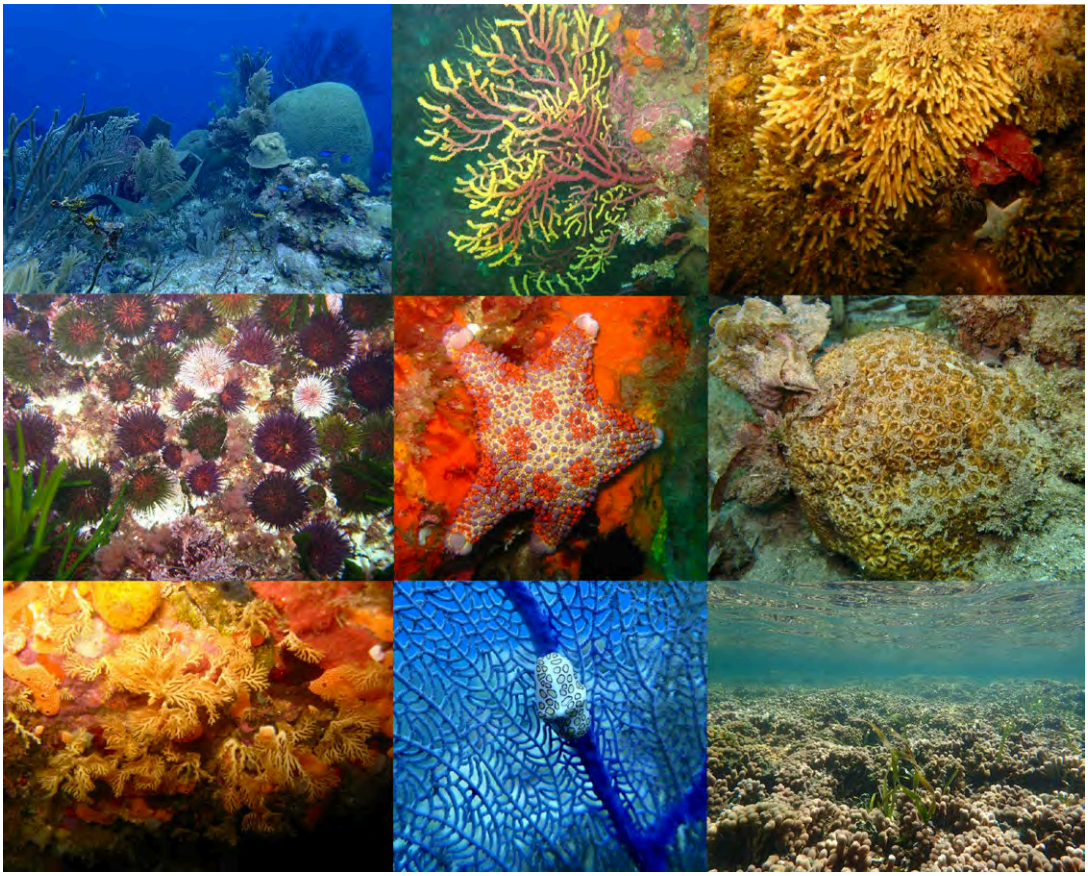


Figura 2. Organismos calcificadores con diferentes mineralogías. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: arrecife de coral de la Barrera de coral de Belice, gorgonias rojas *(Paramuricea clavata)* de las Islas Medes, colonias ramificadas del briozoo *Cellaria malvinenses* de las Islas Malvinas, erizos de mar común *(Paracentrotus lividus)* con diferente coloración (mar Cantábrico), estrella de mar *Asterodiscides truncatus* de Poor Knights Islands, Nueva Zelanda, colonia de coral semiesférica de madrépora mediterránea *(Cladocora caespitosa)*, colonias de briozoo del género *Hornera* de las Islas Malvinas, tornillo lengua de flamenco *Cyphoma gibbosum* alimentándose de una gorgonia en la Barrera de coral de Belice y arrecife de coral formado por especies del género *Porites* (Bocas del Toro, Panamá). Fotos de Blanca Figuerola.

para que estos organismos puedan construir sus estructuras de carbonato de calcio (esqueletos de los corales, conchas de los moluscos). Además, estas estructuras pueden ser más o menos vulnerables a la disolución según su mineralogía. Los organismos calcificadores generalmente depositan dos formas minerales: la calcita, como en el caso de los foraminíferos (protozoos) y los cocolitofóridos (algas unicelulares), y la aragonita, como en el caso de los corales y los pterópodos (moluscos pelágicos), que es generalmente más soluble en agua que la calcita. Algunas especies pueden incorporar también cantidades importantes de magnesio (Mg) en la calcita, como es el caso de muchos equinodermos y briozoos. La calcita alta en Mg puede ser incluso más soluble que la aragonita. Por otra parte, el contenido de Mg en estos esqueletos generalmente aumenta con la temperatura. Por tanto, en estos organismos se prevé que el calentamiento y la acidificación de los océanos aumenten la vulnerabilidad de sus esqueletos a la disolución.

Los organismos calcificadores juegan papeles clave en los ecosistemas y en el ciclo del carbono ya que, dependiendo de los organismos, 1) son el alimento básico de animales de niveles tróficos superiores, 2) constituyen hábitats únicos para muchas especies, incluyendo especies comerciales (p.e. corales y briozoos), y 3) actúan como reservorio de carbono, ya que sus

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

esqueletos o conchas se acumulan y preservan en los sedimentos de los fondos marinos cuando los organismos mueren (p.e. foraminíferos y cocolitofóridos) (figura 2). Aparte de los efectos en los calcificadores, la progresiva acidificación también puede acelerar la producción de algas tóxicas, alterar la fisiología y los valores nutricionales de diferentes especies (p.e. reducción de ácidos grasos omega-3) con consecuencias negativas para el resto de la red trófica, entre otros.

Últimamente, los vínculos entre el estado de los océanos y la salud humana también se están poniendo en evidencia, y la acidificación oceánica es una de las problemáticas que también tendría impactos (Falkenberg *et al.* 2020). En este trabajo se sugiere que este fenómeno podría repercutir en la salud y el bienestar humano, por ejemplo, a través de las alteraciones en la cantidad y calidad de los recursos alimenticios marinos, o de la disrupción de los entornos naturales de alto interés para las actividades recreativas (p.e. arrecifes de coral). Más allá de estos aspectos, la acidificación podría tener repercusiones en ámbitos muy diferentes; muy recientemente, por ejemplo, un estudio ha sugerido que la disminución del pH podría venir acompañada de un aumento en la intensidad de los rayos que descargan sobre los océanos (Asfur *et al.* 2020).

¿Qué nos queda por aprender?

La investigación sobre la problemática de la acidificación oceánica experimentó un gran impulso en la década de los dos mil, que continúa en la actualidad. Inicialmente, buena parte de la investigación se centró en los organismos calcificadores, sobre todo los corales tropicales, que constituyen uno de los ecosistemas más ricos de la Tierra y son uno de los más afectados por este fenómeno. Con posterioridad, se fue ampliando el rango de organismos estudiados, y todo apunta a que este proceso dará lugar a perdedores y ganadores, provocando cambios progresivos de unas especies por otras. Más recientemente, también se han empezado a tener en cuenta las posibles sinergias entre la acidificación y otros cambios globales. como por ejemplo el calentamiento, incorporando el hecho de que los organismos marinos están sujetos a estreses múltiples más que individuales.

En cuanto a direcciones futuras de investigación sería necesario incidir, entre otras, en 1) el fortalecimiento de los programas de monitoreo instrumental en toda la columna de agua para delimitar la variabilidad y las tendencias en la progresiva acidificación, 2) la experimentación con organismos marinos, combinando diferentes tipos de estrés aparte de la acidificación, como por ejemplo el calentamiento, la desoxigenación, los cambios en la salinidad y los nutrientes, 3) la profundización en el estudio de los impactos según las diferentes mineralogías de los calcificadores, 4) la experimentación y estudio de los ambientes naturalmente acidificados (p.e. en zonas con emanaciones de CO_2 de origen volcánico), 5) la determinación de posibles ambientes que podrían servir como refugios por su papel como reguladores de la acidez (p.e. bosques marinos de fanerógamas), y 6) la contextualización de los cambios presentes a través de la reconstrucción de los niveles de pH en el pasado, por ejemplo a través del análisis de isótopos de boro en fósiles de carbonato de calcio (Pelejero *et al.* 2010).

Agradecimientos: Blanca Figuerola ha recibido financiación del programa de becas postdoctorales Beatriu de Pinós financiado por la Secretaría de Universidades e Investigación (Gobierno de Cataluña) y por el programa Horizon 2020 de investigación e innovación de la Unión Europea bajo el acuerdo de concesión de Marie Sklodowska-Curie n.º 801370 (Licencia de incorporación 2019 BP 00183).

Referencias

Asfur M., Silverman J., Price C. 2020. Ocean acidification may be increasing the intensity of lightning over the oceans. Sci. Rep. 10: 21847.

Bates N.R., Astor Y.M., Church M.J. *et al.* 2014. A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO_2 and ocean acidification. Oceanography 27: 126-141.

Falkenberg L.J., Bellerby R.G.J. Connell S.D. *et al.* 2020. Ocean Acidification and Human Health. Int. J. Environ. Res. Public Health 17: 4563

IPCC. 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In: Pörtner H.-O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V. *et al.* (eds). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf

Pelejero C., Calvo E., Hoegh-Guldberg O. 2010. Paleo-perspectives on ocean acidification. Trends Ecol. Evol. 25: 332-344.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14098

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

4.14. Utilidad y retos de los modelos de ecosistemas marinos para una mejor comprensión y gestión del océano

Marta Coll, Jeroen G. Steenbeek

Los océanos del mundo están experimentando cambios ecológicos y socioeconómicos rápidos debido al cambio medioambiental global, donde las actividades humanas que afectan a los recursos marinos están distribuidas de forma heterogénea y se solapan espacialmente. Históricamente, la explotación de los recursos marinos ha sido uno de los principales motores del cambio, seguido de la contaminación, la destrucción mecánica del hábitat y, más recientemente, la introducción de especies y el cambio climático provocado por el ser humano. El cambio ambiental repercute en las propiedades biofísicas y ecológicas del océano y afecta a su organización biológica a múltiples niveles, incluidos los genes, las especies, las poblaciones, las comunidades, las interacciones ecológicas y las distribuciones geográficas de las especies marinas.

La transformación hacia la sostenibilidad es clave para adaptar nuestros sistemas socioecológicos a los cambios del entorno. Sin embargo, los conocimientos científicos sobre cómo seguirán cambiando los océanos en el futuro son limitados. Esto incluye profundizar en nuestro conocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas marinos y cómo el cambio climático los alterará, con posibles sinergias con otros motores socioecológicos. Este tipo de conocimiento es esencial para gestionar las actividades humanas de forma informada y proactiva, posibilitando la mitigación de los impactos negativos y la adaptación a los cambios, al mismo tiempo que se garantiza la conservación de los recursos y ecosistemas y la resiliencia socio-econòmica.

En respuesta, existe un fuerte impulso para la implementación de una gestión pesquera basada en el ecosistema (Christensen y Maclean 2011) (*Ecosystem-Based to Fisheries Management*, o EBFM), y de forma más genérica de una gestión basada en el ecosistema (*Ecosystem-Based Management,* o EBM), que incluye el establecimiento de iniciativas de gestión que consideran los cambios en las actividades humanas, el ecosistema y el medio ambiente, y sus interacciones y retroalimentaciones (Dolan *et al.* 2016) (figura 1).

Los modelos de ecosistemas marinos como herramientas de integración emergentes

Para predecir el futuro del ecosistema marino y sus servicios ecosistémicos necesitamos adoptar una visión integrada del océano como sistema socioecológico que abarque la dinámica de los componentes vivos y no vivos –tanto comerciales como no comerciales– y los efectos de las actividades antropogénicas y la variabilidad y el cambio climático. Unas técnicas de modelización potentes pueden integrar esta visión en marcos holísticos para comprender mejor los efectos acumulativos de las actividades humanas en un contexto dinámico espacio-temporal (Steenbeek *et al.* 2021).

En las últimas décadas se han desarrollado ampliamente las técnicas de modelización tanto en el ámbito terrestre como en el marino. El rápido desarrollo de los modelos de circulación atmosférica y oceánica, incluidos los procesos biogeoquímicos, en los modelos del sistema terrestre (*Earth System Models,* o ESMs), ha mejorado la capacidad científica para proyectar el sistema climático, lo que a su vez ha contribuido a informar al Grupo

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas.

Por otro lado, se han desarrollado modelos de ecosistemas para investigar el funcionamiento de los mismos más allá de los productores primarios. Estos modelos son marcos conceptuales y teóricos que representan una comprensión sintetizada de todas las partes principales de un ecosistema y pueden integrar grandes cantidades de conocimientos sobre los ecosistemas integrando diferentes niveles de biodiversidad, procesos y factores de cambio (Fulton 2010). En las últimas tres décadas, se ha producido un gran aumento de estos marcos de modelización, especialmente en el ámbito marino con el desarrollo de los modelos de ecosistemas marinos (*Marine Ecosystem Models*, o MEMs) (figura 2). Los MEMs incluyen varios enfoques y se han aplicado para analizar la dinámica pasada y futura de los ecosistemas marinos y testar las interacciones de múltiples factores de cambio y de estrategias de gestión alternativas. Actualmente se utilizan para proyectar cambios pasados y futuros en los ecosistemas marinos a escala local, regional o global.

Los MEMs regionales se despliegan principalmente para integrar los conocimientos biológicos y ecológicos de los estudios locales, con el fin de obtener información relevante sobre el funcionamiento y la estructura de diferentes tipos de ecosistemas marinos, investigar el papel

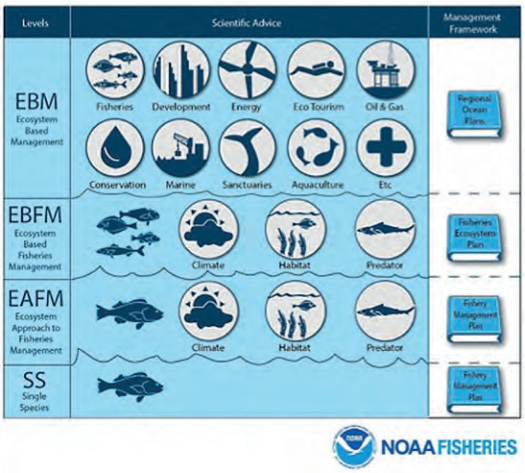


Figura 1. Representación esquemática del asesoramiento científico necesario para la transición de los enfoques de gestión de una sola población a los de gestión basada en los ecosistemas (a partir de Dolan *et al.* 2016).

ecológico de especies clave y el efecto de las interacciones de múltiples factores. También se utilizan para explorar los efectos de las opciones de gestión alternativas, contribuyendo a EBFM y a EBM (figura 1) (Christensen y Maclean 2011).

En el otro lado del espectro, los MEMs globales acoplan datos ambientales, ecológicos y socioeconómicos para evaluar cómo los impactos en cascada de las perturbaciones ecológicas afectan a los movimientos de las especies, la movilidad de la flota pesquera y la disponibilidad de los servicios de los ecosistemas a través de mecanismos macroecológicos y teleconexiones de forzamiento. Los MEMs globales contribuyen a la urgente necesidad de comprender los cambios globales en el contexto del IPCC y de la Plataforma Intergubernamental Científico-Política sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES). Sus resultados contribuyen a ampliar la capacidad científica para proyectar cómo pueden ser los océanos en el futuro, cómo pueden desarrollarse los diferentes escenarios y cuantificar la incertidumbre de los modelos a gran escala (Lotze *et al.* 2019).

Grandes retos por delante

A pesar del desarrollo sin precedentes de los ESMs y los MEMs, y de las capacidades para proyectar el sistema climático, los modelos disponibles tienen limitaciones, lo que en última instancia afecta a su capacidad para informar procesos de gestión y política (Heymans *et al.* 2020). Por ejemplo, solo unos pocos MEMs son capaces de considerar las dinámicas ecológicas directas e indirectas, desde los productores primarios hasta los depredadores, captando los impactos multinivel del cambio global en una diversidad de procesos espacio-temporales. Los MEMs están limitados en su capacidad de predecir la capacidad de las especies para invadir nuevos ecosistemas. La mayoría de los modelos actuales están limitados en su capacidad para considerar cómo la dinámica eco-evolutiva de las especies puede interactuar para condicionar y modificar los rasgos, patrones e interacciones de las especies, y tampoco resuelven bien las interacciones tierra-océano.

Por lo tanto, los MEMs se enfrentan a grandes retos para contribuir a una mejor comprensión y gestión de los océanos (Steenbeek *et al.* 2021). Es

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

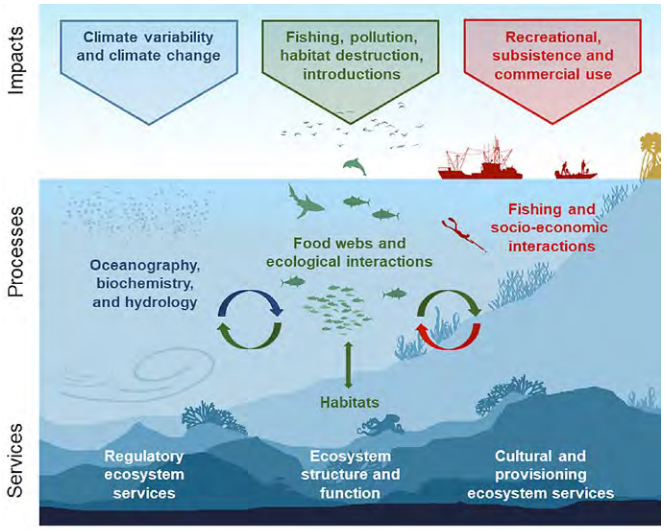


Figura 2. Los modelos de ecosistemas marinos son herramientas poderosas para integrar los conocimientos sobre la dinámica del medio ambiente y los ecosistemas, el cambio climático inducido por el ser humano y otras actividades, y la gestión de los recursos (fuente propia).

urgente ampliar sus capacidades para proyectar la biodiversidad cambiante de los océanos, los servicios ecosistémicos asociados y los patrones de uso, así como la forma en la que cambiarán los sistemas socioecológicos marinos estrechamente interconectados. Entre las prioridades de desarrollo se encuentran los vínculos con datos de observación en tiempo casi real, la interoperabilidad con plataformas de modelización emergentes que aborden la socioeconomía, la mejora de las capacidades para ejecutar análisis de incertidumbre exhaustivos y validaciones de modelos, la implicación de las partes interesadas en procesos de modelización participativa para captar los conocimientos ecológicos locales y la capacidad de extraer propiedades emergentes de los sistemas socioecológicos. Es importante destacar que la distribución desigual de las capacidades de investigación y la disponibilidad de datos entre las regiones y los países pone de relieve la necesidad de trabajar en la creación de capacidades, ya que las regiones con menos recursos tienden a estar situadas en zonas críticas de biodiversidad, al tiempo que se enfrentan a deficiencias en el seguimiento y la gestión de los recursos marinos (Heymans *et al.* 2020).

El Decenio de las Naciones Unidas para los Océanos y el Decenio para la Restauración de los Ecosistemas ofrecen a la comunidad científica una oportunidad única para abordar estos grandes retos. Avances importantes en las capacidades de los MEMs pueden contribuir sustancialmente a los objetivos del Convenio sobre la Diversidad Biológica y a su marco global de biodiversidad para después de 2020, así como a informar al IPCC de las Naciones Unidas, a la IPBES y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 14 sobre la conservación y el uso sostenible de los océanos, los mares y los recursos marinos.

Referencias

Christensen V., Maclean J. 2011. Ecosystem Approaches to Fisheries: A Global Perspective. Cambridge University Press, Cambridge 325 pp.

Dolan T.E., Patrick W.S., Link J.S. 2016. Delineating the continuum of marine ecosystem-based management: a US fisheries reference point perspective. ICES J. Mar. Sci. 73: 1042-1050.

Fulton E.A. 2010. Approaches to end-to-end ecosystem models. J. Mar. Syst. 81: 171-183.

Heymans J.J., Bundy A., Christensen V., *et al.* 2020. The Ocean Decade: A true ecosystem modelling challenge. Front. Mar. Sci. 7: 554573

Lotze H.K., Tittensor D.P., Bryndum-Buchholz A., *et al.* 2019. Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 116: 12907-12912.

Steenbeek J., Buszowski J., Chagaris D., *et al.* 2021. Making spatial-temporal marine ecosystem modelling better - a perspective. Environ. Model. Softw. 145: 105209.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14099

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

4.15. Reconstruyendo el clima del pasado para entender el de hoy y el de mañana

Eva Calvo, Carles Pelejero

La observación continuada de la atmósfera, los océanos y el sistema terrestre, sobre todo a través de datos recogidos por estaciones meteorológicas, boyas oceanográficas y satélites, nos ha permitido identificar los rápidos cambios que el sistema climático está experimentando en las últimas décadas. El aumento en la temperatura del planeta, la disminución del tamaño de los casquetes polares, la reducción en la extensión del hielo marino o el aumento del nivel del mar son algunas de las consecuencias derivadas del aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera como consecuencia de la actividad humana. Dado que muchos de los procesos que controlan estos parámetros actúan en escalas de tiempo más largas que aquellas cubiertas por los registros instrumentales, la única manera de tener una visión integradora y exhaustiva del impacto que estos cambios pueden tener en el Sistema Tierra es a través de las reconstrucciones paleoclimáticas y paleoceanográficas.

Evolución del clima y de los océanos en el pasado

La paleoceanografía, a través del estudio de los sedimentos marinos, nos permite identificar los cambios ambientales ocurridos en el pasado (en escalas de cientos a millones de años), su magnitud, dirección y velocidad, así como los procesos que son responsables (Thomas 2019) (figura 1).

Esta información nos debe permitir conocer los rangos de variabilidad natural del planeta a diferentes escalas de tiempo, así como la sensibilidad del sistema climático a un determinado forzamiento, como puede ser el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. Con estudios de este tipo, ahora sabemos, por ejemplo, que la Tierra ha experimentado temperaturas bastante más elevadas durante el Cretácico, cuando no existían los casquetes polares tal y como hoy los conocemos, o que los cambios climáticos pueden tener lugar de manera abrupta y rápida, en cuestión de décadas. Cambios de estas características sucedieron durante la última época glacial como consecuencia de alteraciones en la circulación oceánica global. Otra constatación ha sido el estrecho vínculo entre clima y concentración de gases de efecto invernadero (figura 2), que además ha puesto de manifiesto la velocidad y magnitud, sin precedentes, del aumento actual del CO_2 atmosférico.

Sin embargo, la paleoceanografía es una disciplina relativamente reciente. No fue hasta la década de

Figura 1. Sistemas de recuperación de sedimentos marinos profundos: el *gravity corer* (a la izquierda y arriba a la derecha) y el *multicorer* (abajo a la derecha). Imágenes: Unitat de Tecnologia Marina, UTM-CSIC.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

los 50 que se empezó a estudiar el registro sedimentario marino, cuando Cesare Emiliani analizó la composición isotópica del oxígeno en foraminíferos fósiles de sedimentos procedentes de los océanos Atlántico y Pacífico, y constató por primera vez la alternancia entre periodos glaciales (globalmente fríos) e interglaciares (globalmente cálidos) (Emiliani 1955). Y no fue hasta 1976 que se demostró que estos cambios en la temperatura y el volumen de hielo, los ciclos glacial/interglacial, registrados en los caparazones de los foraminíferos, presentan las mismas periodicidades que los cambios en la geometría de la órbita terrestre y, por tanto, eran causados por cambios en la radiación solar recibida por la Tierra (Hays *et al.* 1976). Desde entonces, la cantidad de información que hemos extraído de los sedimentos a través del análisis de indicadores indirectos (proxies) ha sido ingente (Chase et al 2018), ya sea 1) en base a la relación de elementos químicos y sus isótopos en los caparazones de determinados organismos fósiles, que nos ofrecen información sobre cambios en la circulación oceánica, la productividad biológica o el nivel del mar, como 2) a través de moléculas orgánicas como, por ejemplo, las alquenonas, compuestos sintetizados por las haptofitas, que nos permiten reconstruir la temperatura del agua superficial donde vivieron estas algas (Eglinton y Eglinton 2008). En los últimos años, el desarrollo tecnológico y una mejor capacidad en química analítica ha permitido la aparición de nuevos proxies que nos informan sobre otros parámetros, como el pH o la oxigenación de las aguas, variables de gran interés en el contexto actual de cambio global.

¿Y el futuro?

En los próximos años, además de continuar explorando proxies, quedan aún muchas cuestiones en las que profundizar sobre el funcionamiento del sistema climático y las interacciones entre sus componentes. Por ejemplo, no conocemos a ciencia cierta las causas del enfriamiento sostenido experimentado durante el Cenozoico, la actual era geológica, que dio paso a los ciclos periódicos glacial/interglacial característicos del Cuaternario y el Plioceno, pero que incluyen sobre todo cambios tectónicos que abrieron pasos oceánicos modificando la circulación oceánica, así como una progresiva disminución del CO_2 atmosférico. O porque la amplitud y periodicidad de estos ciclos glacial/interglacial, modulados por la configuración orbital terrestre, cambió hace aproximadamente un millón de años. Y en cuanto al ciclo del carbono, uno de los mayores interrogantes en el estudio del clima y los océanos del pasado son las bajas concentraciones de CO_2 atmosférico registradas durante las épocas glaciales del último millón de años. Después de cuatro décadas desde la primera constatación de que el CO_2 atmosférico había variado en consonancia con los cambios glacial/interglacial, todavía hoy no disponemos de una explicación satisfactoria para describir la combinación de mecanismos que explican los valores consistentemente más bajos (alrededor de un 30%) de este gas de efecto invernadero durante las épocas glaciales. De hecho, la capacidad o no de explicar la relación CO_2-clima, feedbacks incluidos, y por tanto la sensibilidad climática a este forzamiento, es una de las principales limitaciones para poder predecir la velocidad y magnitud de los posibles cambios climáticos de las próximas décadas.

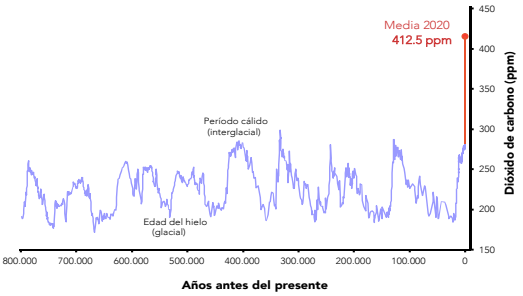


Figura 2. Evolución del CO_2 atmosférico de los últimos 800 000 años, obtenida a partir del análisis de las burbujas de aire atrapadas en testigos de hielo de la Antártida. En rojo, el aumento actual de la concentración de este gas de efecto invernadero. Adaptado de NOAA Climate.gov

Referencias

Chase Z., Ellwood M.J., van de Flierdt T. 2018. Discovering the ocean's past through geochemistry. Elements 14: 397-402.

Eglinton T.I., Eglinton G. 2008. Molecular proxies for paleoclimatology. Earth and Planetary Sci. Lett. 275: 1-16.

Emiliani C. 1955. Pleistocene temperatures. J. Geol. 63: 538-578.

Hays J.D., Imbrie J., Shackleton N.J. 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. Science 194: 1121-1132.

Thomas E. 2019. Paleoceanography. In Cochran J.K., Bokuniewicz H.J., Yager P. (Eds), Encyclopedia of Ocean Sciences (3ª ed.) pp. 472-478. Academic Press.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14100

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

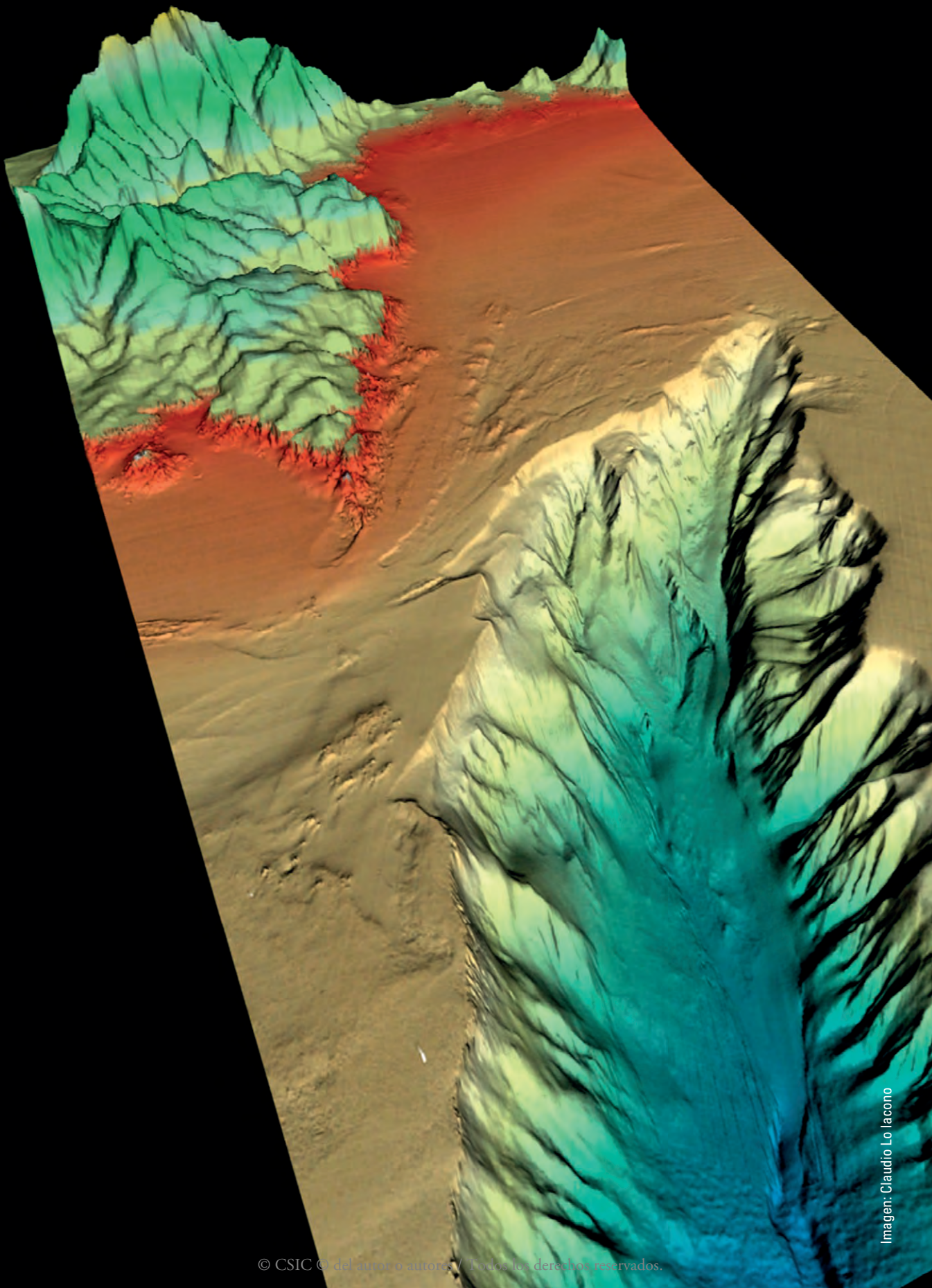


Imagen: Claudio Lo Iacono

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

5. Océano seguro

Rafael Bartolomé, Gonzalo Simarro, Marco Talone

Según el *World Wildlife Fund for Nature* (Naciones Unidas 2015) el 50% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa, 16 de las 23 megaciudades del mundo están frente a los océanos y 1000 millones de personas viven en comunidades con vínculos directos con el mar.

La necesidad de un océano seguro, es decir, de reducir los riesgos marinos y sus pérdidas, es clave para el futuro de los habitantes de nuestro planeta. Según el *Hyogo Framework for Action of the United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR), un riesgo se define como un evento, fenómeno o actividad que puede causar pérdidas humanas, sociales, económicas o la degradación medioambiental. En riesgos se incluyen desde los naturales (geológicos, climáticos o biológicos) a los inducidos por la actividad humana (accidentes y cambios medioambientales).

Por tanto, el estudio de los procesos geológicos, biológicos y oceanográficos, así como sus riesgos asociados y su correcta gestión, es clave para la humanidad, siendo las ciencias marinas en su conjunto la disciplina apropiada para estudiarlos. Este estudio incluye observaciones oceánicas que van desde el subsuelo hasta la atmósfera pasando por la capa de agua, vitales para establecer el estado actual y su variabilidad, descubrir el pasado y prever su evolución futura. La mejora de las observaciones para avanzar en nuestra comprensión de los riesgos se alinea, además, con las prioridades del Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, promovido por las Naciones Unidas. Esta iniciativa tiene por objetivo la mitigación del impacto de los riesgos naturales y la creación de un océano más seguro, de forma que las comunidades humanas y las infraestructuras estén mejor protegidas de los peligros oceánicos, y que se garantice la seguridad de las operaciones en el mar y en la costa. El uso de equipamientos adecuados de investigación y la cooperación internacional son dos elementos vitales para la observación del océano, lo que se ve reflejado en las contribuciones de este capítulo.

Este capítulo incluye ensayos sobre las estructuras geomorfológicas asociadas a los geo-riesgos (Ercilla *et al.*), incluyendo deslizamientos submarinos (Urgeles). Estas estructuras y fenómenos submarinos generan terremotos en el mar y tsunamis cuyo conocimiento actual y futuros retos científicos son también abordados (Sallarès). La contribución de la ciencia y el papel clave que tiene durante la gestión de los desastres naturales, que incluyen tanto los biológicos y la proliferación de organismos marinos (Marambio *et al.*), como los geológicos, oceanográficos (Portabella *et al.*) y los inducidos por la actividad humana son tratados en este volumen.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

5.1. Descubriendo las geoformas submarinas peligrosas

Gemma Ercilla, David Casas, Ferran Estrada, Belén Alonso

El fondo marino cubre el 72% de la superficie de la Tierra y aun así continúa siendo un gran desconocido, por lo que a menudo es considerado la última frontera. Es un mundo entero oculto a nuestros ojos que ocasionalmente nos amenaza de forma convulsiva para recordarnos que hay muchos procesos geológicos activos hoy en día en el fondo marino y que representan un riesgo en potencia. Estos procesos pueden afectar a personas que viven en las zonas costeras (alrededor del 40% de la población mundial) o a todo un país, dañando las infraestructuras terrestres y marinas, y desencadenando crisis económicas y medioambientales en todo el mundo.

Método de investigación

Las observaciones multiescala y los estudios multidisciplinarios son esenciales para cartografiar estas geoformas y conocer sus características así como su actividad. Las observaciones multiescala implican el desafío tecnológico de desarrollar escenarios complejos a bordo de los buques oceanográficos durante las campañas, utilizando ecosondas multihaz, sistemas geofísicos, sacatestigos de sedimento, vehículos submarinos autónomos, vehículos submarinos operados a distancia, instrumentos para mediciones de propiedades físicas del sedimento *in situ* y de conductividad y temperatura de la columna de agua. El enfoque multidisciplinario nos permite aunar las disciplinas de geología marina, ingeniería geotécnica, geofísica, física, oceanografía y matemáticas. Este enfoque proporciona elementos clave para comprender los riesgos geológicos que nos vienen del mar, sus factores desencadenantes y la recurrencia de los eventos.

Principales geoformas submarinas peligrosas

Los estudios geomorfológicos marinos revelan que los procesos geológicos de riesgo pueden ocurrir en cualquier medio marino y desde áreas someras a profundas. Basándonos en su génesis, se reconocen cuatro categorías principales de geoformas que pueden representar un riesgo:

Riesgos asociados a geoformas tectónicas. En su mayoría comprenden fallas sísmicas que causan terremotos. Los mapas geomorfológicos indican que la mayoría de las fallas activas se localizan en áreas de límites de placas tectónicas, donde el movimiento de las mismas contribuye a aumentar los esfuerzos de tensión en la roca hasta alcanzar la rotura (Estrada *et al.* 2018) (figuras 1A, B). El deslizamiento repentino de los bloques de fallas puede producir una intensa sacudida sísmica, siendo las más catastróficas aquellas generadas por cabalgamientos en las zonas de subducción y por fallas de salto en dirección transtensionales y transpresionales. Las fallas de salto en dirección son comunes en el Mediterráneo occidental, donde su análisis geomorfológico detallado es esencial para establecer su geometría y dinámica, y relacionarlo con las observaciones sismológicas. Este enfoque nos está llevando a descubrir zonas de fallas sísmicas desconocidas que desencadenan terremotos en la actualidad.

Riesgos asociados a geoformas sedimentarias. Las más comunes son las inestabilidades gravitacionales de sedimentos. Los sedimentos de los taludes submarinos pueden volverse inestables y deslizarse pendiente abajo desplazando importantes volúmenes de sedimento y recorrer largas distancias. Su análisis geomorfológico revela tres

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

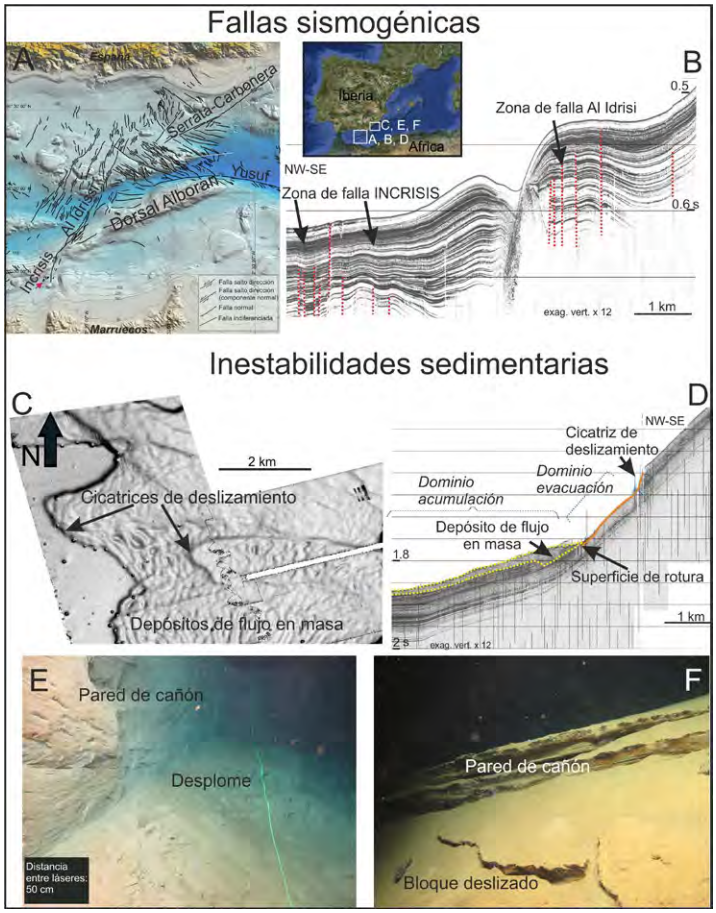


Figura 1. Geoformas submarinas de riesgo. Fallas sismogénicas (A, B) y depósitos de inestabilidad sedimentaria (C, D, E, F).

grupos principales de procesos impulsados por la gravedad: movimientos de masas de sedimento coherente, tales como deslizamientos rotacionales y traslacionales, derrumbes y desparrames; flujos en masa, que involucran flujos de derrubios, flujos de fango y avalanchas; y corrientes turbidíticas (Shanmugam y Wang 2015) (figuras 1C a F). El análisis geomorfológico de sus depósitos también revela elementos clave que conforman su arquitectura, tales como escarpes de rotura (de cabecera y de flancos), planos o superficies de deslizamiento, y dominios de evacuación y de acumulación del sedimento (Casas *et al.* 2013) (figura 1C, D). Combinando el estudio de la geomorfología 2D, 3D y 4D de los depósitos de inestabilidad con la geomorfología sísmica y la sedimentología, es posible obtener información precisa para evaluar la situación previa y posterior a la inestabilidad sedimentaria, establecer su frecuencia de retorno y definir los factores desencadenantes.

Riesgos asociados a actividad volcánica. Los volcanes submarinos, explosivos o no cuando ocurren principalmente en aguas poco profundas, y las islas volcánicas también pueden representar un riesgo. Las características geomórficas mapeadas en los flancos submarinos de los volcanes indican que los procesos volcánicos están asociados a fallas sísmicas activas y al colapso de los edificios volcánicos o de parte de sus flancos, los cuales desencadenan inestabilidades sedimentarias que involucran grandes volúmenes de material y bloques (Ercilla *et al.* 2021) (figura 2E).

Riesgos asociados a dinámica de los fluidos. La filtración de gas, liberación repentina de fluidos (explosión), actividad hidráulica, sobrepresurización, fluidización y desestabilización del hidrato de gas, son algunos de los procesos relacionados

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

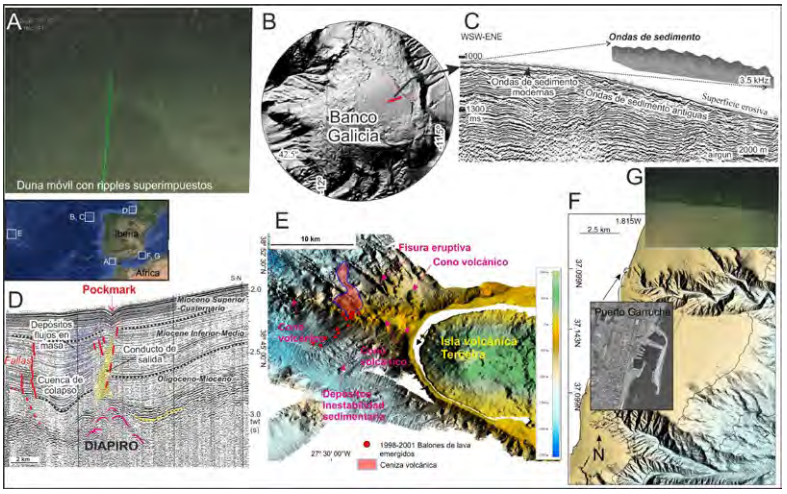


Figura 2. Geoformas submarinas de riesgo. Geoformas asociadas a corrientes de fondo (A, B, C), dinámica de fluidos (D) y volcanismo (E). La cabecera del cañón Alias-Almanzora-Garrucha próxima a costa es también mostrada; su erosión está afectando al puerto de Garrucha (F).

con la dinámica de fluidos que afectan el fondo marino y pueden representar un riesgo. Sus evidencias geomorfológicas indican que estos procesos conducen a la deformación, perforación, rotura, plegamiento, levantamiento y hundimiento del suelo marino, formando diapiros de fango y sal, volcanes de fango, campos de cráteres, y fondos marinos retrabajados (figura 2D). Además, la presencia de burbujas de gas en los sedimentos cercanos a la superficie nos advierte de que pueden verse afectados por una reducción en su resistencia al corte y desencadenar inestabilidades sedimentarias (Ercilla *et al.* 2021).

Riesgos relacionados con geoformas generadas por corrientes del fondo. Crestas contorníticas y elementos erosivos como surcos, canales y terrazas, nos advierten sobre la acción persistente de corrientes de fondo sobre el suelo marino, que comúnmente alcanzan velocidades altas en fondos marinos irregulares, accidentados y salpicados por montes, corredores estructurales, cuencas confinadas, cordilleras, valles y diapiros, y también en los estrechos. Su acción puede favorecer la erosión y socavación del suelo marino y la presencia de zonas con altas tasas de sedimentación así como de campos con formas de fondo móviles (Ercilla *et al.* 2016) (figura 2A-C y G).

La actividad de estas geoformas de riesgo puede resultar en otros eventos catastróficos secundarios importantes como los tsunamis, los cuales en su mayoría son provocados por terremotos, inestabilidades sedimentarias y erupciones volcánicas. La cartografía del fondo marino también informa sobre áreas donde coexisten varias geoformas peligrosas, lo cual nos advierte sobre la potencial ocurrencia de procesos de riesgo en cascada. Estas situaciones acontecen especialmente en contextos de indentación de placas tectónicas, islas volcánicas y cabezas de cañones próximas a costa (Ercilla *et al.* 2021) (figura 2F). Además, estos escenarios se ven comúnmente afectados por geoformas que cruzan mar y tierra, por lo que es necesario colaborar con nuestros colegas geólogos y geofísicos de tierra para una evaluación precisa del riesgo geológico.

Referencias

Casas D., Ercilla G., García M., Yenes M. *et al.* 2013. Post-rift sedimentary evolution of the Gebra Debris Valley. A submarine slope failure system in the Central Bransfield Basin (Antarctica). Mar. Geol. 340: 16-29.

Ercilla G., Juan C., Hernandez-Molina F. J., Bruno M., *et al.* 2016. Significance of bottom currents in deep-sea morphodynamics: an example from the Alboran Sea. Mar. Geol. 378: 157-170.

Ercilla G., Casas D., Alonso B., Casalbore D. *et al.* 2021. Offshore geohazards: Charting the course of progress and future directions. Oceans 2: 393-428.

Estrada F., Galindo-Zaldívar J., Vázquez J.T., Ercilla G., *et al.* 2018. Tectonic indentation in the central Alboran Sea (westernmost Mediterranean). Terra Nova: 30: 24-33.

Shanmugam G., Wang Y. 2015. The landslide problem. J. Palaeogeography: 4: 109-166.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14102

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

5.2. Deslizamientos submarinos: el fondo marino en movimiento

Roger Urgeles

El 18 de noviembre de 1929 se produjo un terremoto de 7,2 Mw al sur de Terranova, que provocó la rotura generalizada del fondo marino y provocó un desprendimiento submarino. El desprendimiento afectó a más de 150 km^3 de sedimentos (~100 veces el tráfico anual de contenedores del puerto de Shanghai, el mayor del mundo) y se convirtió en una corriente de turbidez que recorrió el fondo marino durante unas 16 horas rompiendo varios cables submarinos a su paso (Heezen y Ewing 1952). Los cables se rompieron casi instantáneamente cerca del epicentro y en tiempos crecientes ladera abajo, proporcionando accidentalmente el primer registro histórico de la dinámica de un deslizamiento submarino. Las velocidades máximas medias del deslizamiento entre roturas de los cables superaron los 20 m s^{-1} (72 km h^{-1}). Un volumen tan grande de sedimentos que se aceleró de manera tan rápida bajo el agua creó un tsunami que se registró en todo el Atlántico con olas de hasta 7,5 m en Terranova, donde se produjeron graves daños materiales y 28 víctimas mortales (Government of Canada s.f.).

El registro histórico y el sedimentario

El evento de 1929 frente a Terranova es un recordatorio de que no solo los terremotos pueden causar tsunamis. De hecho, alrededor del 15% de todos los tsunamis son causados por deslizamientos de tierra submarinos o por deslizamientos que entran en una masa de agua. Basta con tirar de hemeroteca para recordar tsunamis provocados por deslizamientos submarinos como el de Niza (Francia) en 1979, el de Sissano (Papúa Nueva Guinea) en 1998, el de Stromboli (Italia) en 2003, el de Haití (2010) y el de Palu y Anak Krakatau (Indonesia) en 2018. La existencia de eventos significativamente mayores en el registro del Cuaternario tardío es un mensaje de advertencia sobre el peligro y el riesgo que suponen dichos eventos. Se han cartografiado grandes deslizamientos submarinos en todos los océanos y ambientes sedimentarios marinos, aunque su distribución y frecuencia varía significativamente entre esos ambientes. Los márgenes tectónicamente activos parecen tener una alta frecuencia de eventos, aunque su magnitud (tamaño en términos de área o volumen) no es tan grande como la de los deslizamientos submarinos en márgenes pasivos (Urgeles y Camerlenghi 2013). Los deslizamientos submarinos en los márgenes continentales de baja y media latitud parecen producirse de forma aleatoria en el tiempo, pero los de los márgenes continentales de alta latitud, donde la dinámica de los sedimentos está fuertemente constreñida por los ciclos de glaciación-deglaciación de la plataforma continental, parecen agruparse durante la deglaciación (Llopart *et al.* 2015).

Causas de los deslizamientos submarinos

Los deslizamientos submarinos pueden producirse por múltiples razones, pero generalmente se distingue entre los que son inherentes o afectan a la estabilidad del talud a largo plazo, normalmente identificados como factores precondicionantes controlados por cambios climáticos y ambientales, y los que dependen de procesos externos o mecanismos desencadenan-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

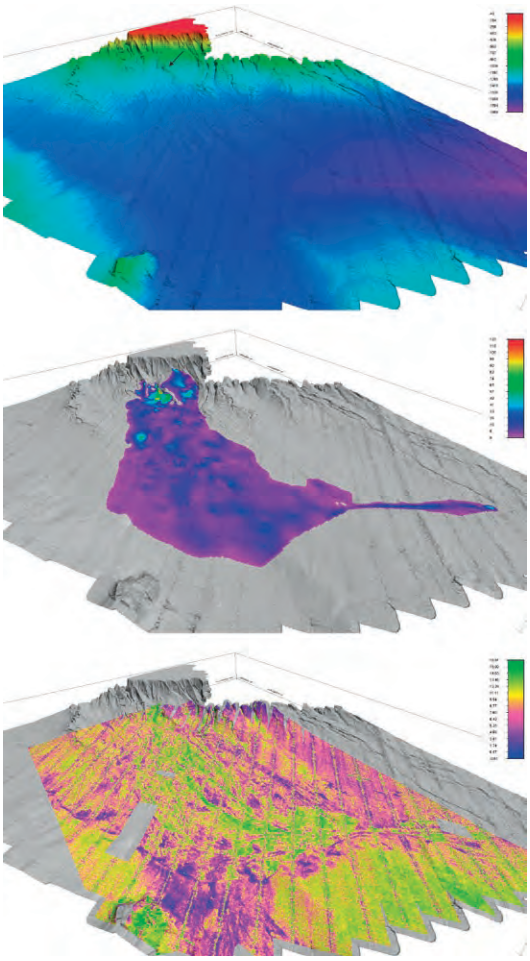


Figura 1. Vista tridimensional del margen del Ebro mirando hacia el oeste (ancho de visión de ~110 km) mostrando un gran deslizamiento submarino al pie del talud continental. La imagen superior muestra el relieve batimétrico. La cicatriz de 12 km de longitud (flecha) es visible al pie del talud. La imagen de en medio muestra el espesor del depósito originado por el deslizamiento, el cual es máximo (hasta 120 m de espesor) justo debajo de la cicatriz de rotura. El deslizamiento se propagó inicialmente pendiente abajo hacia el canal de Valencia, entre los taludes del Ebro y de las Baleares y luego se desplazó hacia el NO a lo largo del canal de Valencia. La imagen inferior muestra la intensidad de retrodifusión (intensidad de retorno del eco del fondo) desvelando líneas de flujo a lo largo del recorrido del deslizamiento.

tes que producen la rotura. Los factores precondicionantes implican procesos que suelen tener lugar durante largos periodos de tiempo. Entre ellos se encuentran la deposición de sedimentos a un ritmo que supera la velocidad de consolidación (velocidad máxima de compactación de los sedimentos bajo su propio peso), lo que induce el desarrollo de un exceso de presión de poros, la presencia de capas débiles (baja resistencia al cizallamiento) o que pueden ser debilitadas, la presencia de gas como el metano que podría expandirse en condiciones hidrostáticas reducidas (por ejemplo, durante las mareas bajas en los sedimentos de aguas poco profundas) o la inclinación del talud debido a una serie de procesos geológicos como el diapirismo salino y la tectónica. Los mecanismos desencadenantes, en cambio, implican un contexto dinámico, como la ocurrencia de un terremoto o una tormenta de olas, esta última por encima de la base del oleaje, que inducen cargas cíclicas en el fondo marino que pueden licuar el sedimento. Las variaciones del nivel del mar y de la temperatura inducidas por el cambio climático en el pasado (y quizás por el cambio climático relacionado con las actividades humanas en el futuro) han provocado la disociación de los hidratos de gas en la base de su zona de estabilidad y/o su disolución en la parte superior de la zona de aparición de los mismos (Sultan *et al.* 2004). Los hidratos de gas son una sustancia en la que una estructura en forma de jaula de cristales de agua encierra el gas natural (en la mayoría de los casos, metano) que es estable bajo una presión relativamente alta (aguas profundas) y una temperatura baja. Esta última viene determinada por el gradiente hidrotermal en la columna de agua y el gradiente geotérmico en la columna sedimentaria. La disociación y disolución de los hidratos de gas, en sedimentos de baja permeabilidad, inducida por cambios en estas condiciones de presión y temperatura, da lugar a un aumento de la presión de los fluidos intersticiales y al debilitamiento de los sedimentos, lo que en última instancia puede inducir un desprendimiento de estos sedimentos en el talud.

Los deslizamientos submarinos en los márgenes continentales de la península Ibérica

Los márgenes continentales de la península Ibérica no están exentos de este tipo de riesgos y en ellos se han cartografiado deslizamientos submarinos de gran magnitud. Uno de estos

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

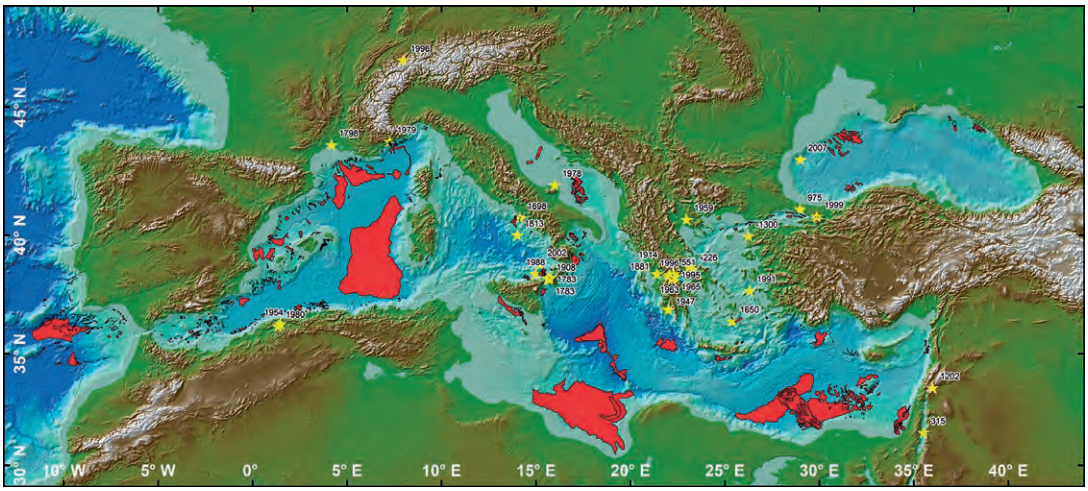


Figura 2. Mapa de distribución de los deslizamientos submarinos (polígonos rojos) en el mar Mediterráneo sobre imagen de relieve batimétrico sombreado. Las estrellas muestran las fuentes de tsunamis històricos relacionados con deslizamientos submarinos y año del evento.

grandes deslizamientos submarinos ocurrió hace ~10 ka en el talud continental del Ebro y afecta a 2200 km^2 de fondo marino, aproximadamente cuatro veces el tamaño de la cercana isla de Eivissa (figura 1). Se estima que dicho evento generó un importante tsunami con olas superiores a los 10 m en la zona de origen del deslizamiento y en las costas adyacentes. El peligro que representan los deslizamientos submarinos puede representarse, de forma similar a los terremotos, con curvas de distribución magnitud-frecuencia, que relacionan un evento de volumen determinado con una frecuencia de ocurrencia. A escala de la cuenca mediterránea (figura 2), estas curvas indican que cada cincuenta años se produce un desprendimiento de volumen superior a 1 km^3 (potencialmente tsunamigénico).

Referencias

Government of Canada, N.R.C., n.d. The 1929 Magnitude 7.2 «Grand Banks» earthquake and tsunami [WWW Document]. URL http://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/historic-historique/events/19291118-en.php (accessed 6.2.17).

Heezen B.C., Ewing W.M. 1952. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks [Newfoundland] earthquake. Am. J. Sci. 250: 849-873.

Llopart J., Urgeles R., Camerlenghi A., *et al.* 2015. Late Quaternary development of the Storfjorden and Kveithola Trough Mouth Fans, northwestern Barents Sea. Quat. Sci. Rev. 129: 68-84.

Sultan N., Cochonat P., Foucher J.-P., Mienert J. 2004. Effect of gas hydrates melting on seafloor slope instability. Mar. Geol. 213: 379-401.

Urgeles R., Camerlenghi A. 2013. Submarine landslides of the Mediterranean Sea: Trigger mechanisms, dynamics, and frequency-magnitude distribution. J. Geophys. Res. Earth Surf. 118: 2013JF002720.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14103

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

5.3. Cuando el océano tiembla: presente y futuro en el estudio de terremotos y tsunamis

Valentí Sallarès

A raíz del advenimiento y la gradual aceptación de la tectónica de placas a partir de los años 60 del siglo pasado, se constató que la tierra sólida no es un marco de referencia fijo y estático, sino un sistema dinámico y en constante evolución, gobernado por fuerzas internas que se expresan en superficie de múltiples formas. La apertura y cierre de los océanos, la formación de cordilleras, o los terremotos y volcanes, evidencian la interacción lenta pero constante entre las placas tectónicas. Una de las manifestaciones más espectaculares y notorias de esta interacción son los terremotos, que se concentran principalmente en las fallas tectónicas que limitan las placas. Los más grandes y destructivos tienen lugar en la denominada «falla de mega-cabalgamiento» de las zonas de subducción, donde las placas oceánicas se deslizan bajo las continentales a una velocidad similar a la que crecen las uñas. Este deslizamiento no es constante sino episódico: el rozamiento entre las placas hace que estas se acoplen acumulando esfuerzos durante decenas o centenares de años hasta que resbalan repentinamente liberándolos en segundos o minutos en forma de terremotos. La cantidad de deslizamiento, así como su distribución espacial y la profundidad, determinan la intensidad de las vibraciones y la deformación del terreno asociadas.

Terremotos submarinos y tsunamis

En el caso de las zonas de subducción, la mayor parte del deslizamiento entre las placas se produce bajo el mar, entre las fosas oceánicas y la línea de costa. Si el deslizamiento es suficientemente importante, la deformación asociada puede afectar el fondo marino y sacudir la columna de agua, originando una ola de pequeña amplitud que se desplaza rápidamente, a una velocidad similar a la de los aviones comerciales. A medida que la ola se acerca a la costa, ésta se frena sin perder excesiva energía y, por lo tanto, crece progresivamente hasta convertirse en un tsunami, una enorme masa de agua que puede internarse kilómetros tierra adentro barriendo todo lo que encuentra a su paso (figura 1). En los últimos cien años, los tsunamis han provocado cerca de trescientas mil víctimas e incalculables daños materiales, más que cualquier otro fenómeno de origen natural. El impacto creciente asociado a estos acontecimientos en un contexto de rápida urbanización y de aumento del turismo en las regiones costeras, ha hecho que la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres Naturales (UNDRR) identifique los tsunamis como elemento fundamental en la elaboración de políticas y planes de reducción de riesgo, que incluyen pérdidas de vidas, medios de vida y salud, así como de los bienes económicos, físicos, sociales y medioambientales de personas, empresas y comunidades.

Los ejes fundamentales de estas políticas incluyen potenciar la investigación básica para identificar y caracterizar las fuentes potenciales y para modelizar los terremotos y los tsunamis asociados, así como la simulación de los posibles escenarios de impacto, el desarrollo de sistemas de alerta, y la implementación de medidas socio-administrativas de gestión del riesgo y de mitigación de impacto. Actualmente, el es-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Foto aérea del impacto de tsunami de Indonesia de 2004 (Wikilmages from Pixabay).

tado de conocimiento en investigación básica es bastante avanzado, y hay un conocimiento exhaustivo y preciso sobre los procesos físicos que gobiernan la generación de los terremotos y de los tsunamis. Buena parte de los esfuerzos de investigación en los últimos decenios se han invertido en incrementar el detalle y precisión de las simulaciones sintéticas y en reunir datos experimentales. La creciente disponibilidad de recursos de cálculo masivo ha permitido modelizar numéricamente con gran detalle la ruptura dinámica de las fallas tectónicas, reproducir la deformación inducida en el subsuelo, la transmisión y la propagación de la ola, y su impacto en la costa. Por otro lado, los experimentos de laboratorio han proporcionado gran cantidad de información sobre los mecanismos de ruptura, fricción y deslizamiento para diferentes materiales y en diferentes condiciones.

Retos y objetivos de la investigación sobre terremotos y tsunamis

Sin embargo, a día de hoy todavía hay carencias notables en cuanto a la identificación y caracterización de las fallas submarinas tsunamigénicas, derivadas en gran medida de las limitaciones observacionales. Así, a pesar de la constante evolución técnica e instrumental y las numerosas campañas oceanográficas realizadas, buena parte de los fondos marinos, particularmente en torno a las zonas abisales de las fosas oceánicas, se mantienen todavía inexplorados a día de hoy. Por lo tanto, hay un vacío importante de información *in situ* sobre la localización y geometría de las fallas, así como sobre las características y propiedades elásticas de las rocas que las rodean, de forma que las simulaciones numéricas de ruptura e impacto están basadas en modelos *ad hoc* de propiedades que son, en general, poco realistas y excesivamente simplificados. Las consecuencias de este desconocimiento de base se han manifestado de forma dramática en numerosas ocasiones. El ejemplo más claro y reciente es el del terremoto de Tohoku-Oki (Japón) de 2011, que resultó demoledor tanto para el pueblo japonés como para la comunidad científica. Incluso en un país modélico en cuanto a la investigación sismológica, las simulaciones basadas en asunciones simplificadas de la estructura de la falla y las propiedades de las rocas hicieron que se subestimara la magnitud

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

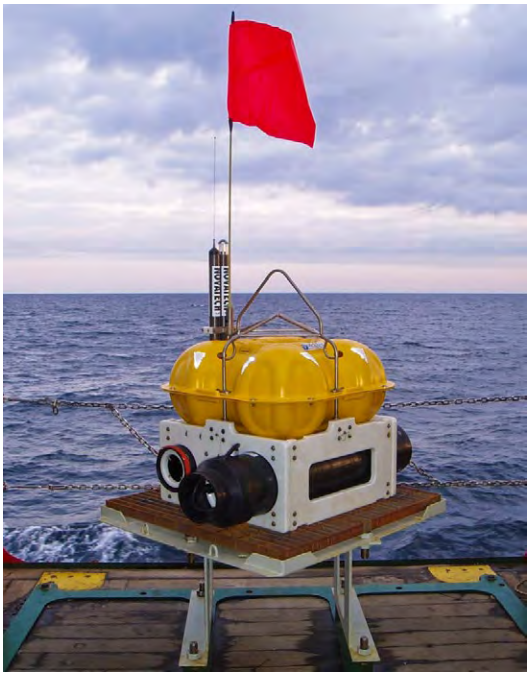


Figura 2. Sismómetro de fondo oceánico de la Unitat de Tecnologia Marina (CSIC).

potencial del terremoto en un factor de 4 y el deslizamiento en la parte somera de la falla en más de un 50%. Esto hizo que la máxima altura del tsunami superara de largo las predicciones más pesimistas, y que éste sobrepasara por tanto los muros protectores de la central nuclear de Fukushima, provocando más de 20.000 víctimas y una devastación sin precedentes.

Este acontecimiento suscitó un intenso debate científico e hizo que se cuestionaran paradigmas bien establecidos sobre la cuantificación del riesgo (Lay 2012). En concreto, en los últimos años se ha hecho patente la necesidad perentoria de mejorar las observaciones de las vibraciones y deformación de los fondos marinos a las zonas de riesgo, y en particular en las zonas de subducción. En Japón, esto ha acelerado el establecimiento de sistemas de observación en tiempo real que incluyen sismógrafos, sensores de presión y de desplazamiento cableados, y hay iniciativas similares en curso en otras regiones como el margen de Cascadia (Estados Unidos). En paralelo, se ha incrementado de forma sustancial el parque mundial de sismómetros de fondo oceánico (figura 2), especialmente los de larga autonomía, se han desplegado nuevos sensores en boyas que se mueven libremente por los océanos y se han desarrollado nuevas metodologías para utilizar cables de comunicación submarinos de fibra óptica como redes de sensores sísmicos. Gracias a ello, se está avanzando decididamente en la comprensión de la dinámica de las fallas submarinas y de los procesos de ruptura en base a las nuevas observaciones (e.g. Sallarès y Ranero 2019), lo cual debe permitir mejorar en el futuro inmediato la predicción y evaluación de los riesgos asociados.

Referencias

Lay T. 2012. Why giant earthquakes keep catching us out. Nature 483: 149-150.

Sallarès V., Ranero C.R. 2019. Upper-plate rigidity determines depth varying rupture behaviour of megathrust earthquakes. Nature 576: 96-101.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14104

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

5.4. Sinergias para una gestión costera efectiva frente a las proliferaciones de organismos marinos

Macarena Marambio, Ainara Ballesteros, Josep-Maria Gili

El plancton gelatinoso incluye reconocidos organismos (medusas, ctenóforos, sifonóforos) componentes de los ecosistemas marinos y muchos de ellos habitan nuestro planeta desde hace cientos de millones de años. En los últimos años, las proliferaciones de algunos de ellos, especialmente medusas, en ciertas zonas costeras del mundo son un hecho cada vez más frecuente.

Impacto de las proliferaciones de medusas

Existe evidencia científica de que las proliferaciones de medusas son fomentadas debido al aumento de presión ejercida por los seres humanos en los ecosistemas marinos costeros. Algunos ejemplos son la sobrepesca, la eutrofización, la translocación de especies, la modificación de hábitats costeros y el cambio climático (Purcell 2012).

En el mar Mediterráneo, y específicamente en la costa catalana durante la época de primavera-verano, la presencia de medusas en las zonas de baño dejó de ser un hecho aislado. Cada año las noticias en la prensa, la bandera amarilla o roja indicando prohibición del baño por presencia de medusas, y las atenciones por parte de los servicios de salvamento y socorrismo por motivos de picaduras de medusas han ido en aumento. Esto genera una gran alarma social debido al impacto socio-económico que implica, especialmente en el ámbito sanitario y turístico. Así también, en el ámbito pesquero y de acuicultura, donde las capturas y la cría de peces en granjas también se han visto afectadas, por ejemplo por mortalidades de peces, afectación en la salud de los pescadores, redes y granjas estropeadas, etc.

Desarrollo e implementación de herramientas preventivas y de mitigación

Por este motivo hace ya varios años se despertó el interés de ampliar el conocimiento sobre la biología y ecología de distintas especies de medusas, desarrollándose así una línea de investigación específica en el tema. Con ello se ha podido llevar a cabo la cría y mantenimiento de distintas especies de medusas en la ZAE (Zona de Acuarios Experimentales) del ICM en Barcelona, lo que ha permitido a su vez estudiar en profundidad sus ciclos de vida, el desarrollo de sus estadios de crecimiento y los factores que pueden influir en estos para determinar las posibles causas de sus proliferaciones. Asimismo, los estudios y la sinergia del ámbito científico con las administraciones involucradas en la gestión costera, han permitido trabajar en el desarrollo e implementación de diversas herramientas de prevención y mitigación de sus impactos.

Para la correcta implementación y buen funcionamiento de estas herramientas, debe existir una buena base científica, así como también coordinación y trabajo conjunto con las administraciones y la sociedad. Es esencial que los intereses de todas las partes estén cubiertos y que la demostración de resultados refleje soluciones aplicables a todos los niveles, respetando el ámbito ecológico de las especies y solventando de una manera económicamente-efectiva los problemas que implica a nivel social. La estrategia propuesta desde el ICM está basada en la ampliación de

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

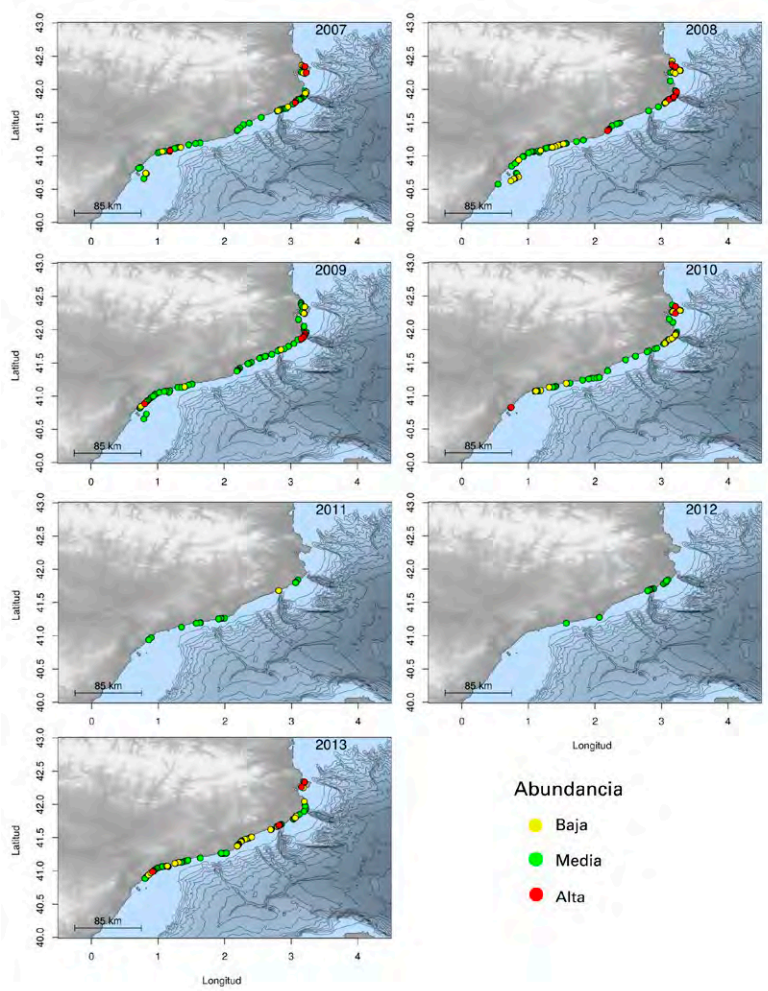


Figura 1. Distribución espacial de la especie *Pelagia noctiluca* determinada por estudios de seguimiento del año 2007 (panel superior izquierdo) al 2013 (panel inferior izquierdo). Las categorías de abundancia se muestran como: categoría 1, «baja» (<10 individuos/playa) en amarillo; categoría 2, «media» (<1 individuo/m^2) en verde; y categoría 3, «alta» (>1 individuo/m^2) en rojo. (Marambio *et al*. 2021).

conocimiento a través de proyectos divulgativo-educativos, en el trabajo colaborativo con la sociedad a través de diversas iniciativas de ciencia ciudadana como la app iMedjelly y la plataforma Observadores del Mar, en el trabajo conjunto con las administraciones implicadas como la Agència Catalana de l'Aigua, Protección Civil de Cataluña, los municipios costeros de la costa catalana y las empresas de servicios de salvamento y socorrismo como Pro-activa y Cruz Roja, entre otras, y en el trabajo experimental desarrollado en laboratorio para el conocimiento de la biología de las especies y desarrollo y mejora de protocolos de primeros auxilios frente a picaduras de medusas.

A través de años de propuestas y mejoras, se ha logrado establecer una red a lo largo de toda la costa catalana que monitorea más de trescientas playas, desde el extremo norte de la Costa Brava hasta el límite sur del Delta del Ebro, permitiendo construir una base de datos con más de trescientas mil observaciones de presencia y/o ausencia de medusas. Todo el trabajo realizado nos ha permitido obtener resultados muy valiosos a nivel científico, tales como mapas de distribución espacio temporal de las principales especies de medusas del Mediterráneo occidental (figuras 1 y 2), modelos de predicción y análisis de tendencias de las poblaciones de las

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

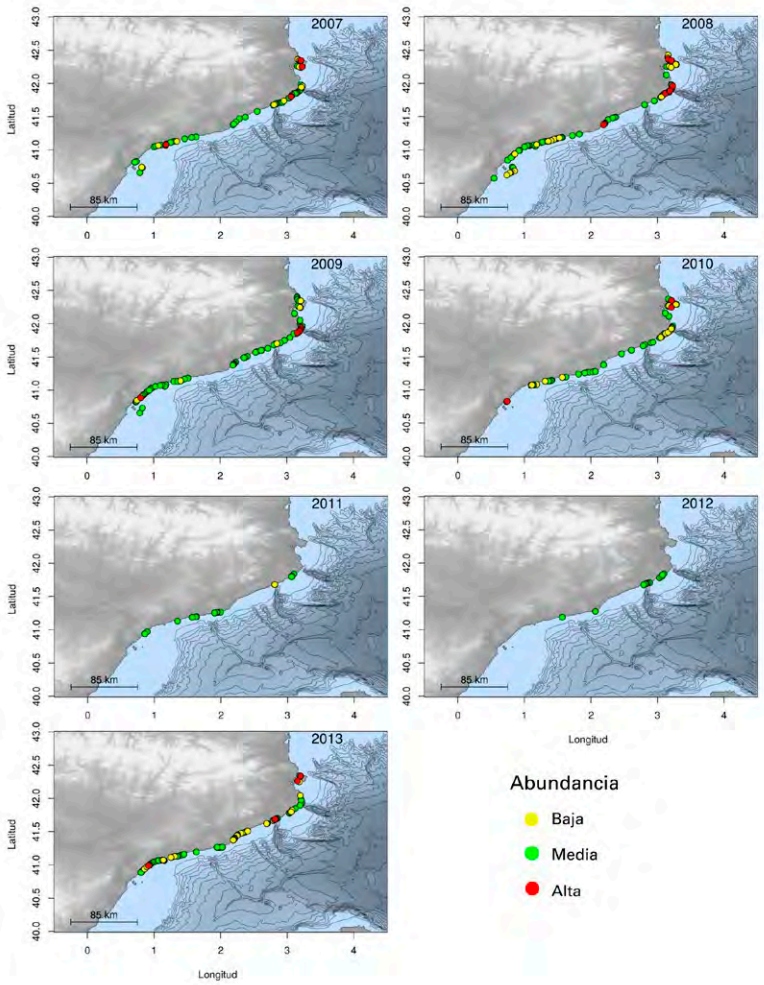


Figura 2. Distribución espacial de la especie *Rhizostoma pulmo* determinada por estudios de seguimiento del año 2007 (panel superior izquierdo) al 2013 (panel inferior izquierdo). Las categorías de abundancia se muestran como: categoría 1, «baja» (<10 individuos/playa) en amarillo; categoría 2, «media» (<1 individuo/m^2) en verde; y categoría 3, «alta» (>1 individuo/m^2) en rojo. (Marambio *et al*. 2021).

especies más relevantes de la costa catalana. Este es el caso de *Pelagia noctiluca* y *Rhizostoma pulmo*, consideradas de mayor impacto por su alta capacidad urticante y su abundancia en aguas costeras. Por otra parte, se ha logrado describir los ciclos biológicos completos de varias especies de medusas en acuarios especializados, se han determinado factores claves y relevantes en el desarrollo de las especies, así como establecer y recomendar protocolos de actuación frente a la presencia y picaduras de medusas. Dicha investigación se considera un gran aporte al conocimiento de la biología y comportamiento de las poblaciones de medusas a nivel científico, y además contribuye de forma aplicada a la mejora de la gestión y manejo de áreas costeras con un impacto positivo real sobre toda la sociedad.

Referencias

Purcell J. 2012. Jellyfish and Ctenophore Blooms Coincide with Human Proliferations and Environmental Perturbations. Ann. Rev. Mar. Sci. 4: 209-235.

Marambio M, Canepa A, Lòpez L, *et al.* 2021. Unfolding Jellyfish Bloom Dynamics along the Mediterranean Basin by Transnational Citizen Science Initiatives. Diversity 13(6): 274.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14105

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

5.5. Extremo, o no tan extremo, esa es la cuestión

Marcos Portabella, Federica Polverari, Wenming Lin, Ad Stoffelen, Albert S. Rabaneda, Joe Sapp, Paul Chang, Zorana Jelenak, Giuseppe Grieco, Ana Trindade, Eugenia Makarova, Federico Cossu

¿Con qué fuerza sopla el viento en condiciones meteorológicas extremas?

Esta es una pregunta difícil de responder, pero que tiene consecuencias de gran alcance para la meteorología satelital, la previsión meteorológica, la oceanografía, el clima y los programas de aviso de huracanes. Los huracanes se encuentran entre los desastres naturales más mortíferos y, además, causan enormes pérdidas económicas (Bevere *et al.* 2020). Por lo tanto, una predicción precisa de su intensidad y trayectoria a corto y medio plazo son esenciales para mitigar las pérdidas humanas y económicas. A más largo plazo, también es importante comprender si las condiciones meteorológicas extremas se están volviendo más extremas en el contexto del cambio climático, llegando a perturbar aguas más profundas y, por lo tanto, afectando la dinámica del sistema climático entero. Desafortunadamente, fenómenos como El Niño y la Oscilación de Madden-Julian, están asociados a una gran variabilidad interanual en la distribución de la intensidad de vientos extremos, con una dependencia del cambio climático todavía poco clara, limitando así nuestra capacidad para determinar si la climatología de huracanes en realidad está cambiando o no.

Dado que los huracanes se muestrean de manera muy dispersa, los instrumentos satelitales son en principio muy útiles para hacer un seguimiento de su distribución espacial, su distribución temporal y su intensidad con respecto al cambio climático. Sin embargo, para ello es necesario garantizar la estabilidad temporal tanto de la calidad como de la cantidad de las medidas satelitales. Además, un análisis climático requiere series temporales lo más largas posibles, lo cual conlleva la necesidad de una precisa intercalibración entre sensores satelitales, especialmente a intensidades de viento altas y extremas (Verhoef *et al.* 2017). Para evaluar y calibrar adecuadamente los vientos extremos es fundamental construir un conjunto de datos de referencia. Hasta ahora, para la calibración de vientos extremos satelitales se han utilizado dos referencias *in situ* independientes: boyas fondeadas y sondas GPS de caída libre *(dropsondes)*. Recientemente, Polverari *et al.* (2021) han presentado un nuevo enfoque para la evaluación de la consistencia entre estos dos conjuntos de datos *in situ* para los cuales las adquisiciones de datos coincidentes son bastante escasas. Para superar esta limitación, las medidas de intensidad del viento del dispersómetro ASCAT a bordo de los satélites Metop se utilizan como referencia común entre los dos conjuntos de datos *in situ*. Las medidas coincidentes (colocalizaciones) de ASCAT y de boyas se comparan con las medidas coincidentes de ASCAT y del radiómetro SFMR *(Stepped-Frequency Microwave Radiometer)* a bordo de los «caza huracanes» de la NOAA, durante el período 2009-2018. Hay que tener en cuenta que, mientras que los vientos ASCAT se han calibrado con datos de boyas, los vientos SFMR se han calibrado con datos de sondas GPS.

Los vientos ASCAT y los de las boyas, como es de esperar, concuerdan bien hasta 25 m s^{-1},

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

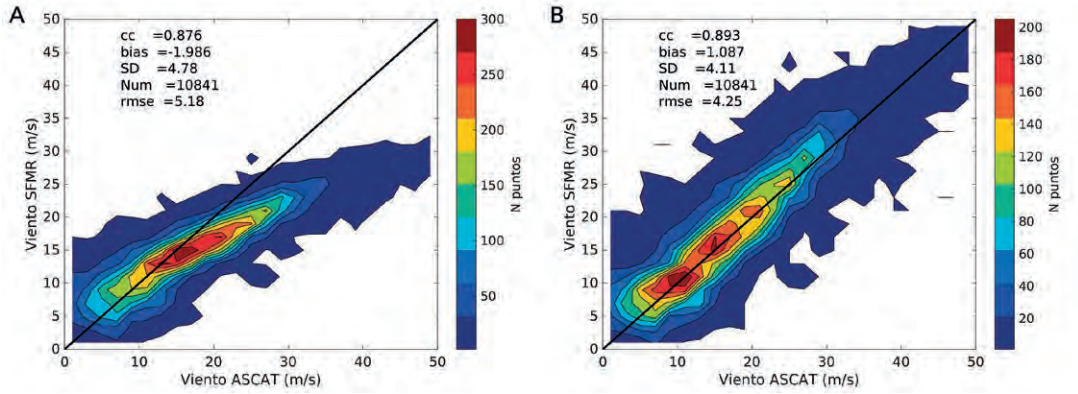


Figura 1. Histograma 2D de los vientos ASCAT (a bordo de Metop-A y Metop-B) y de los vientos SFMR colocalizados y promediados en celdas de 12.5 km (A). En B, los vientos ASCAT han sido recalibrados usando los datos de las sondas GPS, aplicando la función V'(ASCAT)=0.0095x2+1.52x–7.6, con x=V(ASCAT), para vientos por encima de 12 m s^{-1}. En la leyenda se reportan el coeficiente de correlación (cc), el sesgo (bias), la dispersión típica (SD), el número de puntos (Num), y el error cuadrático medio (rmse).

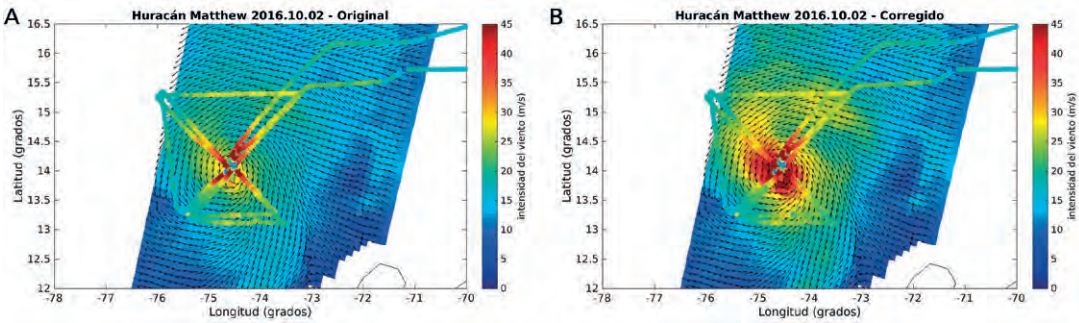


Figura 2. Vientos SFMR (líneas) colocalizados con los vientos ASCAT calibrados con boyas (originales) (A) y calibrados con sondas GPS (corregidos) (B) durante el huracán Matthew.

con algo más de dispersión entre 15 y 25 m s^{-1}. El análisis ASCAT/SFMR revela una subestimación del viento ASCAT para vientos superiores a 15 m s^{-1} (ver figura 1A). Para representar una resolución espacial del mismo orden que la de los vientos ASCAT, las medidas SFMR se promedian a lo largo de la trayectoria del caza huracanes. Tanto el SFMR (y, por tanto, las sondas GPS) como los vientos de boya parecen estar altamente correlacionados (alrededor de 0,9 en ambos casos) con ASCAT en el régimen de vientos fuertes. Sin embargo, muestran factores de escala muy diferentes. Utilizando vientos SFMR promediados como referencia se puede lograr una recalibración de los vientos ASCAT para intensidades de hasta 50 m s^{-1} (ver figura 1B) (Polverari *et al.* 2021). Las escalas de viento de la boya y de la sonda GPS son efectivamente muy diferentes en condiciones de viento fuerte y extremo. Por ejemplo, mientras que calibrando con los datos de boyas, ASCAT produce un viento de 25 m s^{-1} (áreas de color verde claro en la figura 2A), haciendo lo propio con los datos de las sondas GPS, ASCAT produce un viento de aproximadamente 37 m s^{-1} (áreas de color rojo claro en la figura 2B). Además, estas diferencias aumentan exponencialmente con la intensidad del viento.

Así pues, la pregunta es: ¿Qué fuente de viento es más fiable en condiciones de viento fuerte y extremo, las boyas o las sondas GPS?

En caso de vientos bajos, moderados y fuertes, la fuente de datos *in situ* más robusta para la calibración de la intensidad del viento oceánico es la boya de anclaje. Esta es la razón principal

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

por la que tanto ASCAT como los modelos globales de predicción meteorológica (como por ejemplo, el modelo de predicción europeo ECMWF) aplican un coeficiente (escala) de calibración generado a partir de medidas de boyas. Estas están validadas, usando anemómetros en mástiles (torres meteorológicas), hasta 25 m s^{-1} (con un error inferior al 10%) (Stoffelen *et al.* 2020). Aunque las boyas produzcan medidas de menor dispersión que las sondas GPS, por lo menos hasta 20 m s^{-1}, todavía no hay una evaluación precisa de las diferentes fuentes de incertidumbre. Las sondas GPS, a su vez, pueden fallar en proporcionar vientos a nivel de la superficie e, incluso cuando lo hacen, estos pueden estar afectados por el oleaje y los efectos de las ráfagas de viento. Por eso, los vientos a 10 m de altura se estiman generalmente promediando los de las capas superiores y aplicando una corrección logarítmica para llegar a la superficie (Uhlhorn et al 2007). Las principales fuentes de incertidumbre en este caso son el coeficiente de resistencia atmosférico que produce una fuerte desaceleración de la sonda GPS cerca de la superficie, y el cálculo de la posición (incluida la altura) por el chip GPS integrado en la sonda, cuyas prestaciones no se han investigado (todavía) y pueden causar sesgos adicionales en la estimación de la desaceleración. En otras palabras, ¿Puede este sesgo ser el responsable de la gran inconsistencia que hay entre los vientos altos y extremos de las sondas y las boyas?

En estos momentos, no se pueden sacar conclusiones sobre qué referencia de viento es mejor para la calibración/validación de viento satelital en condiciones de viento fuerte y extremo o sobre cómo consolidar ambas referencias para que sean consistentes entre sí. Se necesita investigar más para comprender las fuentes de tales diferencias. Los vientos recalibrados con los datos de las sondas (figura 2B) se ponen a disposición de la comunidad científica, que utiliza la escala del viento SFMR (a su vez calibrado con sondas GPS) como referencia para la caracterización y seguimiento de ciclones tropicales. El mismo enfoque se está utilizando en el marco del proyecto MAXSS de la Agencia Espacial Europea (ESA) para intercalibrar los vientos altos y extremos de todos los demás dispersómetros y radiómetros que operan en órbita. Pero la cuestión de si los vientos son extremos (escala de sondas GPS) o no tan extremos (escala de boyas) permanece abierta por el momento.

Referencias

Bevere L., Fan I., Holzheu T. 2020. Swiss Re Institute estimates USD 83 billion global insured catastrophe losses in 2020, the fifth-costliest on record. Accessed on June 9 2021. https://www.swissre.com/media/news-releases/nr-20201215-sigma-full-year-2020-preliminary-natcat-loss-estimates.html.

Polverari F., Portabella M., Lin W., *et al.* 2021. On High and Extreme Wind Calibration Using ASCAT. IEEE Trans Geosci Remote Sens (in press).

Stoffelen A., Mouche A., Polverari F., *et al.* 2020. C-band High and Extreme-Force Speeds (CHEFS). EUMETSAT Technical report. 74 pp. Accessed on June 9 2021. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-06/pdf_ss_chefs_final_rep.pdf

Uhlhorn E., Black P., Franklin J., *et al.* 2007. Hurricane Surface Wind Measurements from an Operational Stepped Frequency Microwave Radiometer. Mon Weather Rev 135: 3070-3085.

Verhoef A., Vogelzang J., Verspeek J., Stoffelen A. 2017. Long-Term Scatterometer Wind Climate Data Records. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens 10: 2186-2194.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14106

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Foto: Carlos Domínguez Carrió

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Karen Hissmann

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

6. Océano accesible

Jordi Sorribas, Arantza Ugalde, Jordi Isern, Ramiro Logares

Todos aquellos que tenemos la suerte de vivir cerca del mar hemos incorporado, sin darnos cuenta, su presencia en nuestro día a día, disfrutamos del azul horizonte que nos proporciona y de su oferta como lugar de encuentro y espacio de ocio. El contacto con el mar, el acceso físico a este medio nos despierta curiosidad, nos empuja a su conocimiento y por tanto a la conciencia de mantener una relación sostenible. Es en este sentido donde el acceso al océano acontece el acceso a su conocimiento, aspecto de importancia capital para nuestro desarrollo y para el futuro de nuestra existencia, y uno de los 7 objetivos –«el Océano accesible»– a lograr en la Década que celebramos.

En este capítulo, los autores profundizan en aspectos clave del proceso de obtención y acceso a los datos, la gestión de la información y el uso de tecnologías que fundamentan el acceso al conocimiento del océano. Nos darán luz sobre nuevos enfoques que garantizan un acceso abierto, equitativo, participativo y sin barreras, a la vez que favorecen la integración del conocimiento de mares y océanos dentro de nuestra sociedad. De su mano descubriremos cómo hemos pasado de tomar y guardar nuestras observaciones en lápiz y papel a disponer de miles de millones de datos almacenados en la nube, abiertos y disponibles en tiempo real para su uso, a la vez que nos plantean interesantes retos de gestión para asegurar su acceso a largo plazo de forma sencilla y confiable. Sin dejar de lado la importancia de los datos por un océano accesible veremos la relevancia de continuar construyendo y preservando las colecciones físicas.

Muestras y ejemplares biológicos de referencia construyen una base perdurable de nuestro conocimiento del océano, testigos de nuestra actividad investigadora del pasado y presente, y extraordinariamente útiles para el futuro. En este capítulo daremos un vistazo a las plataformas sobre las cuales desarrollamos la tarea de recolección de datos y muestras, con pincelada sobre la evolución y la nueva concepción de los barcos oceanográficos actuales, y una cata tecnológica de nuevas plataformas de observación, boyas y vehículos submarinos y otras infraestructuras como los cables de telecomunicación submarinos –no diseñados inicialmente para la investigación– que abren nuevas perspectivas de observación.

Una pieza que está siendo clave en la construcción de un océano accesible es el uso de Internet y, en particular de las redes sociales, que se han convertido en depósitos importantes de información y un medio para el análisis de grandes volúmenes de datos sobre el medio marino y nuestra relación con él como sociedad.

No se debe perder de vista la indispensable figura de los técnicos en tecnologías marinas, ni tampoco el relevante papel de la mujer como elementos clave y consolidadores en la consecución del objetivo del Océano accesible. También la ciencia ciudadana y los sistemas de monitorización participativa, y las interesantes sinergias entre centros de investigación públicos y empresas privadas que nos ofrecen nuevas posibilidades de ampliar nuestro conocimiento y acercarlo de forma práctica a nuestra sociedad, en definitiva haciendo que nuestro océano sea accesible.

Esperamos aun así que todo esto haga que nuestro conocimiento del océano no se pare y nos impregne con la misma naturalidad, sencillez y profundidad que lo hace su presencia física.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.1. De la libreta a la nube de datos: setenta años de ciencia marina

Savitri Galiana, Lucía Quirós, Elisa Berdalet, Xavier García, Emilio García-Ladona, Jordi Isern-Fontanet, Laia Viure

La adquisición de datos, análisis y posterior interpretación es una tarea esencial para la ciencia, que requiere almacenar, organizar, acceder y transferir estos datos. Esta necesidad afecta también a otros sectores de la sociedad, como empresas o entidades de gobierno que utilizan los datos como una herramienta clave en la toma de decisiones. Esto ha hecho que la investigación en este campo haya sido muy activa y el almacenamiento y gestión de datos haya sufrido una evolución muy importante. En el Institut de Ciències del Mar (ICM) se ha vivido de cerca este cambio, pasando de tener los datos en papel a tenerlos en dispositivos electrónicos o en la «Nube». Sin embargo, la organización, gestión y transferencia de los datos sigue teniendo muchas carencias. Diferentes iniciativas en el ICM están trabajando para superar las dificultades existentes y organizar la información científica obtenida a lo largo de tantos años, con la financiación de entes públicos fundamentalmente, en bases de datos siguiendo los principios FAIR *(findability, accessibility, interoperability, reusability)* de aplicación internacional en los datos científicos.

Almacenaje y gestión de datos

Antes de que hubiera ordenadores, los datos se registraban en papel y se almacenaban en listas, blocs de notas y revistas, con texto, gráficos y tablas tecleados a mano y ciclostilados. Los datos guardados de esta manera ocupaban mucho volumen físico, su acceso era lento y dificultoso y eran muy susceptibles a deteriorarse por causas ambientales o a quedar destruidos o extraviados de manera accidental. A medida que la tecnología fue avanzando, los registros en papel se fueron sustituyendo, primero, por tarjetas perforadas, tarjetas de cartón que almacenaban los datos a través de un patrón de agujeros y espacios blancos; después, por cintas magnéticas y, más adelante, por discos duros, disquetes, CDs, DVDs, memorias USB, etc. Recientemente, gracias a los avances en las tecnologías de la computación y en las telecomunicaciones, se ha extendido el uso de la «Nube» de datos. La Nube ofrece principalmente una cantidad ilimitada de capacidad de almacenamiento de datos y un acceso desde cualquier lugar y en cualquier momento donde haya una conexión *world wide web*. El almacén físico de la Nube consiste en una red de diferentes servidores, muchas veces ubicados en diferentes lugares del mundo, gestionados por organizaciones que se encargan de mantener y proteger el sistema físico, y de garantizar la accesibilidad a los datos.

Con la evolución de las tecnologías se fueron desarrollando modos más avanzados de organización y gestión de los datos, y así fue tomando cuerpo el concepto de las bases de datos (BBDD). Las BBDD se definen como un conjunto de información organizada fácilmente accesible, manipulable y actualizable (Search Data Management Tech Target 2021). Normalmente, se controlan a través de un software conocido como sistema de gestión de BBDD (DBMS, *database management system*). Un DBMS sirve como una interfaz entre la BBDD y sus usuarios u otros programas, permitiendo introducir, almacenar y recuperar grandes cantidades de información, así como de gestionar su organización. El conjunto de datos y el DBMS,

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

junto con las aplicaciones asociadas, se denominan sistema de BBDD o, simplemente, BBDD. Las BBDD pueden clasificarse en función de su modelo de organización.

A pesar de la fuerte evolución que han experimentado estos modelos, el enfoque más frecuente a día de hoy sigue siendo el de las BBDD relacionales, que aparecieron en la década de los 80. Las BBDD relacionales almacenan y organizan los datos en un conjunto de tablas con diferentes tipos de vinculaciones entre ellas. Sin embargo, el modelo de BBDD más adecuado depende de los propósitos de esta y de los mismos datos. Las preguntas que se deben responder a la hora de diseñar una base de datos son: i) ¿cuál es su objetivo? ii) ¿quiénes serán los usuarios? iii) ¿qué tipo de preguntas debería responder? En 2016, un consorcio de científicos y organizaciones, publicaron los principios que deben cumplir las BBDD (Wilkinson *et al.* 2016): deben poder ser encontradas *(findability)*, accesibles *(accessibility)*, interoperables (*interoperability)* y reutilizables *(reusability)*. Estos principios se conocen como FAIR por sus siglas en inglés y surgen en el contexto actual de gestión de una cantidad inmensa de datos *(big data)*.

Pasado, presente y futuro de los datos en el ICM

En los años 70, el ICM, en aquellos momentos Instituto de Investigaciones Pesqueras, llevó a cabo el proyecto MARESME, en que a bordo del buque B/O Cornide de Saavedra y del B/O García del Cid se estudió la circulación oceánica y se caracterizó la contaminación química de la costa de Barcelona principalmente. Se hicieron observaciones hidrográficas, químicas y biológicas básicas, en tres estaciones oceanográficas fijas situadas en una sección perpendicular a la costa. A lo largo de diferentes días del año, los científicos se trasladaron hasta allí con los instrumentos de medida. Se tomaron muestras de agua, se instalaron correntímetros en puntos fijos y se lanzaron algunas boyas a la deriva con

DATOS INFORMATIVOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES PESQUERAS
C.S.I.C.

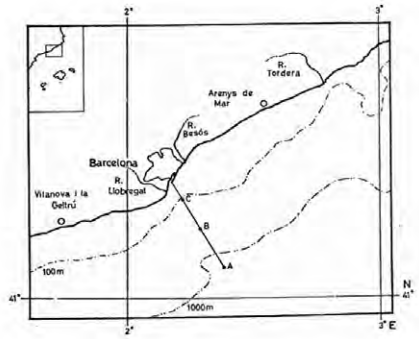
5

Datos oceanográficos frente a Barcelona

(1975 - 1976)

J. SALAT, J. FONT, A. CRUZADO

Barcelona, octubre de 1978



EST NO. 87 LATITUD 41 13.0N D.SECCHI 31 HORAS TIRADAS
FECHA 10/11/75 LONGITUD 2 17.0E PRF.FONDO 350 1 1403 2 1432 3 1451
HORA 1345-1505

PROF	TI	TEMP	SALN	SG-T	VESP	OXIG	NO3	SIO4	PO4	CL-A
0	3	17.94	37.847	27.487	97.325	5.96	.00	.00	.00	
5	2	17.92	37.827	27.477	97.324	6.05	.00	.00	.00	
10	2	17.88	37.843	27.499	97.320	5.93	.00	.00	.00	
25	2	17.20	37.962	27.759	97.289	5.78	.00	.00	.00	
50	2	16.47	38.118	28.055	97.250	5.78	.00	.70	.00	
75	2	15.89	38.104	28.191	97.228	5.80	.45	.70	.09	
100	1	15.09	38.156	28.405	97.197	5.83	1.29	2.60	.09	
150	1	13.37	38.300	28.893	97.129	5.57	4.16	3.70	.27	
200	1	13.24	38.392	28.992	97.099	5.30	5.91	4.70	.17	
250	1	13.26	38.444	29.028	97.074	4.98	6.29	5.90	.23	
300	3	13.67	38.460	28.953	97.061	5.10	7.54	6.40	.32	

Figura 1. Ejemplo de almacenamiento y transferencia de datos de los años setenta en el Instituto de Investigaciones Pesqueras, hoy, Institut de Ciències del Mar. Portada, mapa de localización de las estaciones oceanográficas y tabla de datos de la estación número 87 registradas el día 10/11/75 del informe Datos Informativos número 5 del Instituto de Investigaciones Pesqueras (Salat *et al.* 1978).

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

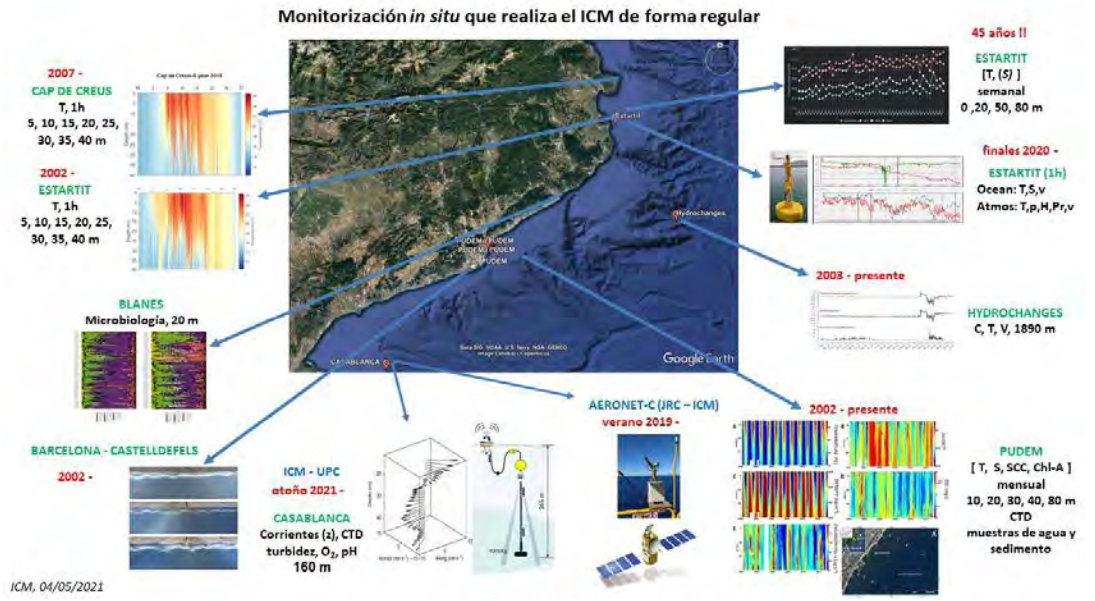


Figura 2. Panorama actual de diferentes datos que adquiere el ICM para la monitorización del medio marino en la costa catalana. Está previsto de incluirla en BBDD, lo que reforzará los estudios multidisciplinares..

correntímetros situados por encima y por debajo de la termoclina. Los datos adquiridos se almacenaron en formato papel y se transfirieron a través del informe, también en papel, Datos Informativos 5, «Datos oceanográficos frente a Barcelona» (Salat *et al.* 1978), organizados en una serie de tablas, donde cada tabla correspondía a las medidas hechas en una posición y un día determinados (figura 1). En aquellos tiempos, para analizar los datos y poder encontrar el valor de un parámetro a una cierta profundidad, posición y día, había que tener acceso a este informe, revisar todas las tablas y manualmente extraer el valor de interés. Las gráficas se hacían también manualmente.

Hoy día, la adquisición de datos en campañas, como, por ejemplo, la SPURS de 2013, se ha automatizado hasta niveles inimaginables cuarenta años atrás. El objetivo de esta campaña era el estudio de los procesos oceanográficos responsables de la formación y mantenimiento del máximo de salinidad en el centro del giro subtropical del Atlántico Norte. Para ello, se utilizó instrumentación de última generación, como, por ejemplo, unas boyas de deriva diseñadas y construidas en el ICM, que transmitían cada hora datos de posición, temperatura y salinidad superficiales del mar vía satélite. Algunas de estas boyas se recuperaron tres años más tarde en diferentes lugares del planeta, por lo que estuvieron transmitiendo datos en tiempo real cada hora, durante años.

A pesar del avance en la tecnología de adquisición de datos que se utiliza en el ICM, y la posibilidad de guardar los datos en discos duros, servidores locales y Nubes de datos, su gestión y transferencia sigue siendo bastante limitada. La mayoría de los científicos siguen teniendo sus ficheros de datos almacenados con criterios específicos (propios del estudio, pero no estandarizados), en sus discos duros, servidores, etc. sin tenerlos organizados en BBDD. Por otra parte, en los próximos años, se espera que sean cada vez más las máquinas que se ocupen de la adquisición y procesado de datos, haciendo de las ciencias marinas una disciplina basada en el *big data*. En este contexto, recientemente, el European Marine Board Expert Working Group en *big data* ha lanzado una serie de recomendaciones para fomentar la implementación de los principios FAIR en el campo de las ciencias marinas (Guidi *et al.* 2020). En el ICM, iniciativas como la *Xarxa Marítima de Catalunya* y el IcatMar, están desarrollando BBDD de pesca y visualizadores espaciales que permitan una mejor gestión de los recursos pes-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

queros. Además, los proyectos de capitalización de datos, SHAREMED y MED OSMoSIS, del Interreg Mediterranean program, están trabajando para incluir los datos o metadatos (información descriptiva sobre las características de los datos) de aquellos investigadores del ICM que lo deseen en BBDD (figura 2). Esto permitirá organizar la información de una manera mucho más homogénea y garantizar la calidad de los datos, será mucho más fácil acceder a ellos, se podrán actualizar y serán fácilmente transferibles. Es decir, seguirán los principios FAIR y, además, abrirán nuevas posibilidades a estudios multidisciplinares que permitan una mejor comprensión del océano y sus cambios.

Referencias

Guidi L., Fernàndez Guerra A., Canchaya C., *et al.* 2020. Big Data in Marine Science. In: Alexander B., Heymans S.J.J., *et al.* (eds), Future Science Brief 6 of the European Marine Board, Ostend, Belgium.

Salat J., Font J., Cruzado A. 1978. Datos oceanográficos frente a Barcelona (1975-1976). Datos Informativos del Instituto de Investigaciones Pesqueras 5: 1-73.

Search Data Management Tech Target. 2021. Definition: database. Accessed 17th May 2021. https://searchdatamanagement.techtarget.com/definition/database

Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J., Appleton G., *et al.* 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data 3: 160018.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14108

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.2. Del soporte técnico a la ciencia

Joel Sans, Arturo Castellón, Jordi Sorribas

Lejano parece ese 1971 cuando el buque de investigación oceanográfica Cornide de Saavedra embarcó por primera vez un ordenador IBM 1130 y se midieron y procesaron datos en continuo de temperatura, salinidad y clorofila de la superficie del mar. Este hecho que hoy resulta tan familiar, cambió el modo de ver la oceanografía. Desde entonces han pasado ya cincuenta años.

Sin duda, el campo de la tecnología y de la ciencia discurren en paralelo nutriéndose ambos de los resultados del otro para eliminar los obstáculos al saber y facilitar su ascenso al nuevo conocimiento. Pero, entre ambos mundos, existe un tercer actor que se sitúa como intermediario. La *técnica* habita entre los medios materiales que proporciona la tecnología en forma de plataforma o equipamiento científico y el resultado de la actividad investigadora que proporciona la ciencia. Su conocimiento y habilidad para usar la tecnología y su saber del dominio de estudio lo confieren como herramienta imprescindible para abordar su actividad tanto de laboratorios como de campo.

Un actor importante de la técnica en el ámbito marino en España es la Unitat de Tecnologia Marina (UTM).

Trayectoria histórica de la Unitat de Tecnologia Marina

Conocedores de la importancia de la *técnica* en el campo de las ciencias del mar, nace en 1992 la Unidad de Gestión de Buques Oceanográficos (UGBO). Y lo hace con el propósito de dar apoyo técnico y logístico a los proyectos de investigación que se desarrollan a bordo de los buques de investigación oceanográfica B/O Hespérides y B/O García del Cid.

En 1999, el radio de actuación de la UGBO se amplía y logra obtener la gestión integral de la Base Antártica Española Juan Carlos I. La UGBO se redimensiona y adquiere una magnitud nueva llamada UGBOIP (Unidad de Gestión de Buques Oceanográficos e Instalaciones Polares). Fue a partir del año 2000 cuando la UGBOIP se convierte en lo que hoy conocemos como la Unitat de Tecnologia Marina (UTM).

Es en 2007 cuando la UTM adquiere una nueva dimensión y se consolida como puente entre la comunidad científica a la que asiste y las plataformas de investigación que gestiona. No con poco esfuerzo nace un nuevo referente en la investigación oceanográfica española: el Sarmiento de Gamboa es una realidad.

En 2010 se inician las obras de remodelación de la Base Antártica Española Juan Carlos I. La crisis económica que azota el país dificulta su construcción e irremediablemente retrasa la finalización de la obra. Fue en el 2017 cuando finalizó la remodelación de la Base Antártica alcanzando así un logro sin duda importante para las ciencias polares.

Y, al parecer, el 2020 sitúa de nuevo a la UTM ante nuevos retos con la integración del Instituto Español de Oceanografía dentro de la estructura del CSIC. La UTM amplía su capacidad de ges-

Figura 1. El B/O Sarmiento de Gamboa durante la maniobra de despliegue de un ROV.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. Verano austral en la Base Antártica Española Juan Carlos I. © Javier Urbón.

tión administrativa y económica, potencia áreas funcionales importantes y estratégicas que facilitarán la gestión integral de toda la flota y reforzarán la relevancia de la base técnica y tecnológica de la investigación marina. La UTM, con treinta años de actividad técnica, alcanza una dimensión relevante de la gestión de la técnica en las ICTS (Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares) Flota y Antártida de ámbito marino y polar.

¿Y a partir de ahora?

La UTM, con las nuevas y renovadas infraestructuras ambiciona, no solo la responsabilidad de un servicio técnico más que consolidado; ambiciona también ser actor y protagonista en proyectos de desarrollo tecnológicos e innovación en el ámbito de las tecnologías del mar y polares.

El área técnica de la UTM es, sin duda, una fuente de inspiración absolutamente necesaria para el desarrollo, pues goza de una enorme experiencia más que demostrable y un amplio conocimiento y formación dentro de su ámbito de actuación. Este gran potencial debe trasladarse no solo a la actividad de campo, también a la actividad desarrolladora e innovadora. No hacerlo implica *de facto* un malbaratamiento de los mejores recursos de los que la UTM dispone.

A corto plazo, la UTM debe desarrollar proyectos de ingeniería que tienen como fin cubrir una necesidad no satisfecha. La actividad se centra en desarrollar soluciones que no existen en el mercado. Si el mercado aporta la solución, puede analizarse cuán alejadas están las compatibilidades entre solución aportada y carencia existente y en consecuencia se diseña y ejecuta una solución puente entre ambas. Para estrategias de más largo plazo, la UTM debe crear sus propias líneas de investigación tecnológica que impliquen el perfeccionamiento de la tecnología, de la metodología y de la implementación técnica en la observación y análisis *in situ.* Estar al corriente del estado del arte de las ciencias y tecnologías marinas y conocer sus tendencias. Sin olvidar la participación y colaboración estrecha con otros grupos y líneas de investigación tecnológica nacionales e internacionales, centros tecnológicos, universidades e industria de características similares y que persiguen el mismo fin. Y adelantarse a las necesidades de los equipos científicos como inversión de futuro y explotar más aún la posición de la UTM, las infraestructuras que gestiona, como factor estratégico en las ciencias del mar.

Nunca las ciencias y las tecnologías del mar han sido tan necesarias como ahora. El desarrollo tecnológico es un activo que la UTM debe y quiere explorar, desarrollar, compartir y poner a disposición de la comunidad a la que sirve: 56 técnicos, 568 campañas y 1 303 573 millas navegadas lo avalan.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14109

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.3. Colecciones Geológicas: una herencia científica

David Casas, Gemma Ercilla, Belén Alonso, Ferran Estrada

El estudio de los fondos marinos es un objetivo complejo debido a la dificultad técnica de acceder y registrar los ambientes submarinos en general y los marinos profundos en particular. Este estudio se aborda principalmente con el registro de datos acústicos y sísmicos (batimetrías y perfiles sísmicos) que ofrecen observaciones indirectas de la morfología y el marco tectono-sedimentario, y con la obtención de muestras de sedimento. Estas muestras, en el mejor de los casos, son columnas de registro vertical de varios metros de longitud (testigos de sedimento) que nos aportan información sobre la composición, edad o procesos que han generado los depósitos.

Del registro al repositorio. Del repositorio al recurso

El progreso técnico y económico desde los años 80 del s. xx ha favorecido el acceso de la comunidad científica a mejores barcos oceanográficos equipados con mejor instrumentación. Siendo esto cierto, las condiciones adversas del medio y el alto coste económico de trabajar en él hace que cada km^2 de datos acústicos, cada km de datos sísmicos o cada metro de columna sedimentaria tengan un enorme valor debido a la baja probabilidad de poder volver a obtenerlos. Esto hace que las colecciones de datos, más allá de su valor histórico, se deban entender como un recurso tanto científico como socio-económico de enorme valía, motivando su catalogación y conservación en las mejores condiciones posibles.

Así, las colecciones de datos geológicos alinean estratégicamente las necesidades pasadas, presentes y futuras de la comunidad científica. Hacen accesibles datos históricos de diversos entornos geológicos, que ya han sido estudiados con estándares y propósitos muy variados, para las necesidades científicas futuras. Son un recurso del que se puede extraer un enorme volumen de información nueva mediante nuevas tecnologías.

Los testigos de sedimento y los registros sísmicos son una fuente de datos fundamental para futuras investigaciones sobre el cambio climático global, riesgos geológicos marinos, control y valoración de la polución, cartografía de ecosistemas, exploración de recursos, obras de ingeniería marina, etc. Disciplinas, como la paleoclimatología y la paleoceanografía, decodifican la información conservada en los sedimentos marinos de los cambios climáticos y de la circulación oceánica ocurridos en el pasado. La comprensión de estos cambios ayuda a generar modelos que pueden proyectar estos cambios hacia el futuro.

Las colecciones geológicas del Institut de Ciències del Mar son un patrimonio científico, único en el CSIC, constituido por diferentes conjuntos de datos recopilados en el marco de proyectos de investigación dedicados a la exploración y explotación del fondo marino

Figura 1. Imagen parcial de la litoteca del ICM-CSIC.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

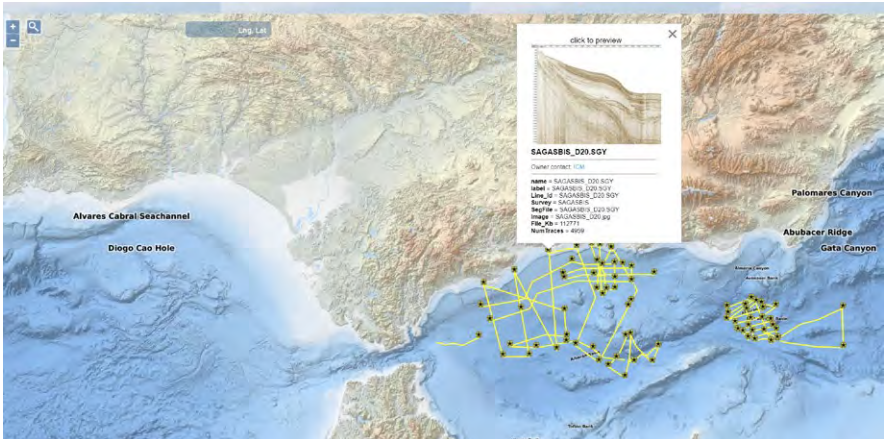


Figura 2. Imagen del portal de acceso a la base de datos de las colecciones geológicas del ICM-CSIC (http://gma.icm.csic.es/en/data).

desde hace décadas. La colección incluye dos grandes grupos de registros: 1) un conjunto de más de 1.000 testigos de sedimento del fondo y subfondo marinos, así como datos y productos derivados como fotografías, radiografías, y resultados analíticos (texturales y composicionales) de submuestras; y 2) una extensa base de datos que supera los cien mil kilómetros de registros de sísmica con diferentes resoluciones, tanto en formato papel, analógico como digital.

La mayoría de los testigos de sedimento del repositorio se almacenan en una litoteca refrigerada (figura 1). Otro tipo de muestras se almacenan a temperatura ambiente, todo correctamente catalogado. Además, el ICM dispone de varias instalaciones para analizar las muestras y testigos e infraestructura para trabajar con perfiles sísmicos.

Los datos de la colección proceden de fondos de varios mares y océanos donde los investigadores del ICM-CSIC han trabajado, desde el Antártico hasta el Pacífico y Atlántico, aunque la densidad de datos es especialmente alta en el Mediterráneo occidental. Los metadatos que identifican los elementos de la colección están además publicados en un geoportal de acceso libre (figura 2).

Una vez los datos recopilados han sido explotados por los equipos científicos propietarios, pasan a incorporarse al repositorio que constituye la colección siguiendo un protocolo de control de calidad, preservación y accesibilidad de metadatos. Los datos de entrada se guardan como registros básicos que describen las entradas sin procesar.

Las colecciones geológicas del ICM tienen la vocación de evolucionar de un repositorio a un recurso interconectado que use múltiples fuentes y permita realizar visualizaciones, análisis e interpretaciones. Para ello es necesaria la implementación de un sistema de gestión de datos relacionales que permitan recuperar datos almacenados, generar consultas remotamente o que den acceso a imágenes digitales o escaneadas de datos originales en papel. Este objetivo requiere el desarrollo de herramientas para acceder a descripciones y visualizaciones de datos para su análisis. Este paso es especialmente importante cuando, por ejemplo, se pretende construir una base de datos regional constituida por cientos de testigos con sus correspondientes datos analíticos, ya sean continuos o relativos a submuestras de sedimento.

Gestionar la gran diversidad (de datos) para alcanzar la estandarización es en sí mismo un reto, pero es imprescindible para que las colecciones geológicas del ICM-CSIC puedan comunicarse y complementarse con otras bases de datos existentes, tanto de carácter regional como internacional (EMODnet; https://emodnet.eu; Thierry *et al.* 2019).

Referencias

Thierry S., Dick S., George S., Benoit L., Cyrille P. 2019. EMODnet Bathymetry a compilation of bathymetric data in the European waters, OCEANS 2019 - Marseille, pp. 1-7.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14110

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.4. Las Colecciones Biológicas de Referencia: un referente del pasado y el presente, útil para el futuro

Pere Abelló, Elena Guerrero, Ricardo Santos-Bethencourt

Las Colecciones Biológicas de Referencia (CBR) del Institut de Ciències del Mar (figura 1) fueron creadas a partir de la necesidad de catalogar y tener a mano ejemplares de referencia de la fauna marina que los científicos, del entonces llamado Instituto de Investigaciones Pesqueras (*Pesqueras* coloquialmente por la comunidad científica barcelonesa de los años sesenta a noventa del siglo pasado), estudiaban. El área de referencia preferente era, naturalmente, el mar de las costas mediterráneas, y los grupos zoológicos preferentes, las especies de interés pesquero. Desde el primer momento, no obstante, se le dio mucha importancia a la diversidad biológica, muy probablemente por la influencia que la Universitat de Barcelona daba (y da) al estudio de lo que ahora llamamos biodiversidad (zoológica, botánica, microbiológica…) y al estudio de sus interacciones con el ambiente (ecología). Siempre se dio mucha importancia al hecho de considerar que las poblaciones explotadas no se pueden estudiar y gestionar solo a partir de la información que proviene directamente de la pesca. Las interacciones con el ambiente, las relaciones depredador-presa, las especies acompañantes de las pesquerías, la oceanografía física… son esenciales. El fracaso de las gestiones de pesquerías enfocadas únicamente en la explotación de especies concretas mostró que una gestión enfocada mayoritariamente a la especie objetivo puede tener cierto sentido en aquellos ecosistemas basados en la presencia de pocas especies y con relaciones depredador-presa de carácter lineal. No es así en comunidades biológicas más ricas en biodiversidad en las que el conjunto de interacciones garantiza la estabilidad del ecosistema. Por tanto, no solo el conocimiento de las especies objetivo es necesario, sino que hay que conocer bien el conjunto biológico y físico de los ecosistemas y su variabilidad en el tiempo. La necesidad de conocer e identificar correctamente las especies y sus correspondientes estadios vitales (larvas, juveniles, adultos, machos, hembras…) fue en consecuencia la creación de las colecciones de referencia de peces y otros grupos de interés pesquero, como los crustáceos y cefalópodos, así como de la fauna asociada. Los pioneros de este estadio fueron los ictiólogos Jaume Rucabado, Domènec Lloris y Conchita Allué.

Figura 1. Colecciones Biológicas de Referencia (CBR-ICM). Interior de uno de los armarios compactos donde se ubican los especímenes catalogados, conservados en etanol. En cada recipiente se aprecia su correspondiente etiqueta, la cual indica la especie, el número de catálogo, la ubicación y otra información de interés (Foto: Elena Guerrero, CBR-ICM).

Los ejemplares de referencia

Partiendo de la premisa de la existencia de especies diferentes (sin entrar ahora en el debate sobre el concepto de especie) se consideró que era necesario disponer de ejemplares de referencia de las especies de interés pesquero y otra fauna asociada. Sabemos, por ejemplo, que en las costas mediterráneas tenemos dos especies de salmonete. Por tanto, tenemos

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Taula 1. Número de registros, especies, especímenes tipos y holotipos catalogados en las Colecciones Biológicas de Referencia (CBR-ICM) acorde a los principales phyla y el total. Datos accesibles en la base de datos actual (mayo 2021) y también publicadas en GBIF (Global Biodiversity Information Facility). Otros: Annelida, Cnidaria, Echinodermata, Nemertea, Sipuncula, Bacillariophyta, Ciliophora y Perkinsozoa.

	Phylum				
	Chordata	Arthropoda	Mollusca	Otros	Total
N. de registros	14.791	20.310	1.814	1.308	38.223
N. de especies	3.551	1.046	285	50	4.932
N. de tipos	63	200	16	4	283
N. de holotipos	11	41	3	3	58

que tener ejemplares de las dos especies para que queden como modelo de cuáles son los individuos que denominamos salmonete de roca respecto a lo que denominamos salmonete de fango. Lo mismo pasaría con la merluza. Ahora bien, en las costas mediterráneas solo hay una especie de merluza, por tanto, no haría falta hacer un gran esfuerzo en cuanto a esta especie, sin embargo, hay machos, hembras, juveniles, larvas, post-larvas… con morfologías diferenciales. Lo que sucede en el presente caso, es que la flota pesquera española pescaba / pesca no solo en aguas estatales, sino que, en los años setenta, ochenta, noventa… pescó en muchas zonas del mundo. Era, por lo tanto, necesario documentar qué especies se pescaban en las diferentes zonas, no solo europeas, sino también especialmente africanas, altamente productivas y asociadas a los afloramientos de aguas profundas o en las interacciones de corrientes marinas, como las costas del Sáhara, Namibia, Sudáfrica… por ejemplo, donde hay diferentes especies de merluza, pero difíciles de identificar por los no expertos. En aquellas décadas se hizo mucho trabajo para documentar no solo las especies objetivo de las pesquerías, sino también de toda la fauna acompañante asociada. El descubrimiento de especies nuevas para la ciencia, fue uno de los puntos fuertes (y mediáticos, diríamos hoy en día) de las primeras acciones de las Colecciones. Hay que destacar que, en paralelo a la colección de peces, también se desarrolló una colección de otolitos (estructuras calcáreas depositadas en el oído interno de los peces óseos).

Las Colecciones hoy

En la actualidad nuestras Colecciones acogen un total de 38.223 registros, con un total de 4.932 especies, fundamentalmente ejemplares de peces (osteictios y condrictios), larvas de peces (ictioplancton) y otolitos, crustáceos (decápodos, estomatópodos, cumáceos, misidáceos, isópodos…), moluscos (cefalópodos, bivalvos, prosobranquios…), equinodermos y otros grupos, minoritarios en volumen, pero no por eso menos importantes para el funcionamiento y el equilibrio de los ecosistemas marinos. Respecto a los ejemplares tipo, las Colecciones hospedan un total de 283, de los cuales 58 son holotipos, los individuos sobre los cuales se han basado las descripciones originales de las especies nuevas para la ciencia (tabla 1). Hacemos una mención especial a la Colección Zariquiey de crustáceos decápodos –fruto de la donación de la familia Zariquiey en los años setenta– que constituye la base del conocimiento faunístico de los crustáceos decápodos no solo ibéricos sino de todo el Mediterráneo.

Una de las funciones más importantes de las Colecciones es proporcionar la posibilidad y la infraestructura para que investigadores de todo el mundo realicen estancias en nuestras instalaciones para el estudio de los ejemplares, así como la realización de préstamos de ejemplares a nivel nacional e internacional. En los últimos años, además, las Colecciones están teniendo una gran importancia en la utilización de ADN para la caracterización e identificación de especies y definir las relaciones de parentesco genético entre individuos y especies, contribuyendo así al conocimiento del árbol de la vida.

Las Colecciones son una infraestructura de trabajo y de investigación valiosa por los contenidos y por el patrimonio natural, científico, cultural e histórico que representan, pero también por la investigación científica puntera que posibilitan en el ámbito de la biodiversidad y de la ecología marina. En este sentido es remarcable la cantidad y calidad de los productos de investigación generados a todos los niveles científicos, especialmente en cuanto a publicaciones y a otros productos en el ámbito de la divulgación científica de conocimientos a la sociedad.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14111

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.5. El compromiso del ICM con la igualdad de género en la investigación marina

Esther Garcés, Silvia Donoso, Elena Torrecilla, Janire Salazar, Sara Soto, Clara Cardelús, Maria Gracia Puga, Queralt Güell Bujons, Cristina González Haro, Josep L. Pelegrí, Andrea G. Bravo, Pere Puig, Mercedes Blázquez, Belén Alonso

A pesar del impulso de la igualdad entre mujeres y hombres en las instituciones de investigación en los últimos años y de los avances logrados, aún queda un largo camino por recorrer. La ciencia constituye todavía un ámbito asociado a la imagen masculina, invisibilizando con frecuencia el trabajo y las aportaciones de las mujeres. Como muchas otras esferas de la sociedad, las instituciones de investigación contribuyen a la re(producción) estructural de les desigualdades de género.

Mujeres y hombres tienden a concentrarse en determinados campos científicos con la segregación horizontal que ello implica. Por otra parte, el llamado «techo de cristal» –la barrera invisible que dificulta u obstaculiza el acceso de las mujeres a los niveles más altos de poder, de decisión o de responsabilidad, limitando sus carreras profesionales–, materializa la segregación vertical. La permanencia en la investigación es una carrera de obstáculos en la que se produce un goteo constante de capacidades y talentos, que se agrava para las mujeres. Además, la investigación parece a menudo ciega a la importancia de considerar la dimensión de género en su abordaje, contenido y análisis.

Actuar sobre esta realidad requiere cambios institucionales a muchos niveles. Esta es una prioridad en las agendas de numerosos organismos internacionales. Así, es un objetivo de la Comisión Europea que la dimensión de género sea integrada completamente en los proyectos de investigación de Horizonte Europa, y el Espacio Europeo de Investigación establece como prioridad que la igualdad de género y la perspectiva de género se integren igualmente a la investigación. De la misma manera, la igualdad de género en el ámbito de la investigación marina es un requisito establecido por la ONU en el marco de la *Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible*.

La igualdad de género como principio rector del ICM

El Institut de Ciències del Mar (ICM), como centro de excelencia en investigación marina, está plenamente alineado con el compromiso con la igualdad de género. Las personas que trabajamos en el ICM llevamos a cabo nuestro trabajo con la inquietud por el conocimiento del mar con una visión holística y estamos preparadas para los retos actuales. Como resultado de esta posición pionera y mirada creativa en el estudio de los océanos, nuestra institución también tiene una gran responsabilidad con la sociedad. Nuestro compromiso como institución pública de investigación, financiada por el conjunto de la sociedad, es lograr la excelencia científica en el ámbito marino promoviendo los valores de respeto, igualdad, diversidad, transparencia y colaboración (figura 1).

Desde 2017, el ICM cuenta con un Grupo de Trabajo de Igualdad. Este ha constituido un espacio de reflexión, debate, formación, generación de alianzas y acciones. Desde el grupo se han impulsado acciones dirigidas, entre otras, a dar visibilidad al trabajo y creatividad de las investigadoras y técnicas, abrir espacios de participación, identificar expresiones de inequidad y proponer medidas de mejora, identificar y desplegar buenas prácticas, y acercar la ciencia a las escuelas ofreciendo referentes femeninos[1].

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. Un mar de diversidad. Ilustración de Vanessa Donoso.

Este proceso dio un salto cualitativo con la obtención del financiamiento de dos proyectos europeos[2] dirigidos a la promoción de la igualdad de género en la investigación y la innovación. Como resultado de este impulso, por primera vez el ICM cuenta con un Plan de Igualdad de Género[3] a nivel de centro.

El Plan de Igualdad de Género del ICM

Previo al diseño del Plan, se ha elaborado un diagnóstico que ha permitido establecer la realidad concreta de mujeres y hombres en relación con la igualdad de trato y oportunidades, así como identificar las brechas de inequidad y los factores que las producen. El diagnóstico ha propiciado la toma de conciencia de las situaciones de desigualdad y discriminación por razón de género, así como la posibilidad de tomar decisiones informadas para revertir esta situación. El Plan prioriza objetivos y resultados, y define un conjunto de medidas para lograrlos que se articulan en torno a diversos ámbitos de intervención, entre otros: el desarrollo de la carrera profesional, la formación en igualdad de género, la organización del tiempo de trabajo, la corresponsabilidad y la conciliación de la vida personal, familiar y laboral; la igualdad en las estructuras funcionales y organizativas del centro; o la inclusión del género en la investigación e innovación.

El Plan, que se implementará a lo largo de los próximos dos años, integra acciones transversales que tienen que anclarse en las políticas institucionales y medidas de acción positiva dirigidas a corregir situaciones patentes de desigualdad. Se trata, además, de un documento vivo que puede ser adaptado para responder idóneamente a nuevos retos y contextos futuros. Para evaluar el impacto del Plan se cuenta con un cuerpo de indicadores que permitirán verificar el nivel de consecución de los resultados previstos. El Plan, que constituye la hoja de ruta institucional en materia de igualdad, ha estado dotado de los recursos necesarios para su efectiva implementación.

Para el Grupo de Trabajo de Igualdad, el recorrido realizado hasta ahora ha sido un proceso muy enriquecedor y a la vez un reto constante. Estamos convencidas que el Plan se plantea como un revulsivo para el ICM, que indudablemente tendrá efectos positivos no solo entre las mujeres, reduciendo brechas y eliminando sesgos de género, sino también para todo el personal, con la mejora de la motivación del equipo, la retención (y captación) de capital humano calificado y un nuevo impulso de la responsabilidad social corporativa.

El Plan nos plantea, además, el nuevo reto de repensar nuestra investigación marina incorporando la dimensión de género (y la multiplicidad de interseccionalidades). Todo un estímulo que contribuirá a alcanzar una ciencia oceánica más inclusiva, diversa y transformadora, y devenir en un referente como centro de investigación marina para las nuevas generaciones.

(1) El ICM fue reconocido con un accésit del Distintivo de Igualdad del CSIC en la convocatoria 2020.

(2) LeTSGEPS, RESBIOS son proyectos financiados por el progama de la Comisión Eruopea H2020 SwafS: RESBIOS *RESponsible research and innovation grounding practices in BIOsciences, Grant Agreement* Nº872146; LeTSGEPs *Leading Towards Sustainable Gender Equality Plans in research institutions, Grant Agreement* n° 873072. También hemos participado activamente en el Swaf ACT *Promoting Communities of Practice to advance knowledge, collaborative learning and institutional change on gender equality in the European Research Area, Grant Agreement* n° 788204.

(3) https://www.icm.csic.es/sites/default/files/2021-06/GEP_ICM_2021.pdf

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14112

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.6. La nueva generación de buques oceanográficos

Jordi Sorribas, Arturo Castellón

Desde hace más de dos siglos hemos utilizado embarcaciones para la observación de los océanos, pero la concepción de los buques oceanográficos como los conocemos hoy es relativamente reciente. Contamos con una auténtica flota de buques de investigación oceanográfica altamente tecnificada, muy especializada y capaz de desplegar multitud de sensores, equipos de medida y muestreo. Aunque empleamos técnicas de observación aerotransportadas, con sofisticados sensores montados en satélites que nos proporcionan información de la «piel» de los océanos de forma sinóptica, redes de sensores submarinos capaces de monitorizar gran cantidad de parámetros y transmitir sus datos a Internet en tiempo real, vehículos y estaciones de medida autónomos e incluso sensores montados a lomos de animales marinos, los buques de investigación siguen siendo hoy en día una plataforma fundamental para el trabajo del científico marino.

Solo en Europa (European Marine Board 2020), el conjunto de veintitrés países cuenta con noventa y nueve buques oceanográficos de diferente tamaño, desde pequeñas embarcaciones de ámbito costero en grandes buques oceánicos y hasta rompehielos, todos ellos pertenecientes y gestionados por sesenta y dos instituciones diferentes. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas es una de ellas, y mediante la Unitat de Tecnologia Marina gestiona parte de la Flota Oceanográfica Española compuesta por nueve embarcaciones y que constituye uno de los nodos del Mapa Español de Infraestructuras Científico Técnicas Singulares (ICTS). Éstas son consideradas infraestructuras punteras que prestan servicios para desarrollar investigación de vanguardia y de máxima calidad, así como para la transmisión, intercambio y preservación del conocimiento, la transferencia de tecnología y el fomento de la innovación.

El buque oceanográfico

La Flota de buques oceanográficos es un elemento clave en nuestro sistema de ciencia y tecnología, gracias al cual es posible realizar en nuestro país ciencia marina de calidad y relevancia dentro del contexto internacional. Cada vez son más los grupos de investigación marina compuestos por científicos y tecnólogos procedentes de diversas instituciones y países, que emplean nuestros barcos como plataformas de estudio multidisciplinar de un medio marino que no es posible entender sin desentrañar las complejas relaciones que se establecen en él. Esta aproximación transversal al estudio del medio marino ha convertido a los buques oceanográficos en auténticas navajas suizas del sector naval. Su concepción estructural, la distribución de los espacios interiores (laboratorios, cubiertas, bodegas), los elementos físicos de apoyo al muestreo (pórticos, grúas, maquinillas, góndolas, quillas retráctiles, etc.), la propulsión silenciosa y eficiente y los sofisticados sistemas de navegación e información (posicionamiento dinámico, control remoto, máquinas desatendidas, ...) los caracterizan y distinguen de cualquier otra tipología de barco dedicada al transporte de bienes o personas.

La visión que tenemos de la construcción de un barco en un astillero donde se va armando la cáscara del barco a base de piezas de metal soldadas, es solo una parte del proceso. La concepción y construcción de un buque oceanográfico es prácticamente un «traje a medida»

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

que conlleva una interacción profunda entre los clientes finales (grupos de investigación), instituciones que los gestionarán y los astilleros que los construirán y mantendrán durante todo su ciclo de vida, que se estima en más de veinticinco años. Supone un ejercicio de prospección dispuesto de lo necesario para que los barcos puedan adaptarse bien a las demandas de nuevas técnicas de investigación que aparecerán en el futuro. Afortunadamente, y gracias al esfuerzo y visión de nuestro sector naval y el apoyo de las administraciones, los astilleros españoles están muy bien posicionados en el sector de la construcción y mantenimiento de buques oceanográficos. De los diques de nuestros astilleros han salido muchos de los buques oceanográficos de nueva construcción que en los últimos diez años se han puesto a flote en Europa (Reino Unido, Noruega, Suecia ...) y también en América del Sur (Perú, Argentina ...).

Laboratorios flotantes

Todos los buques oceanográficos actuales tienen unas características comunes, ya que los muestreos que realizan son comunes a casi todos ellos. Si bien hay algunas diferencias culturales y, por otro lado, la evolución desde barcos anteriores marca las características de los nuevos, concurren unos elementos, espacios y equipos que son imprescindibles para la investigación marina hoy en día. A partir de barcos pesqueros que se adaptaron para desplegar equipos como batitermógrafos, después CTD y redes de plancton (bongos), fueron apareciendo diferentes aparatos como los chigres, los pescantes y tangones y más tarde los pórticos abatibles. Un ejemplo de ello es el B/O García del Cid que nació en 1979 como pesquero de altura, con sus maquinillas de pesca y su palo del lanteón y que sufrió una transformación en 1989 que lo hizo multipropósito incorporando un pórtico abatible y eliminando su rampa de popa (figura 1).

También la acústica comenzó utilizándose en la pesca y finalmente se ha convertido en la tecnología marina por excelencia. Ahora, múltiples transductores pueblan la quilla del buque oceanográfico.

Los muestreos se realizan en barco parado (en estación) o en arrastre, con el barco en movimiento. Todos los buques oceanográficos actuales tienen por ello dos escenarios, uno por estribor y otro por popa y sus correspondientes pórticos y maquinillas –y cables– para dar servicio a estas maniobras. Estos elementos en cubierta también han evolucionado tecnológicamente y seguimos largando equipos mediante el uso de un cable y sus características evolucionan a su vez. La incorporación de ROV y AUV ha añadido nuevos tipos de maniobras para desplegar y recuperarlos de mar. El B/O Sarmiento de Gamboa (figura 2) fue un punto de inflexión. Se reunieron las experiencias aprendidas en los anteriores barcos.

Figura 1. B/O García del Cid.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

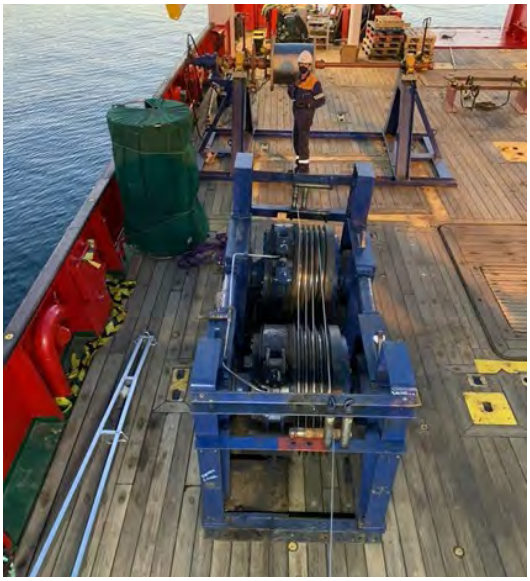


Figura 2. Estiba de cable en el B/O Sarmiento de Gamboa.

Esta cultura de la que antes hablábamos marcó un punto en el horizonte donde dirigirnos. Sabíamos lo que se necesitaba para dar servicio a todas o casi todas las disciplinas marinas. Las limitaciones solo eran económicas y por tanto el diseño era fundamental para conseguir una plataforma multipropósito eficiente. A la hora de diseñar un barco los estándares constructivos están al día. Asuntos como la motorización siguen siempre los últimos desarrollos sin arriesgar en tecnologías no contrastadas. En este punto y en el diseño de casco es donde el astillero debe ofrecer su mejor oficio. Sin embargo, en la disposición general, espacios científicos (laboratorios) y en la disposición de cubierta especialmente es donde el cliente, nosotros, debe tener una determinación y un diseño obtenido de la experiencia. Como a la hora de diseñar una vivienda, somos nosotros lo que sabemos donde queremos la cocina, el salón, etc. Sabemos para qué queremos el barco. Es en este sentido que el diseño del B/O Sarmiento de Gamboa fue en la dirección de obtener un barco flexible, que aceptara, no solo los escenarios ya conocidos, sino que pudiera adaptarse a los escenarios por venir. Hoy en día las tecnologías marinas presentan e imponen nuevos escenarios, nuevas maniobras y exigen servicios que deben ser implementados a veces a corto plazo. La distribución de aparatos en cubierta se determina también teniendo en cuenta la posibilidad de equipos móviles que se instalan y desinstalan dependiendo del tipo de muestreo (Duduyer *et al.* 2015). Este hecho hace que los períodos de movilización y desmovilización (emparejado del barco) sean más largos y costosos y, en algunos casos, se hayan de hacer ensayos y pruebas en puerto o el mar para certificar las maniobras: todas las maniobras deben registrarse y aprobarse por el personal responsable y se deben documentar sus incidencias. La tecnología marina clásica, con sus nudos, grilletes, giratorios o guardacabos tiene aquí aún su responsabilidad.

Paralelamente, los buques oceanográficos han ampliado sus posibilidades a la hora de realizar analíticas de forma que los laboratorios no tienen nada que envidiar a los existentes en tierra. Espectrofotómetros y fluorímetros, citómetros, campanas de flujo laminar, estufas, son elementos habituales y los grupos investigadores siguen aportando nuevos equipos de analítica. Cada vez hay más disciplinas incluyendo incubaciones y experimentación a bordo que a veces exigen nuevas instalaciones y servicios. Es por esta razón que el número de personas a embarcar también es un factor limitante en las campañas oceanográficas. La habitabilidad y los servicios asociados se redimensionan. Finalmente, las comunicaciones y las tecnologías informáticas han cambiado sustancialmente el desarrollo de las campañas y sus investigaciones. Datos obtenidos a bordo pueden ser enviados a laboratorios en tierra donde se procesan y donde a su vez se reenvían predicciones y mapas tanto meteorológicos como de campos de temperatura, salinidad y fluorescencia obtenidos por tecnología satelital y procesamiento de modelos. El laboratorio del barco se hace grande con esto y aparecen nuevos empleos y disciplinas asociadas.

Referencias

Duduyer S., Castellon A., Dañobeitia J.J., *et al.* 2015. Guidelines and recommendations for ship design on work deck installation and operations for scientific equipment. EUROFLEETS2-WP11-D11.2.

European Marine Board. 2020. Next Generation European Research Vessels. EMB Policy Brief N°. 7, March 2020. https://doi.org/10.5281/zenodo.3639005

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14113

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

6.7. Observando la evolución de una partícula de agua

Joaquín Salvador, Josep L. Pelegrí

Las aguas del océano fluyen continuamente, sin detenerse, con una variabilidad que tiene lugar a muy diferentes escalas espaciales y temporales. En algún momento puede parecer que su movimiento se limita a una zona de pequeña extensión pero nada más lejos de la realidad. El océano es único, global, y todas las aguas y ecosistemas están conectados. Uno de los elementos esenciales para comprender el funcionamiento de los océanos se basa precisamente en nuestra capacidad de rastrear el movimiento de las parcelas de fluido que conectan todo el mundo marino, tanto los ambientes físicos como los organismos y comunidades que en ellos habitan.

Conforme la tecnología avanza, han surgido diferentes posibilidades de observación del movimiento del fluido marino. La observación remota proporciona secuencias de imágenes de diversas propiedades superficiales del mar (por ejemplo, color, temperatura, salinidad y altura media del nivel del mar) que permiten inferir el movimiento y distribución de las masas de agua (NOAA 2021). Por otro lado, las nuevas tecnologías de comunicación (Iridium, Globalstar, Orbcomm, GPS, Glonnas, entre otros) permiten que esta información, y la que se recopila en el propio océano de muy diversas maneras, nos llegue en tiempo prácticamente real. Todo ello posibilita que los modelos predictivos del estado de los océanos nos proporcionen una visión bastante fidedigna del medio marino. Un ejemplo de ello son los servicios marinos proporcionados, en tiempo real y en formato abierto, por la Unión Europea (Copernicus 2021).

En este ensayo describiremos las técnicas de observación directa del movimiento de las parcelas de agua, lo que usualmente denominamos la visión Lagrangiana del comportamiento del fluido. Empezaremos con una breve reseña histórica sobre estas técnicas de observación para después centrarnos en la descripción de los principales programas de observación que utilizan sistemas autónomos que se desplazan con el propio fluido.

Evolución histórica de las medidas de corrientes

Las corrientes marinas siempre han sido de gran importancia para los navegantes, y para su medición se han utilizado muy diversos artilugios. Una de las primeras técnicas usadas por los marineros fue la corredera, que no es más que un cordel dividido en partes iguales, sujeto y arrollado por uno de sus extremos a un carretel y atado por el otro a la barquilla, que proporciona una medida aproximada de la velocidad de navegación. Con el barco fondeado, la corredera permite obtener la velocidad de la corriente superficial. A pesar de ser un método muy rudimentario, permitió que a finales del siglo XIX el servicio hidrográfico de los Estados Unidos hiciese una descripción bastante fidedigna del movimiento de las aguas superficiales en la corriente del Golfo.

Durante la expedición británica Challenger (diciembre de 1872 a mayo de 1876) se utilizó la llamada «draga de corrientes», que consistía en una estructura en aspa que se lastraba y se unía, mediante un cabo, a otra estructura de madera en la superficie. Esta boya superficial apenas sobresalía del agua, para evitar que el viento la desplazase, y tenía una bandera de forma que podía ubicarse más fácilmente. Este mé-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

todo para medir corrientes se utilizó recurrentemente a lo largo de muchos años, variando la superficie de la draga y colocándola a diferentes profundidades desde las capas más superficiales hasta varios centenares de metros. Se podía describir su trayectoria referenciando su posición con marcaciones en tierra, si es que se realizaba cerca de costa, o bien con referencias astronómicas, si estaban en mar abierto.

Estos métodos fueron evolucionando a lo largo del siglo xx con la aparición de nuevas tecnologías como las comunicaciones por radio que permitían establecer las posiciones de estas dragas de una forma más eficiente, sin tener que seguir a la boya. A finales del siglo pasado, con las comunicaciones satelitales y los sistemas de posicionamiento global (GPS), las boyas a la deriva experimentaron un avance fundamental.

Derivadores superficiales y flotadores profundos

Hay muy diversos tipos de diseños que buscan moverse libremente con el fluido, desde pequeños cilindros hasta grandes estructuras heterogéneas (García Ladona *et al.* 2016). Sin embargo, excepto en las unidades de pequeño tamaño que sencillamente flotan en la superficie del mar, todos los derivadores siguen teniendo una boya superficial de la que cuelga un cabo con un elemento de draga. El principio fundamental para hacer el seguimiento de la corriente no se ha modificado a lo largo del tiempo: se utiliza un elemento de draga que ofrece notable resistencia al movimiento del fluido, de modo que toda la estructura (o derivador) se desplaza con la misma velocidad que el fluido que envuelve a dicho elemento.

Desde 1988 se han establecido unos estándares de derivadores superficiales, en los que la draga cumple unos requisitos de suficiente resistencia al flujo, que permiten la comparación de las trayectorias en diferentes lugares y con distintas condiciones meteorológicas y oceanográficas (WOCE 1988) (figura 1).

Para poder transmitir su posición, todos los derivadores requieren de un elemento flotante

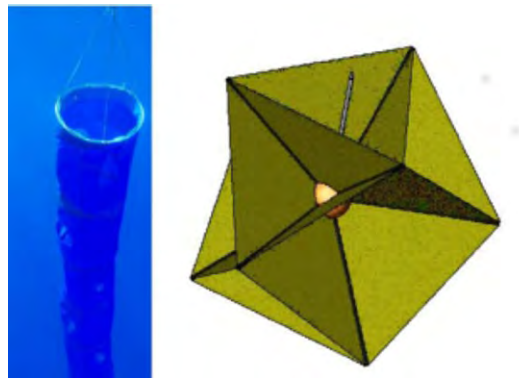


Figura 1. Anclas de capa para boyas de deriva: la foto izquierda muestra una draga en forma de calcetín, típica del programa WOCE (1988), y la derecha muestra una draga de forma esférica con prestaciones similares (Gasser *et al.* 2001).

en la superficie del mar donde se coloca el transmisor. Esto ocurre por cuanto las ondas electromagnéticas se atenúan muy rápidamente en el agua de mar –por ejemplo, una onda de radio con una frecuencia de 800 MHz no traspasaría ni siquiera un centímetro de agua.

También ha mejorado significativamente el registro de las sucesivas posiciones de la boya superficial, especialmente desde el año 2000 cuando el Gobierno de Estados Unidos finalizó las restricciones que imponía a la exactitud de los datos GPS. A esto se le suma la posibilidad de que los derivadores tengan diferentes sensores incorporados, gracias a los avances en autonomía energética, y la excelente capacidad de transmitir los datos de posición y variables observadas con la frecuencia deseada y en tiempo real a través de sistemas satelitales como Argos, Iridium y Globalstar. Todo ello permite realizar un seguimiento preciso de la trayectoria y transformaciones de las masas de agua, con precisiones espaciales de unos pocos metros y a intervalos temporales que pueden ir desde minutos hasta días.

Otro avance muy significativo en nuestro conocimiento del movimiento y evolución de las parcelas de agua se ha alcanzado con el programa internacional Argo, que arrancó con el milenio. Este programa consiste en flotadores o perfiladores que derivan a una cierta profundidad pero que tienen la capacidad de realizar movimientos verticales en el agua con una frecuencia previamente establecida

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

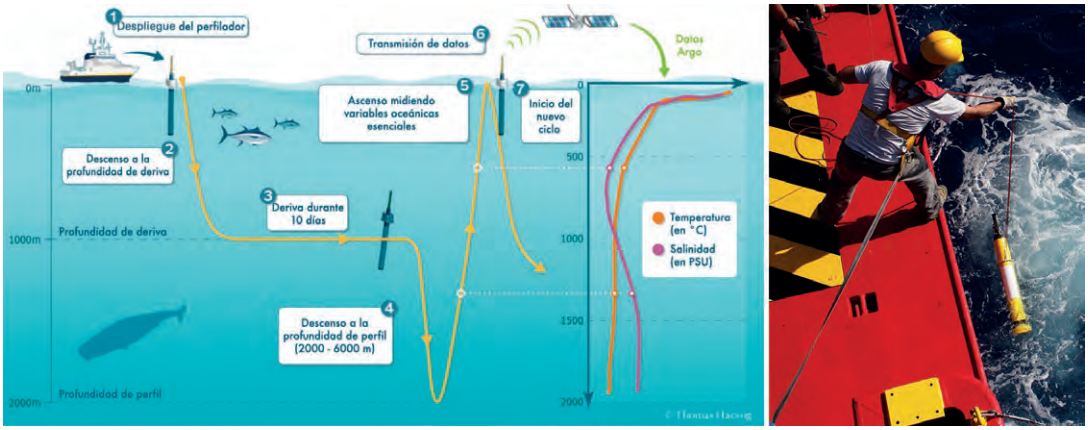


Figura 2. Ciclo característico en el agua de un perfilador del programa Argo (izquierda) (reproducido de Argo 2021). Despliegue de un perfilador Argo desde un barco oceanográfico (derecha).

(figura 2). Durante sus movimientos verticales, los sensores incorporados en el perfilador recopilan información sobre la distribución vertical de propiedades en la columna de agua (presión, temperatura y conductividad de manera estándar). Cuando los perfiladores llegan a la superficie del océano se mantienen allí el tiempo suficiente (desde minutos hasta horas) para transmitir su posición y los datos registrados durante su ciclo vertical.

El programa Argo actualmente cuenta con unos cuatro mil perfiladores derivando en todos los océanos, que proporcionan una muy valiosa información sobre las corrientes marinas y la estructura de la columna de agua.

Referencias

Argo. 2021. The Argo Program. https://argo.ucsd.edu/about/

Copernicus. 2021. Copernicus Marine Service. https://marine.copernicus.eu/

García-Ladona E., Salvador J., Fernandez P., *et al.* 2016. Thirty years of research and development of Lagrangian buoys at the Institute of Marine Sciences. Sci. Mar., 80S1: 141-158.

Gasser M., Salvador J., Sangrà P., Pelegrí J.L. 2001. Field validation of a semispherical Lagrangian drifter. Sci. Mar. 65S1: 139-143.

NOAA. 2021. How are satellites used to observe the ocean? https://oceanservice.noaa.gov/facts/satellites-ocean.html

WOCE. 1988. Surface Velocity Program, TOGA Pan-Pacific Surface Current Study, WCRP-26, WMO/TD 326.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14114

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.8. Las plataformas autónomas y sus aplicaciones en oceanografía

Pablo Rodríguez, Núria Pujol, Jordi Sorribas

Las ciencias marinas y la observación de los océanos son claves en el camino hacia un futuro sostenible. No obstante, el estudio sistemático del ámbito marino tiene fuertes condicionantes que limitan fuertemente su desarrollo: la extensión y accesibilidad de algunas áreas de estudio, la meteorología, las escalas temporales y espaciales, los elevados costes operacionales, etc.

En las dos últimas décadas se han hecho importantes esfuerzos para conseguir una visión multiescala (tanto temporal como espacial) del mar, pero es un camino que apenas ha comenzado. Es necesario incrementar el número de parámetros medidos, la frecuencia temporal y espacial de los muestreos, así como hacerlos sinópticos a lo largo de múltiples escalas. Los avances en la fabricación de sensores y la automatización paulatina de alguna de las plataformas de muestreo (boyas inteligentes, drifters, gliders, vehículos autónomos de superficie y submarinos) marcan el camino hacia este objetivo y su utilización está cada vez más extendida en el ámbito de la investigación marina (Di Caccio *et al.* 2021).

Estado actual de la tecnología

El uso de grandes plataformas (buques) está fuertemente limitado por factores económicos (costes operativos), geográficos (accesos a zonas remotas o de difícil acceso), medioambientales y temporales (solo pueden estar en un sitio a la vez, y durante un tiempo limitado). A pesar de estos inconvenientes son y seguirán siendo imprescindibles para el estudio de los océanos y en particular para el despliegue y mantenimiento de instrumentación y sensores, ya sean autónomos o no. En este sentido, se han desarrollado plataformas colaborativas (OFEG) cuyo objetivo es racionalizar su uso, en la medida de lo posible, minimizando los tránsitos innecesarios de estas grandes plataformas con el consiguiente ahorro económico y energético global.

Las plataformas con capacidad de operar de forma autónoma permiten una mayor flexibilidad y racionalización en el despliegue de sensores, permiten potenciar nuevos métodos operacionales (despliegues multiplataforma con muestreo colaborativo, muestreo adaptativo, etc.) y pueden actuar como multiplicadores de esfuerzo al desplegarse desde plataformas tradicionales. El objetivo final es obtener una mejor visión del entorno, con costes razonables y un impacto ambiental menor.

El desarrollo de este tipo de plataformas ha sufrido un avance espectacular en los últimos 20 años, actualmente existen plataformas autónomas aéreas, de superficie o submarinas con capacidades operativas muy diversas y autonomías que en algunos casos pueden ser de semanas o meses, siendo las empresas de offshore las pioneras en su utilización sistemática por el notable ahorro de costes operativos que suponían.

Estas plataformas ofrecen una amplia variedad de capacidades de trabajo (carga útil y autonomía), pueden albergar un amplio abanico de sensores en diferentes condiciones operacionales y complementarse entre sí para ofrecer una visión completa del entorno (figura 1). Este tipo de plataformas puede efectuar misiones en un huracán, o monitorizar corrientes marinas a escala global (Argos) o mantener una monitorización constante de desastres medioambientales *(Deep Horizon)* durante meses. En otros casos permanecen

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

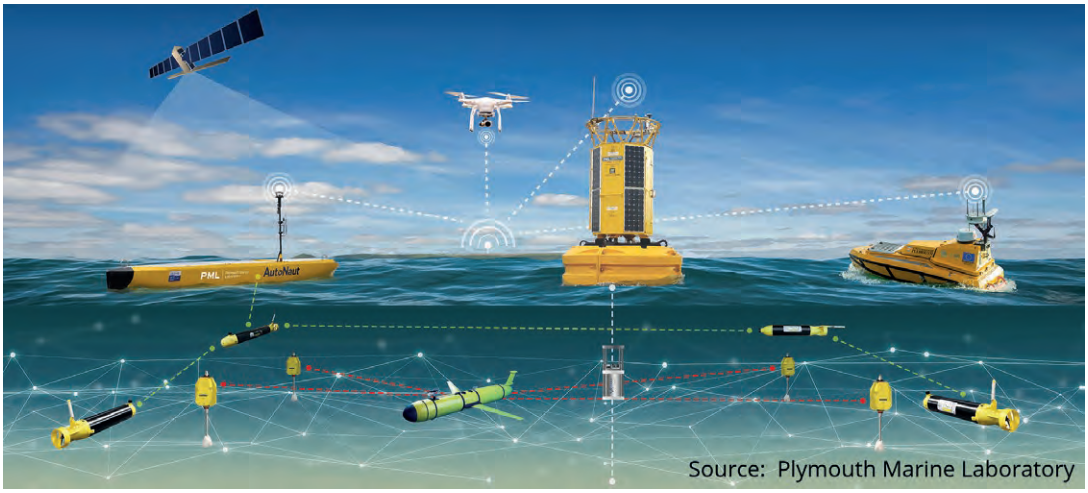


Figura1. Sistema de Observación autónomo. Plymouth Marine Laboratory.

conectadas a observatorios submarinos durante meses mientras se les modifican las misiones en función de los datos observados (OOI).

Retos del futuro

A pesar de las ventajas comentadas de las plataformas autónomas todavía queda un largo camino por recorrer. Presentamos a continuación algunos de los principales retos para estas tecnologías:

Autonomía. Uno de los principales factores limitantes de las plataformas autónomas es su autonomía; casi todas las plataformas autónomas tienen una alimentación a base de baterías, a pesar de notables avances en tamaño y potencia disponible, la densidad de energía de las baterías todavía tiene mucho margen de mejora. La utilización de fuentes de energía naturales (olas, radiación solar, viento, etc.) para la propulsión de estas plataformas es una alternativa imprescindible para lograr misiones de larga duración.

Miniaturización de sensores. Se han logrado notables avances en la miniaturización e integración de sensores para medir parámetros físico-químicos, ópticos o acústicos, algunos sensores están sólidamente establecidos (temperatura, conductividad, pH u oxígeno, entre otros), no obstante, todavía es necesario avanzar más en la consecución de una miniaturización real de algunos de estos sensores para lograr una monitorización integral y multi-escala del medio marino.

Transmisión de datos. La transmisión de datos tiene dos factores limitantes importantes (y relacionados entre sí), el ancho de banda del canal utilizado y el consumo energético. En vehículos autónomos es importante controlar el gasto energético de cada elemento, por lo tanto, las transmisiones de datos tienen que ser lo más eficientes posible. Además, la latencia de transmisión puede ser también un factor crítico en algunos ámbitos relacionados como los relacionados con la monitorización ambiental y prevención de desastres naturales.

Inteligencia artificial (IA). La incorporación de nuevos procesos de IA plantea retos y oportunidades excepcionales, la posibilidad de tener plataformas de gran autonomía capaces de adaptar sus misiones en función del entorno o de los requerimientos de la misión abren nuevas posibilidades, por ejemplo, en la monitorización de espacios protegidos o el estudio de fenómenos extraordinariamente dinámicos.

Las plataformas autónomas tienen un amplio margen de desarrollo en el ámbito marino, como lo demuestra la apuesta decidida de prestigiosas instituciones de investigación marina por estas tecnologías (Lindstrom *et al.* 2020). Estos avances supondrán, a medio y largo plazo, un cambio de estrategias en la investigación en el medio marino, incorporando nuevas tecnologías y metodologías que permitirán aumentar la re-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 2. AUV modelo Girona500 en las instalaciones de la Unitat de Tecnologia Marina de Barcelona.

solución de los estudios a pequeña escala y mejorar la coordinación de plataformas en estudios a gran escala (Whitt *et al.* 2020).

La Unitat de Tecnologia Marina hace tiempo que empezó a dar algunos pasos en este camino, actualmente dispone de dos AUV costeros y uno de baja profundidad (figura 2), pero creemos que es un campo que en un futuro próximo experimentará un notable desarrollo a nivel nacional, con múltiples aplicaciones en el ámbito del CSIC.

Referencias

Di Caccio F *et al.* 2021. Monitoring marine environments with autonous Underwater Vehicles: A bibliometric analysis. Results in Engineering 9: 100205.

Lindstrom E. 2020. Notes from the Field - The Autonomous Platform Revolution. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/fromthefield/2017/11/08/the-autonomous-platform-revolution/

Whitt C., *et al.* 2020. Future Vision for Autonomous Ocean Observations. Front. Mar. Sci. 7: 697.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14115

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

6.9. Gestión de datos de campañas oceanográficas para una información accesible

Susana Diez, Jordi Sorribas

Durante las campañas de investigación en buques oceanográficos se adquieren una gran cantidad de datos de diferente naturaleza, que cubren todos los ámbitos de estudio y que caracterizan y nos dan información tanto de la superficie del mar como de la columna de agua, del fondo y del subfondo marino. Estos datos son muy valiosos, no solo porque son la fuente de las investigaciones oceanográficas, sino por la dificultad y el elevado coste de adquisición debido a la complejidad que representa trabajar en el medio marino. La accesibilidad de esta información y estos datos es por tanto fundamental y de ahí la importancia de que sean accesibles y reutilizables.

Infraestructura para la gestión de datos

La gestión de los datos de campañas oceanográficas requiere de una infraestructura perdurable en el tiempo (y por lo tanto no dependiente de proyectos de investigación) sustentada por un trabajo constante de personal técnico. El objetivo final de esta infraestructura es dar acceso a la información relativa a los datos adquiridos en campañas realizadas en buques oceanográficos y a la máxima cantidad posible de datos de forma abierta e interoperable, siguiendo los principios FAIR (Findable, Accesible, Interoperable y Reusable) (Wilkinson *et al.* 2016, Galiana *et al.* 2022).

Un elemento básico de una infraestructura de datos de campañas oceanográficas es el uso de metadatos para describir en detalle la naturaleza de los datos y dar información sobre su adquisición: quién los ha adquirido, cómo, dónde, cuándo, quién los custodia, etc. Los metadatos facilitan la indexación y búsqueda de conjuntos de datos a través de Catálogos (figura 1), com-

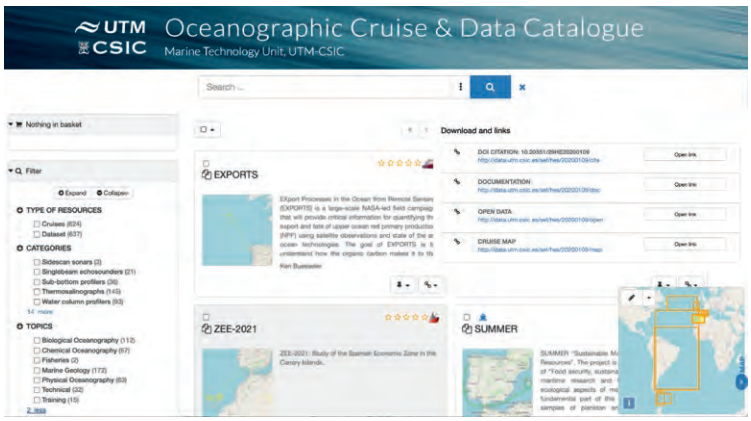


Figura 1. Catálogo de campañas y datos oceanográficos del Centro de Datos de la Unitat de Tecnologia Marina, http://data.utm.csic.es

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 2. Geoportal del Centro de Datos de la UTM, http://data.utm.csic.es/geoportal

ponente fundamental de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). Los Cruise Summary Report (CSR) y los Common Data Index (CDI) son los ficheros de metadatos de las campañas y de los datos adquiridos, respectivamente, que siguen los estándares de la infraestructura europea de datos marinos SeaDataNet (Pecci *et al.* 2020) y cumplen INSPIRE.

Otro elemento clave que permite descubrir, visualizar y acceder a datos y servicios espaciales [como Web Map Service (WMS), Web Feature Service (WFS) y Web Coverage Service (WCS)] es el Geoportal (figura 2), portal web que utiliza la navegación a través de un mapa. Los usuarios pueden agregar sus propios datos y crear sus propios mapas. La consulta y los resultados de la búsqueda idealmente están vinculados al catálogo de metadatos.

El desarrollo de herramientas y aplicaciones de visualización, de control de calidad y de transformación de datos a formatos estándar es igualmente importante, de manera que se dispongan de datos interoperables.

La custodia de todos los datos y el acceso en caso de datos abiertos se realiza mediante repositorios de datos. Los datos de campañas oceanográficas adquiridos en el marco de proyectos financiados con el Plan Estatal de Investigación son de carácter restringido mediante un periodo de embargo, por parte del investigador principal, de dos años tras la finalización del proyecto al que está asociada la campaña (Resolución Convocatoria «Proyectos I+D+i» 2020). Tras este periodo, los datos pasan a ser de carácter abierto y son accesibles a través de las infraestructuras de datos como la del Centro de Datos de la de Unitat de Tecnologia Marina (UTM).

Para ofrecer una manera eficiente de facilitar la citación del conjunto de datos de una campaña oceanográfica, la forma más extendida que se está imponiendo en este campo es el empleo del sistema *Digital Object Identifier* (DOI) (International DOI Foundation): un identificador y una URL permanente, que permite localizar un recurso sin que cambie esta dirección con el paso del tiempo aunque éste sea reubicado en una aplicación o dominio distinto. La UTM genera DOIs para los conjuntos de datos de cada campaña oceanográfica a través de la membresía del CSIC en DataCite, una de las principales agencias de registro.

Con el fin de diseminar también a nivel internacional los metadatos y datos de campañas oceanográficas la colaboración y participación en diferentes infraestructuras es necesaria.

SeaDataNet es una infraestructura paneuropea distribuida y estandarizada para administrar los conjuntos de datos recopilados por las flotas oceanográficas y los sistemas de observación automática. SeaDataNet conecta centros de datos

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

–como el de la UTM– de más de treinta países, con el objetivo de preservar y poder reutilizar datos marinos de diferentes ámbitos.

Retos en la gestión de datos de campañas oceanográficas

Los retos en la gestión de los datos de buques oceanográficos pasan en primer lugar por la incorporación progresiva de todos los datos históricos, que implica un esfuerzo importante de armonización, control de calidad y generación o revisión de metadatos. En segundo lugar, la aportación constante de nuevos datos y metadatos derivados de la realización de nuevas campañas oceanográficas es primordial. Y un tercer reto, marcado por la normativa europea sobre datos abiertos y reutilización de la información del sector público (Directiva (UE) 2019/1024), es dar acceso a la máxima cantidad posible de datos, ya sean datos no restringidos o datos o productos derivados que la comunidad científica de forma voluntaria decida publicar en abierto.

Para la consecución de estos retos es necesario aunar esfuerzos con organismos afines para que, de este modo, la gestión de datos se constituya como un recurso esencial para la oceanografía española, europea e internacional con el fin de disponer de una información accesible y útil para conocer los océanos.

Referencias

Directiva (UE) 2019/1024 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público (versión refundida), https://www.boe.es/doue/2019/172/L00056-00079.pdf

Galiana S., Quirós L., Berdalet E., *et al.* 2022. De la libreta a la nube de datos: 70 años de ciencia marina. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 186-189.

International DOI Foundation. The DOI Handbook. doi:10.1000/186. Available at: http://www.doi.org/hb.html

Pecci L., Fichaut M., Schaap D. 2020. SeaDataNet, an enhanced ocean data infrastructure giving services to scientists and society. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 509.

Resolución de 11 de noviembre de 2020. Convocatoria «Proyectos I+D+i» 2020 en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020. https://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ayudas/PE_2017_2020/PE_Orientada_Retos_Sociedad/FICHEROS/Proyectos_IDI_Retos_Investigacion/ConvocatoriaPID2020_Resolucion20201111.pdf

Wilkinson M., Dumontier M., Aalbersberg I. *et al.* 2016. he FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3: 160018.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14116

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.10. Auscultando el fondo oceánico con cables submarinos de telecomunicaciones

Arantza Ugalde

El estudio de los terremotos es clave para buscar respuestas a cuestiones fundamentales sobre la dinámica y propiedades físicas del interior de la Tierra. Aunque los sismos pueden ocurrir en cualquier momento y lugar del planeta, las observaciones nos han mostrado que la mayor parte de la energía que liberan está localizada en los límites entre las placas tectónicas. Y, en su mayor parte, estos cinturones sísmicos están situados bajo el fondo oceánico que cubre el 70% de la superficie terrestre. Sin embargo, las redes sismológicas que detectan los terremotos están ubicadas principalmente en tierra, lo que dificulta que se pueda obtener, a partir de sus registros, una imagen completa del interior del planeta. La investigación geofísica marina se lleva a cabo con grandes barcos de investigación encargados de desplegar sismómetros de fondo oceánico temporales que, junto con un número limitado de observatorios submarinos permanentes, han permitido realizar descubrimientos significativos bajo el océano. Sin embargo, este tipo de instrumentación es difícil y caro de instalar y mantener, por lo que aún estamos muy lejos de disponer de redes sísmicas submarinas comparables en número, densidad y características a las existentes en tierra.

Los cables de telecomunicaciones como sensores

Las profundidades marinas albergan una extensa red de comunicaciones que conecta países y continentes a través de cables submarinos de más de un millón de kilómetros de longitud, y no paran de aumentar (figura 1). Los cables constan de un núcleo de fibras ópticas que transmiten las señales de luz y está recubierto de una serie de capas que lo impermeabilizan y protegen en función de las condiciones ambientales. Recientemente, ha aparecido una nueva tecnología denominada Sensado Acústico Distribuido (DAS, del inglés *Distributed Acoustic Sensing*) que convierte cada cable en decenas de miles de sensores sísmicos (Zhan 2020). Para ello, solo es necesario conectar un interrogador en el extremo de una única fibra oscura y emitir pulsos de luz a través de ella mediante un láser.

Las fibras ópticas contienen impurezas como resultado del proceso de enfriamiento del vidrio durante su fabricación. Al transmitir un haz de luz a través de una fibra, estas imperfecciones provocan la dispersión de pequeñas fracciones de luz que se reflejan de vuelta hacia el interrogador. Éste las detecta e identifica como puntos de referencia. Cuando la fibra se deforma como resultado de la llegada de las ondas sísmicas, los puntos de referencia también cambian su posición (alrededor de un nanómetro por cada metro de cable), modificando así el tiempo de llegada de la luz retrodispersada al interrogador. De esta manera, es posible medir las deformaciones relativas a lo largo de muchos kilómetros de cable de fibra óptica de forma muy precisa.

Una revolución submarina

La tecnología DAS tiene un enorme potencial para la monitorización de regiones submarinas remotas o inaccesibles. Respecto a las redes sísmicas submarinas convencionales, presenta la ventaja de proporcionar medidas con una resolución espacial sin precedentes (del orden de unos pocos metros a lo largo de varias de-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

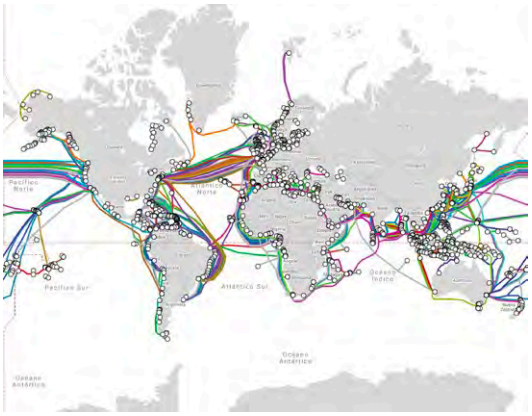


Figura 1. Mapa de los principales sistemas de cables submarinos de telecomunicaciones y estaciones terrestres (círculos blancos). Fuente: TeleGeography (https://www.submarinecablemap.com/, fecha de consulta: 02/06/2021).

cenas de kilómetros). Se trata, además, de una tecnología de sensado remoto y, por tanto, no intrusiva. Asimismo, al utilizar infraestructuras de telecomunicaciones ya existentes, es muy económica.

En 2019, seis años después de las primeras descripciones sobre el uso potencial de DAS en la monitorización sísmica, se detectó por primera vez con esta tecnología un terremoto de magnitud 8.2 ocurrido en las islas Fiyi, a más de 16.000 km de distancia del cable submarino, situado frente a la costa de Bélgica (Williams *et al.* 2019). Ese mismo año, se consiguió observar un pequeño terremoto de magnitud 1,9 a 100 km de distancia de otro cable, ubicado en el sureste de Francia (Sladen *et al.* 2019). Desde entonces, las observaciones sísmicas mediante cables submarinos no han parado de incrementarse (figura 2).

Además de terremotos, las observaciones con DAS en cables submarinos están mostrando una variada colección de señales: desde barcos y grandes mamíferos marinos hasta mareas y corrientes marinas, abriendo así esta tecnología a todo un océano de posibilidades.

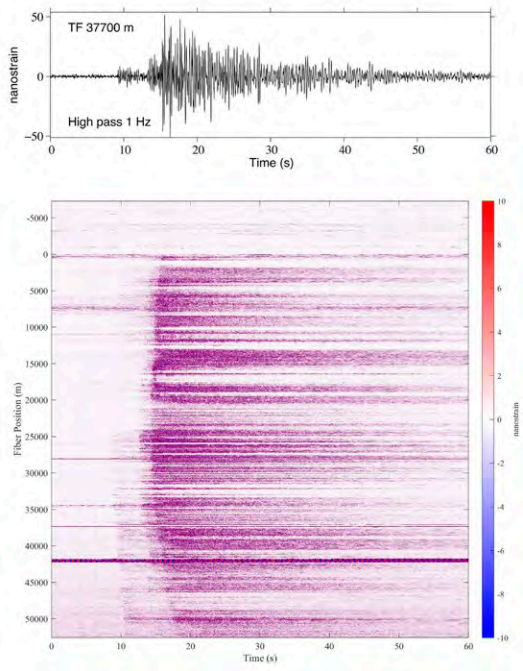


Figura 2. Un minuto de registro con DAS del terremoto de magnitud 3,1 ocurrido el 27 de julio de 2020 en las Islas Canarias. Arriba: observaciones en la posición 37,7 km del cable. Abajo: observaciones a lo largo de los 60 km de fibra óptica. La posición 0 de la fibra marca la entrada del cable en el océano. Fuente: Ugalde *et al.* (2021).

Referencias

Sladen A., Rivet D., Ampuero J.P., *et al.* 2019. Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables. Nat. Comm. 10: 1-8.

Ugalde A., Becerril C., Villaseñor A., *et al.* 2021. Noise and signals observed using DAS on submarine fibers in the Canary Islands. Seismol. Res. Lett. (in press).

Williams E.F., Fernández-Ruiz M.R., Magalhaes R., *et al.* 2019. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers. Nat. Commun. 10: 1-11.

Zhan Z. 2020. Distributed acoustic sensing turns fiber-optic cables into sensitive seismic antennas. Seismol. Res. Lett. 91: 1-15.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14117

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.11. Herramientas de prevención y post-picaduras de medusas basadas en estrategias de I+D+i

Ainara Ballesteros, Macarena Marambio, Josep-Maria Gili

Los cnidarios, grupo animal al que pertenecen las medusas, poseen células urticantes distintivas denominadas cnidocitos. Estas células se distribuyen por toda la epidermis siendo más abundantes en los tentáculos. Sus funciones están relacionadas principalmente con la captura de presas y la defensa contra depredadores, pero también les permiten la fijación al sustrato o la locomoción. Dentro del cnidocito se encuentra el nematocisto, reconocido como la cápsula, que ocupa la mayoría de la célula, donde se almacena el veneno junto con un túbulo enrollado, en ocasiones, espinado (figura 1). Ante un estímulo químico y/o mecánico detectado por el cnidocilo, se abre el opérculo, iniciándose el proceso de descarga del veneno documentado como uno de los procesos de exocitosis más rápidos del reino animal (figura 2).

Los cnidocitos están presentes durante todo el ciclo de vida de las medusas, desde las pequeñas plánulas hasta los individuos adultos. Los cnidocitos se diferencian entre ellos por su morfología, características del túbulo o patrón de espinas. Mientras algunos tipos son muy comunes entre especies, otros son característicos de algunos grupos de cnidarios.

Aunque en el mar Mediterráneo no habiten especies de medusas con un veneno letal, su presencia masiva y continuada en las costas genera un impacto socio-económico y ambiental negativo. Las picaduras de las especies de medusas más comunes en el mar Mediterráneo, como

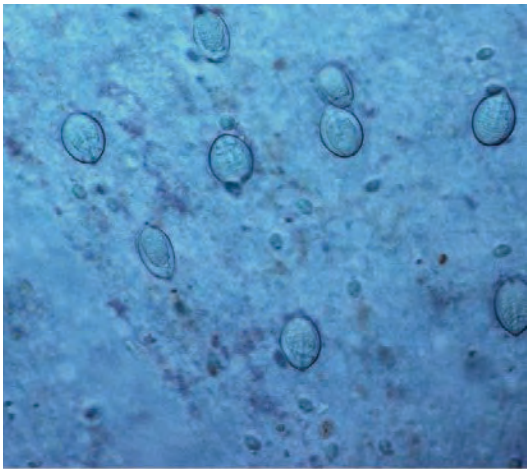


Figura 1. Nematocistos identificados en la medusa *Pelagia noctiluca* considerada la más importante del mar Mediterráneo. Nótese el túbulo enrollado en el interior de la cápsula junto al veneno.

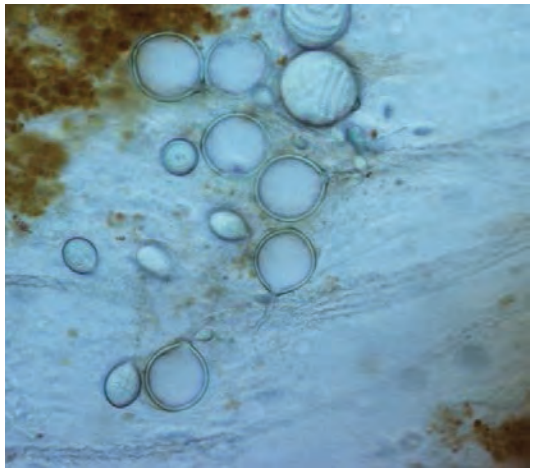


Figura 2. Nematocistos de *Pelagia noctiluca* descargados tras su activación. Nótese en los nematocistos descargados cómo la cápsula está vacía debido a la expulsión del túbulo, que sirve como conducto para la inoculación del veneno.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Pelagia noctiluca o *Rhizostoma pulmo,* generan reacciones locales como quemazón, edema, hinchazón y/o dermatitis, mientras que los síntomas sistémicos son muy poco frecuentes. Sin embargo, la presencia ocasional de *Physalia physalis,* puede desencadenar un cuadro clínico más grave debido a su alta toxicidad. Aún así, durante la época de baño, las picaduras de medusas representan el mayor número de asistencias totales atendidas por los servicios de salvamento en playas en España.

Protocolos de primeros auxilios contra picaduras de medusas

La presencia de medusas es cada vez más frecuente en muchas zonas del Mediterráneo. Al mismo tiempo, se han incrementado las incidencias en playas, causando especial atención de la comunidad científica, Administración pública y la sociedad para buscar soluciones que minimicen el problema y eviten una alarma social. A nivel científico, se han iniciado proyectos de investigación conjuntos entre biólogas marinas, oceanógrafas y sanitarias, proporcionando a la sociedad herramientas de mitigación como la implementación de medidas preventivas a nivel de playa y protocolos de primeros auxilios (Marambio *et al.* 2021).

Tras el contacto accidental con las medusas, puede producirse la adhesión en la piel de tejidos o cnidocitos residuales. Es por ello que los protocolos de primeros auxilios se centran esencialmente en la aplicación de soluciones enjuague eficaces para eliminar los restos de forma segura sin ocasionar un segundo envenenamiento. Este paso, dentro de los protocolos de primeros auxilios, está consensuado por la comunidad científica, sin embargo, no existe acuerdo acerca de qué substancia es la ideal para lavar el área de picadura. Mientras algunos investigadores apuntan al uso del vinagre de forma universal (Doyle *et al.* 2017), otros grupos de investigación demuestran la activación de los cnidocitos de algunas especies tras su aplicación alertando de su ineficiencia (Ballesteros *et al.* 2021). Incluso, revisiones sistemáticas recomiendan la re-evaluación de las substancias comúnmente utilizadas para la realización de protocolos especie-específico en el caso de que sean necesarios y alientan a buscar nuevos compuestos que sí puedan ser utilizados de forma universal.

Sinergia entre centros de investigación públicos y empresas privadas

Muchas de las propuestas para solventar el impacto de las picaduras de medusas carecen de un conocimiento riguroso, tanto de la biología de las especies como de sus características anatómicas y fisiológicas. La línea de investigación con medusas que lleva más de veinte años en el Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) ha permitido tener unos conocimientos sólidos y pluridisciplinarios sobre las diferentes especies de medusas y sus cnidocitos, impulsando una estrategia de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Este hecho ha sido el motivo más importante para que las empresas de la industria farmacéutica y cosmética valoren positivamente la posibilidad de poder desarrollar proyectos de carácter industrial con el ICM-CSIC. Recientemente, Proyectos de Doctorado Industrial han facilitado la colaboración entre empresas y centros de investigación, con el propósito de la búsqueda de nuevas herramientas preventivas y post-picaduras que permitan mitigar los efectos de las picaduras de medusas en los usuarios de las playas. La experiencia de estos últimos años nos ha demostrado que la investigación básica sobre la biología, fisiología y ecología de las especies son un valor fundamental para demostrar al tejido empresarial el potencial de realizar proyectos de carácter aplicado e industrial.

Referencias

Ballesteros A., Marambio M., Fuentes V., *et al.* 2021. Differing Effects of Vinegar on *Pelagia noctiluca* (Cnidaria: Scyphozoa) and *Carybdea marsupialis* (Cnidaria: Cubozoa) Stings-Implications for First Aid Protocols. Toxins 13: 509.

Doyle T.K., Headlam J.L., Wilcox C.L., MacLoughlin E., Yanagihara A.A., *et al.* 2017. Evaluation of *Cyanea capillata* sting management protocols using ex vivo and in vitro envenomation models. Toxins 9: 215.

Marambio M., Ballesteros A., López-Castillo L., Fuentes V., Gili J.M. 2021. Guía de identificación de medusas y otros organismos gelatinosos. Span. Natl. Res. Counc., 44 pp.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14118

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

6.12. El surgimiento de la *iEcology* y la culturómica de la conservación para el desarrollo sostenible de los océanos

Valerio Sbragaglia, Lucía Espasandín Soneira, Jeroen Steenbeek, Karen Soacha Godoy, Jaume Piera, Marta Coll

Los océanos son esenciales para la vida en la Tierra, pero están seriamente amenazados por los efectos acumulativos de las presiones antropogénicas, incluida la pérdida de hábitat, el cambio climático, las especies exóticas invasoras, la contaminación y la extracción de recursos no sostenible (IPBES 2019). La crisis de la biodiversidad marina actual no tiene precedentes y puede tener efectos profundos en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano.

A pesar de los esfuerzos recientes, muchos aspectos de dicha crisis siguen sin resolverse por diversas razones, entre ellas: (1) la falta de recursos para recopilar la información ecológica y socioeconómica necesaria; (2) el limitado seguimiento de las actividades a través del tiempo y el espacio, y (3) que muchos impactos ocurren generalmente más rápido que nuestra capacidad de monitorearlos y gestionarlos. Además, explorar la dimensión humana de la crisis de la biodiversidad es un desafío especial porque las ciencias sociales aún no están lo suficientemente integradas en la investigación marina. Como resultado, con frecuencia carecemos de la información necesaria para orientar a los tomadores de decisiones a escalas relevantes. Es urgente superar estas deficiencias de monitoreo y vacíos de conocimiento aprovechando las ventajas de métodos de investigación y fuentes de datos eficientes.

Un nuevo enfoque de investigación

Durante la última década, Internet y las redes sociales en particular, se han convertido en importantes repositorios de la cultura humana, el conocimiento y las interacciones sociales. Esta información se encuentra en múltiples formatos digitales y tiene un volumen sin precedentes; lo cual ha permitido la aparición de dos nuevos enfoques de investigación: *iEcology* (Jarić et al 2020a.) y la culturómica de la conservación (Ladle *et al.* 2016). Aunque ambos enfoques de investigación realizan análisis cuantitativos de grandes volúmenes de datos digitales, *iEcology* tiene como objetivo caracterizar patrones y procesos ecológicos (por ejemplo, presencia de especies, cambios en el rango de distribución; Jarić *et al.* 2020a) a partir de datos digitales que se generaron para otros fines, mientras que la culturómica de la conservación tiene como objetivo caracterizar y comprender los problemas contemporáneos de la conservación desde la perspectiva de las interacciones entre el hombre y la naturaleza (p. ej., actitudes de las partes interesadas, comportamiento humano en el contexto de la explotación de recursos; Ladle *et al.* 2016). La expansión de la *iEcology* y la culturómica de la conservación desde el ámbito terrestre al acuático se espera que tenga un papel importante informando y analizando acciones de conservación, como la gestión de áreas protegidas, la pesca sostenible, las invasiones biológicas, la evaluación del estado del ecosistema y de los impactos antropogénicos y sociales (figura 1; Jarić *et al.* 2020b).

Integración de *iEcology* y culturómica de conservación con ciencia ciudadana

Uno de los aspectos más interesantes y desafiantes de la *iEcology* y la culturómica de

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

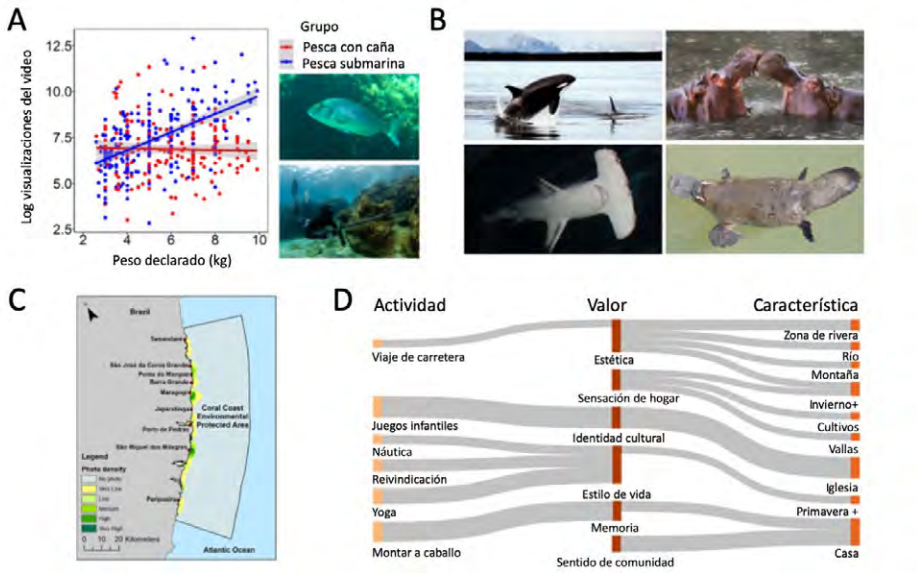


Figura 1. Ejemplos de estudios de ecología y culturómica acuática según Jarić *et al.* (2020b). A, participación social de los pescadores deportivos marinos y pescadores submarinos que se dirigen al dentón común *(Dentex dentex)*, una especie emblemática de las pesquerías mediterráneas, basado en videos publicados en YouTube; foto superior: dentón común, foto inferior: pescador submarino. B, posibles especies acuáticas emblemáticas identificadas en función de su popularidad (frecuencia relativa de búsqueda en Internet). Se presentan especies marinas (orca, *Orcinus orca* y gran tiburón martillo, *Sphyrna mokarran*) y de agua dulce (hipopótamo, *Hippopotamus amphibius* y ornitorrinco, *Ornithorhynchus anatinus*). C, mapeo de puntos críticos de servicios de ecosistemas culturales en un área marina protegida, basado en fotografías de redes sociales. D, mapa conceptual de percepción del paisaje, basado en relaciones estadísticas entre actividades, valores y características codificadas a partir de imágenes y leyendas del paisaje en Instagram, del área de cabecera propuesta de la ahora aprobada Sitio C de la presa, Peace River, Columbia Británica, Canadá. Ver Jarić *et al.* (2020b) para los estudios originales presentados en esta figura. Fuente: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000935.g001.

conservación para el desarrollo sostenible de los océanos es la integración con los observatorios participativos (plataformas de ciencia ciudadana) de última generación (figura 2). Hay dos aspectos principales que hacen que dicha integración sea urgente. Primero, la ciencia ciudadana puede proporcionar conocimientos complementarios que pueden ayudar a avanzar en la comprensión de los procesos y patrones de la biodiversidad marina (Soacha Godoy *et al.* 2022). En segundo lugar, el volumen de datos digitales creciente y sin precedentes tiene un gran potencial científico, especialmente cuando se analiza con la ayuda del aprendizaje automático *(machine learning)* para filtrar e interpretar los contenidos digitales tales como texto, imágenes y vídeos (Toivonen *et al.* 2019).

Un paso fundamental para que el aprendizaje automático funcione correctamente es producir bibliotecas de aprendizaje con supervisión humana. Esta tarea puede ser un desafío, especialmente en el contexto de grandes volúmenes de datos *(big data)* provenientes de diferentes países. En este contexto, la estandarización, la interoperabilidad y el trabajo colaborativo con observatorios participativos pueden ser una solución eficaz para impulsar los procesos de validación. Los servicios tecnológicos que contribuyen a incrementar la disponibilidad de datos de ciencia ciudadana bajo los principios FAIR: encontrable, accesible, interoperable y reutilizable (por sus siglas en inglés *Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability*) (Galiana *et al.* 2022) forman parte de la estrategia que impulsa la nube europea de ciencia abierta (https://eosc-portal.eu/). Generar datos FAIR también se basa en un compromiso y reconocimiento adecuados de la comunidad de personas voluntarias y expertas que crean y validan los datos. Por ejemplo, la identificación de especies es una de las áreas donde se pueden aplicar estos enfoques. El trabajo colaborativo de un gran número de personas voluntarias puede resultar en

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

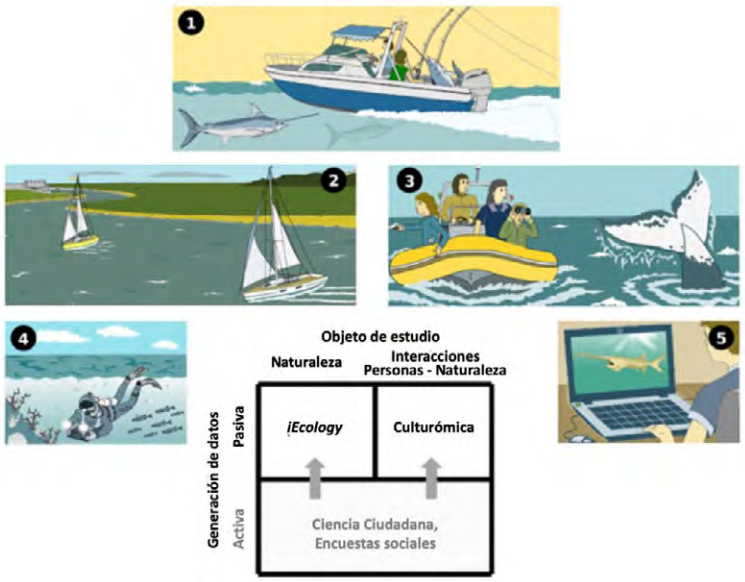


Figura 2. Un diagrama conceptual con diferencias clave entre la culturómica, la ecología y otros enfoques relacionados, como la ciencia ciudadana y el análisis de encuestas sociales, según Jarić *et al.* (2020b). Las diferencias se basan en el objeto de estudio (interacciones humano-naturaleza o la naturaleza misma) y el tipo de generación de datos (pasiva o activa). Los conjuntos de datos generados por la ciencia ciudadana, las encuestas sociales y otros enfoques también pueden representar fuentes de datos para *iEcology* y la culturómica, como lo indican las flechas. Los dibujos ilustran algunas aplicaciones de la culturómica y la ecología para la investigación acuática: 1) ordenación pesquera; 2) evaluación de impacto social; 3) detección, cartografía y seguimiento de especies exóticas, raras y amenazadas; 4) estado del ecosistema e impactos antropogénicos; y 5) identificación de especies acuáticas emblemáticas y sombrilla. Fuente: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000935.s001

clasificaciones precisas y por lo tanto contribuir al desarrollo de las bibliotecas de aprendizaje que permitan poner en funcionamiento algoritmos de aprendizaje automático en el contexto de *iEcology* y culturómica de la conservación. Adicionalmente, como no existen estándares definidos para la moderación y el control de calidad del contenido de Internet, el uso de repositorios de datos abiertos revisados por pares, la consulta con las partes interesadas, la ciencia ciudadana y los algoritmos de aprendizaje automático son enfoques complementarios al contenido «revisado por pares» disponible en línea. Esto incluye validar, interpretar, cuantificar y verificar los hechos y corregir los sesgos de las publicaciones de los medios, con el fin de convertir los datos sin procesar de Internet en información cuantificada útil para la ciencia.

La culturómica de la conservación y la *iEcology* se espera que experimenten un desarrollo significativo en la próxima década y a la vez que tengan un papel clave en la orientación sobre el desarrollo sostenible de los océanos. La integración funcional con observatorios participativos de ciencia ciudadana puede impulsar y reforzar dicho proceso.

Referencias

Galiana S., Quirós L., Berdalet E., *et al.* 2022. De la libreta a la nube de datos: 70 años de ciencia marina. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 186-189.

IPBES. 2019. Summary for policy-makers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES Secretariat, Bonn.

Jarić I., Correia R.A., Brook B.W., *et al.* 2020a. iEcology: Harnessing large online resources to generate ecological insights. Trends Ecol. Evol. 35: 630-639.

Jarić I., Roll U., Arlinghaus R., *et al.* 2020b. Expanding conservation culturomics and iEcology from terrestrial to aquatic realms. PLoS Biology 18: e3000935.

Ladle R.J., Correia R.A., Do Y., *et al.* 2016. Conservation culturomics. Frontiers Ecol. Environ. 14: 269-275.

Soacha Godoy K., Piera J. Liñán S., *et al.* 2022. Contribución de la ciencia ciudadana y los sistemas de monitoreo participativo al conocimiento y la conservación de los océanos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 217-219.

Toivonen T., Heikinheimo V., Fink C., *et al.* 2019. Social media data for conservation science: A methodological overview. Biol. Conserv. 233: 298-315.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14119

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

6.13. Contribución de la ciencia ciudadana y los sistemas de monitoreo participativo al conocimiento y la conservación de los océanos

Karen Soacha Godoy, Jaume Piera , Sonia Liñán , Carlos Rodero , Xavier Salvador , Raúl Bardají, Valerio Sbragaglia

El océano dicta nuestro clima, representa una gran parte de nuestro suministro de alimentos, juega un papel esencial en la economía global y sustenta una gran diversidad de vida y ecosistemas. Sin embargo, nuestro conocimiento sobre este ecosistema es limitado; se estima que se ha explorado menos del 5% y, como resultado, podría haber alrededor de 1 millón de especies desconocidas para la ciencia (Ocean Literacy Network 2020). Existe una necesidad urgente de aumentar nuestro conocimiento de los océanos a un ritmo más rápido. La ciencia ciudadana y los sistemas de monitoreo participativo son parte de las estrategias claves para reducir estas brechas de conocimiento.

La ciencia ciudadana es una práctica colaborativa de producción de nuevos conocimientos para la ciencia y la sociedad (Vohland *et al.* 2021). Aunque la ciencia ciudadana se encuentra en expansión gracias a las TICs, no es una práctica nueva. Históricamente, comunidades dedicadas a la pesca y la navegación han contribuido con su observación y conocimiento al estudio de la vida marina y la comprensión del océano. En la actualidad, la colaboración entre personas científicas y voluntarias para producir conocimiento sobre el océano, incluidas las playas costeras y los estuarios, se conoce como ciencia ciudadana marina (MCS por sus siglas en inglés).

Ciencia ciudadana marina: contexto y contribución

Durante décadas, miles de personas voluntarias han participado en una amplia gama de investigaciones marinas, contribuyendo especialmente con la recopilación de datos, resultado de la observación de la vida marina, el monitoreo de especies invasoras, el seguimiento de variables ambientales como la turbidez del agua y los sedimentos y la recolección de desechos marinos. Se estima que actualmente se desarrollan cerca de quinientos proyectos de ciencia ciudadana marina en Europa, con un crecimiento exponencial desde 1990. Una tendencia que se refleja a nivel mundial. En la mayoría de estos proyectos, la participación se da en la etapa de recopilación de datos (García-Soto *et al.* 2021). Los enfoques más colaborativos en los que se abre la investigación a la participación pública en más etapas son menos comunes, pero extremadamente necesarios para generar un cambio transformador tanto en la forma de construir conocimiento como en su capacidad de impactar los socio-ecosistemas.

Los proyectos de MCS se centran en los entornos oceánicos costeros, seguidos de cerca por las regiones costeras de fácil acceso y pueden durar desde pocos días hasta décadas. Los métodos más populares para recopilar datos son las encuestas de campo y el reporte de observaciones oportunistas. También se desarrollan métodos novedosos, como el reporte por parte de buzos de las temperaturas del océano registradas en sus computadoras de buceo y la instalación de sensores en tablas de surf que permiten recopilar parámetros del océano en tiempo real (Earp *et al.* 2020). De la misma manera, la innovación tecnológica ha permitido ampliar el espectro de participación,

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

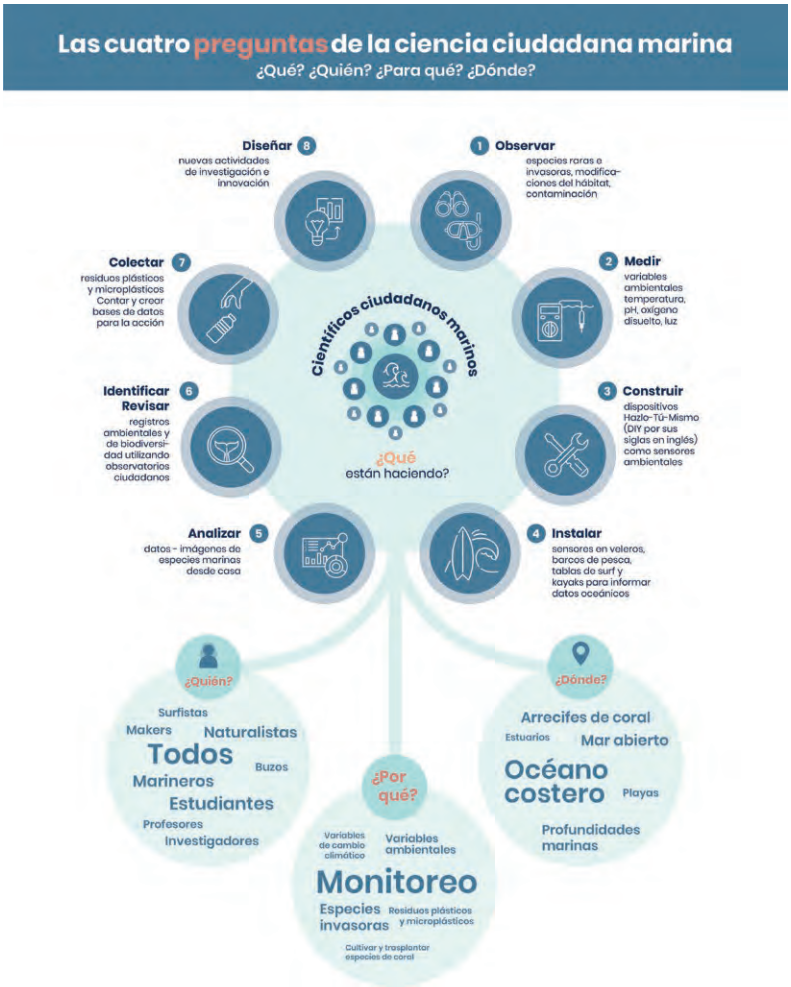


Figura 1. Las cuatro preguntas de la ciencia ciudadana marina: ¿Qué? ¿Quién? ¿Por qué? ¿Dónde? El espectro de participación en la ciencia ciudadana marina (MCS) es amplio. Entusiastas e investigadores cada vez más colaboran recolectando datos, analizando información, construyendo dispositivos de monitoreo y diseñando investigaciones. Las 4ws de la MCS es una mirada panorámica a la diversidad de perfiles de participantes, actividades que se están realizando, tipos de proyectos y ecosistemas en los que MCS ha venido contribuyendo al conocimiento del océano.

por ejemplo, con sensores *Do-it-Yourself* (DIY) como la boya KdUINO, que permite medir la transparencia del agua o la instrumentación de embarcaciones de recreo para capturar variables oceanográficas como el *Patí Científic*. Otra de las innovaciones ha sido la creación de proyectos exclusivamente virtuales. Personas de todo el mundo colaboran desde sus hogares, analizando millones de imágenes del fondo marino para investigar la distribución de especies marinas de importancia comercial. A su vez enfoques como *iEcology* y *Culturomics* utilizan datos disponibles en fuentes digitales generados pasiva o involuntariamente (p.ej. YouTube) para cuantificar patrones y procesos en el mundo natural (Sbragaglia *et al.* 2022).

Uno de los resultados de esta participación ha sido la contribución con datos para generar publicaciones científicas. Por ejemplo, Earp *et al.* (2020) identificó cuarenta y cuatro proyectos de ciencia ciudadana marina que contribuyeron con datos al menos a 1483 artículos de revistas revisadas por pares. Otro aporte para resaltar es la documentación de la vida marina a través de las guías participativas de biodiversidad; algunos ejemplos son la guía *Seasearch* de ascidias y esponjas de Gran Breta-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

ña e Irlanda y la reciente Guía Marina Participativa del Barcelonés. En cuanto a las políticas y gestión ambiental marina que a menudo requiere evidencia respaldada en grandes bases de datos, la ciencia ciudadana tiene un gran potencial como fuente eficiente de información. Por ejemplo, en el Reino Unido, el conjunto de datos de Seasearch que se remonta a 1984 ha contribuido a la designación de 38 zonas de conservación marina y varias áreas marinas protegidas (Earp *et al.* 2020). La contribución al monitoreo de variables asociadas al cambio climático es otra área con gran potencial, ejemplo de ello es el proyecto de Biodiversidad Marina y Cambio Climático (MarClim) que proporciona continuamente datos para detectar los cambios en la distribución geográfica de las especies y brinda asesoramiento para la formulación de políticas.

Ciencia ciudadana marina: desafíos y oportunidades

La calidad de los datos y el compromiso a largo plazo de participantes es uno de los desafíos más comunes que enfrentan los proyectos de ciencia ciudadana. En el caso de los datos, estos aún no están plenamente reconocidos por la comunidad científica, aunque su calidad sea comparable con la de investigaciones científicas sin participación pública (Martin *et al.* 2016). En cuanto a la participación, los sistemas marinos también plantean sus propios desafíos únicos a la hora de hacer ciencia ciudadana: la dificultad en el acceso al océano los hace menos fáciles de monitorear que un hábitat terrestre, dependiendo del tipo de proyecto la logística implica el uso de botes y otros equipos específicos, y en algunos casos ciertas habilidades previas como es el de las actividades de buceo.

Superar estos desafíos requiere facilitar la participación desde el diseño del proyecto de ciencia ciudadana. Por ejemplo, priorizando la observación en las áreas costeras accesibles, centrándose en especies de mamíferos, aves u otras costeras, que se pueden observar con mayor facilidad. Implementar estrategias que consideren el factor social, como las redes de participantes (es decir, redes de familiares, amigos) también puede contribuir a aumentar la participación a largo plazo (Martin *et al.* 2016). En cuanto a la calidad de los datos, es importante incrementar el uso de estándares en la comunidad de ciencia ciudadana y promover la interoperabilidad entre plataformas. Es necesario facilitar y promover la publicación de datos abiertos siguiendo los principios de FAIR data. Para robustecer la gestión de estos datos es clave fortalecer las infraestructuras tecnológicas que soportan la ciencia ciudadana conocidas como observatorios participativos. Una forma de disminuir las brechas de conocimiento y aumentar la participación es fortalecer la validación colaborativa de los datos en estos observatorios.

En conclusión, la ciencia ciudadana marina tiene un gran potencial para reducir las brechas de conocimiento sobre los océanos y contribuir a la conservación y gestión de los ecosistemas marinos. Su capacidad para generar información en múltiples escalas espacio-temporales, involucrar activamente a una comunidad diversa y aumentar el conocimiento de los océanos lo convierte en un pilar para lograr un océano sostenible.

Referencias

Earp H.S., Liconti A. 2020. Science for the Future: The Use of Citizen Science in Marine Research and Conservation. In: Jungblut S., Liebich V., Bode-Dalby M. (eds), YOUMARES 9-The Oceans: Our Research, Our Future, Proceedings of the 2018 conference for YOUng MArine RESearcher in Oldenburg, Germany, pp. 1-19. Springer International Publishing.

Garcia-Soto C., Seys J.J.C., Zielinski O., *et al.* 2021. Marine Citizen Science: Current state in Europe and new technological developments. Frontiers Mar. Sci. 8: 621472.

Martin V.Y., Christidis L., Lloyd D.J., Pecl G. 2016. Understanding drivers, barriers and information sources for public participation in marine citizen science. J. Sci. Commun. 15(2): A02.

Ocean Literacy Network. 2020. Ocean Literacy: The Essential Principles and Fundamental Concepts of Ocean Sciences for Learners of All Ages Version 3. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration. Accesible en: https://oceanliteracy.unesco.org

Sbragaglia V., Espasandín Soneira L., Steenbeek J., *et al.* 2022. El surgimiento de la *iEcology* y la culturómica de la conservación para el desarrollo sostenible de los océanos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 214-216.

Vohland K., Land-zandstra A., Ceccaroni L., Lemmens R., *et al.* (eds). 2021. The Science of Citizen Science. Springer International Publishing.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14120

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Blanca Figuerola

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

7. Océano inspirador y estimulante

Pedro Cermeño, Vanessa Balagué, Carine Simon

La palabra océano proviene de Oceanus (griego: *Ōkeanós*), el mayor de los Titanes en la mitología griega clásica, quienes creían que Oceanus era la personificación divina de un gigantesco río que rodeaba el mundo. La historia de la humanidad está llena de deidades mitológicas relacionadas con el agua, dioses del océano y de los ríos creados por civilizaciones antiguas para representar las fortalezas de la naturaleza y de las diferentes facetas humanas. Durante milenios, los océanos han sido una poderosa fuente de inspiración para filósofos, artistas y comerciantes, desde los griegos y romanos hasta los intrépidos marineros de la Edad Media. Hoy en día, los océanos siguen siendo fuente de inspiración y curiosidad alimentada por los avances científicos y la concienciación social adquirida en los últimos tiempos.

En este capítulo «Océano inspirador y estimulante», los autores ahondan en nuestra relación lógica pero también artística y espiritual con los océanos, cómo debemos interactuar con los océanos para ser parte de ellos, no sus dueños, cómo transmitir sabiduría y pasión por los océanos, cómo protegerlos y, finalmente, poniendo el foco en el futuro, darnos cuenta de que necesitamos a los océanos mucho más de lo que ellos nos necesitan a nosotros.

La década de 2020, que coincide con el Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, debe ser el punto de partida para impulsar un cambio en la forma en que los humanos nos relacionamos con los océanos. Debemos darnos cuenta de que muchos de los recursos vivos y no vivos que nos proporciona el océano son finitos, que los océanos representan un sumidero crucial de dióxido de carbono atmosférico y otros gases de efecto invernadero, o que las corrientes oceánicas actúan como una cinta transportadora de calor desde el ecuador hacia los polos, ayudando a hacer de la Tierra un planeta habitable.

La historia de los océanos es la historia de la vida. Como Gaia, la madre de Oceanus para los antiguos griegos, debemos aprender a vivir en armonía con los océanos. Ellos nos dieron la vida del mismo modo que Gaia se la dio a los océanos.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

7.1. Una oportunidad para un desarrollo armónico con la naturaleza

Josep L. Pelegrí

En enero de 2021 comenzó el Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, proclamado por las Naciones Unidas y coordinada por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Esta Década de los Océanos, que se extenderá hasta finales del 2030, tiene como objetivo central promover una gestión de las costas y los océanos basada en el conocimiento científico, que haga de los océanos saludables uno de los pilares para el progreso de toda la humanidad.

Bajo el lema *la ciencia que necesitamos para el océano que queremos*, la Década de los Océanos parte de la premisa que las ciencias oceánicas deben impulsar la Agenda 2030 del Desarrollo Sostenible. Esto solo será posible mediante un proceso reflexivo, inclusivo y transformador: que surja del conocimiento científico e incorpore la participación de organizaciones gubernamentales y civiles, con un alcance transformador hacia toda la comunidad internacional y el propio planeta.

En este ensayo, empezaré recordando el rol principal de los océanos como artífices de la vida planetaria y las posibilidades que el océano nos brinda como fuente de recursos sostenibles. Terminaré reflexionando, desde una perspectiva naturalista, sobre los principios de justicia social y evolución individual y colectiva que subyacen en el concepto de desarrollo sostenible.

Los océanos: nuestro mayor recurso compartido

Los océanos regulan la vida de nuestro planeta, tanto la de cada una de sus especies, incluida la humana, como la del propio planeta vivo (Pelegrí 2021). El 97% del agua en la superficie del planeta, que es la base de la vida, se encuentra en los océanos. El exceso de evaporación oceánica aporta el 34% del agua que precipita sobre los continentes, manteniendo por tanto la vida de los ecosistemas terrestres.

Los océanos también son los principales artífices de la complejidad y resiliencia de nuestro planeta. Son los grandes repositorios de la energía solar y, junto con la atmósfera, la distribuyen entre distintas regiones. También acumulan la mayor parte de los nutrientes y minerales que, a escalas que van de segundos a milenios, conforman el ciclo de la vida, y son los principales reguladores de los gases de tipo invernadero que determinan las variaciones naturales de nuestro clima.

Los océanos son, además, los grandes conectores planetarios, con el mismo rol de distribución de propiedades que tiene el sistema circulatorio de cualquier ser vivo (Pelegrí 2008). Mantienen, a nivel global, un proceso continuo de producción primaria y remineralización de materia orgánica. Se trata de un ciclo que se reinicia cada año y que permite un funcionamiento homeostático optimizado que solo requiere energía solar (Pelegrí 2019).

La resiliencia de los océanos los convierte también en los grandes reguladores del impacto antrópico planetario, que incluye tanto el cambio global como el cambio climático. Por cambio global entendemos los múltiples desajustes que experimenta la naturaleza, desde la escala local a la planetaria, como resultado de la contaminación, la degradación de los ecosistemas y la sobreexplotación de los recursos naturales.

Por cambio climático de origen antrópico concebimos esencialmente el aumento de la temperatura del planeta causado por la emisión

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

de gases invernadero, que resulta sobre todo de la utilización de combustibles fósiles. Este incremento de temperatura viene acompañado de cambios de patrones climáticos, la subida del nivel del mar y una mayor frecuencia de eventos meteorológicos extremos.

Economía azul: marítima y sostenible

Cambio global y cambio climático son las dos caras de una misma moneda: el impacto antrópico planetario que se ensaña con los colectivos más vulnerables. A la desigualdad en el acceso a unos niveles básicos de bienestar, muy evidente entre diferentes comunidades y regiones, se le suma la distinta capacidad para desarrollar medidas paliativas frente al impacto antrópico.

Todo ello contrasta con la visión del océano como un bien común. El océano no solo proporciona sus esenciales servicios ecosistémicos a todo el planeta, también es la mayor riqueza compartida de toda la humanidad, lo que llamamos la economía azul (UN 2021). Una economía que no solo es un espacio físico de recursos minerales y posibilidades logísticas al servicio de todas las personas, es sobre todo un nuevo modo de pensar y actuar con la naturaleza.

Estos recursos perdurables son la pesca sostenible y la acuicultura responsable, las energías renovables marinas y eólicas, el agua potable, los recursos marinos de origen animal o vegetal, y la biotecnología y recursos genéticos (figura 1). Incluyen también las actividades que giran alrededor del entorno costero y marino, desde el turismo ecológico hasta el comercio de proximidad. A este patrimonio común se le suman los beneficios culturales, estéticos y de salud física y emocional que proporciona un entorno natural sostenible. Todo ello representa una oportunidad inigualable para que un sinnúmero de recursos sostenibles esté al alcance de todas las personas, comunidades y naciones.

Des-enrollar en armonía

El concepto de desarrollo sostenible a menudo va asociado a la idea de «uso» de los sistemas naturales para el bienestar de la humanidad. El término «sostenible» presupone una condición necesaria: el modo de empleo no debe alterar la estabilidad temporal del sistema. ¿Pero es esta condición suficiente? ¿Es la perspectiva utilitaria del planeta coherente con la sostenibilidad?

Desde un punto de vista naturalista, la salud de cualquier organismo no es posible sin el desarrollo armónico de ese organismo con su ecosistema. Por tanto, aplicado a nuestra relación con el planeta, el concepto «uso» debería dar paso a la idea de «ser parte». Esto surge del propio sig-

Figura 1. La pesca representa el 17% de la proteína consumida a nivel global y excede el 50% en muchos de los países menos desarrollados. Azwari Nugraha, proporcionada por el autor.

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

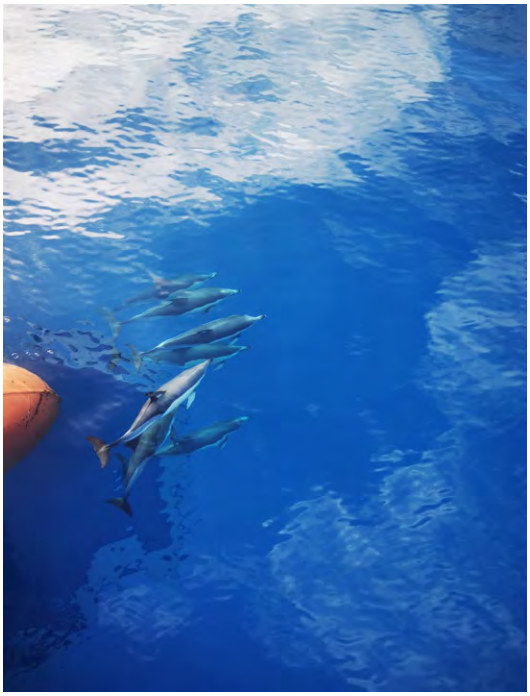


Figura 2. Un grupo de delfines deslizándose plácidamente frente al B/O Sarmiento de Gamboa en aguas del afloramiento del noroeste africano. Anna Oliver, proporcionada por la autora.

nificado etimológico de la expresión «desarrollo sostenible».

Desarrollo viene de desenrollar, extraer algo que se guarda dentro (en inglés *develop* también viene del francés *développer*: *des-envelopper*). Por tanto, el desarrollo debe conllevar necesariamente un crecimiento interior, la evolución de una potencialidad ya existente o latente.

Sostenible, por otro lado, no debe comportar la idea de un estado permanente e inmutable sino más bien el de una evolución dinámica y armoniosa. Se trata de mantener desde la base (sostenible: *subs-tenere*) un sistema homeostático y resiliente, organizado con un mínimo de entropía, que evoluciona hacia una mayor complejidad.

La naturaleza, con los océanos como su componente principal y esencial, emerge como el mejor ejemplo de desarrollo sostenible. Nuestro reto como especie es formar parte de este desarrollo armónico planetario. La especie humana puede alcanzar su máxima evolución si se orienta hacia la inteligencia vital de nuestro planeta vivo (Pigem 2017). Escuchar y aprender de la naturaleza, formar parte de ella en lugar de poseerla. Nuestra individualidad no debe separarnos de nuestras comunidades y nuestras comunidades no deben separarse del planeta. Nuestras diferencias no nos llevan a competir, al contrario, nos complementan y aportan a la inteligencia, complejidad y resiliencia planetaria.

Los objetivos del desarrollo sostenible no deben basarse en el uso utilitario de la naturaleza, ni siquiera si se trata de un uso sostenible. El enfoque debe ser formar parte de la naturaleza en lugar de poseerla (figura 2). Estos objetivos de desarrollo son una oportunidad para que toda la humanidad, sin excepción, alcance unos derechos básicos de bienestar social, algo perfectamente posible con los recursos planetarios. Más aun, los objetivos deben impulsarnos hacia una nueva fase en nuestra evolución como especie, hacia un crecimiento interior –individual y colectivo– en armonía con la naturaleza.

Este ensayo es la adaptación de un artículo publicado en *The Conversation* el 7 de junio de 2021 bajo el título «No podremos alcanzar un desarrollo sostenible con unos océanos enfermos» (https://theconversation.com/no-podremos-alcanzar-un-desarrollo-sostenible-con-unos-oceanos-enfermos-161139).

Referencias

Pelegrí J.L. 2008. A physiological approach to oceanic processes and glacial-interglacial changes in atmospheric CO_2. Sci. Mar. 72: 185-202.

Pelegrí J.L, 2019. Corrents i ecosistemes oceànics com a susbsistemes d'un organisme planetari. Treballs de la Societat Catalana de Biologia 69: 41-48.

Pelegrí J.L. 2021. La humanidad está alterando los océanos, principales reguladores del cambio climático. The Conversation, 21 enero 2021. https://theconversation.com/la-humanidad-esta-alterando-los-oceanos-principales-reguladores-del-cambio-climatico-150241

Pigem J. 2017. Inteligencia Vital. Una Visión Postmaterialista de la Vida y la Conciencia. Editorial Kairós, 192 pp.

UN. 2019. Diving into the blue economy. United Nations Department of Economic and Social Affairs. https://www.un.org/development/desa/en/news/sustainable/blue-economy.html

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14122

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

7.2. *Mission Starfish 2030:* una ciencia integradora y que entusiasma para recuperar nuestros océanos y ríos en el marco del *Horizon Europe*

Sònia Sagristà, Elena Torrecilla

La Década de la Ciencia Oceánica para el Desarrollo Sostenible impulsada por las Naciones Unidas llega como un revulsivo para nuestros océanos y marcará un punto de inflexión para la investigación marina. En este sentido, no es casualidad que el principal programa de financiación de la investigación e innovación europea –el *Horizon Europe*– haya elegido a los océanos para protagonizar una de las cinco grandes misiones científicas para los próximos siete años (2021-2027). Se trata de la «Misión Estrella de Mar 2030: Recuperemos nuestros océanos y ríos», o *Mission Starfish 2030* (Lamy *et al.* 2020).

Las misiones del programa *Horizon Europe* son una nueva aproximación para afrontar los grandes desafíos sociales a los que la investigación europea quiere dar respuesta. Con un enfoque multidisciplinar y una voluntad transformadora, apuesta por la búsqueda de soluciones a problemáticas concretas, fijando objetivos ambiciosos, inspiradores y medibles en un tiempo determinado. Las misiones europeas y los retos de investigación del Institut de Ciències del Mar (ICM) –vida, clima y peligros[(1)]– comparten una misma visión integradora, donde es la problemática, más que la disciplina de conocimiento, lo que se convierte en el eje vertebrador de la investigación.

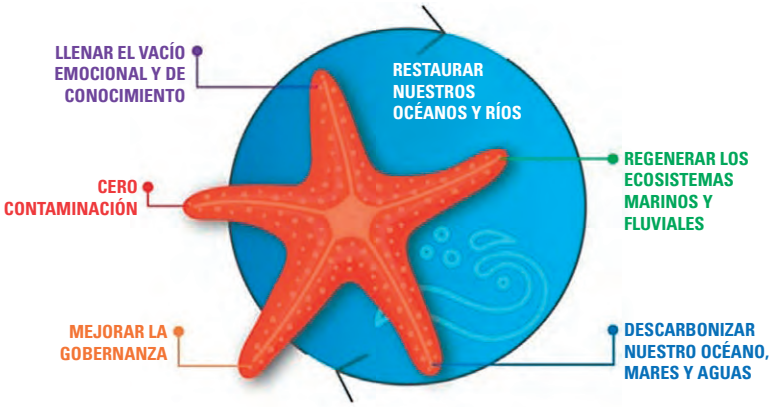
Mission Starfish 2030: cinco objetivos o áreas de actuación

Inspirados por la forma de la estrella de mar, la *Mission Starfish* 2030 persigue cinco objetivos interdependientes: regenerar los ecosistemas, eliminar la contaminación, descarbonizar nuestros océanos, reformular la gobernanza, y llenar el vacío emocional y de conocimiento sobre nuestros mares y ríos. La misión tiene como finalidad última garantizar el uso sostenible de los bienes y servicios que océanos y otras masas de agua ofrecen. Partiendo de cuatro problemas identificados –cambio climático, el carácter insostenible de la huella humana, una inadecuada gobernanza, y la falta de comprensión y conexión con el océano–, la misión propone los cinco objetivos de los cuales derivan diecisiete cometidos concretos (figura 1).

Tres de los cinco objetivos de la *Mission Starfish 2030* se enmarcan en el terreno de la ciencia experimental: regenerar los ecosistemas, eliminar la contaminación y descarbonizar nuestros océanos. Las primeras acciones que se están gestando y que están descritas en el Programa de Trabajo 2021-2022 (European Commission 2021) se centrarán en estos tres objetivos. Estas primeras acciones preparatorias están dirigidas a identificar los proyectos llamados «Faros demostradores» (*Lighthouse demonstrators*, en inglés). Siguiendo la metáfora, serán iniciativas que guiarán el despliegue de un conjunto de actividades.

A parte de estos tres objetivos, el gran reto, sin embargo, lo presentan los otros dos objetivos que surgen de una perspectiva eminentemente social. Por un lado, es necesario reformular la gobernanza de nuestras aguas, y, por otro lado,

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es



Objectivo	Cometido	
Llenar el vacío emocional y de conocimiento	1	Cada persona europea es ciudadana de nuestros océanos y ríos
	2	La observación marina y fluvial es mejorada y se hace accesible a todos/as vía un doble digital del océano y otros cuerpos de aguas
Regenerar los ecosistemas marinos y fluviales	3	30 por ciento de las aguas europeas están totalmente protegidas o en alto grado de protección
	4	Regeneración activa de un 20 por ciento de los hábitats degradados
	5	Renaturalizar ríos y otros cuerpos de aguas
	6	Acabar con la sobrepesca
Cero contaminación	7	Cero basura marina (plásticos)
	8	Atajar la eutrofización de los mares y ríos europeos
	9	Cero vertidos
	10	Reducción y regulación del ruido submarino
Descarbonizar nuestro océano, mares y aguas	11	Transporte marino y fluvial climáticamente neutro
	12	Apoyo a la transición energética mediante energía oceánica renovable y de bajo impacto
	13	Acuicultura libre de carbono
	14	Biotecnología azul próspera
	15	Turismo azul climáticamente neutro
Mejorar la gobernanza	16	Un sistema europeo de gobernanza para el océano y ríos integrado y participativo
	17	Liderazgo europeo efectivo para la gobernanza global del océano

Figura 1. Los 5 objetivos y 17 cometidos de la *Mission Starfish 2030*. (Lamy *et al*. 2020).

llenar el vacío de conexión emocional y de conocimiento sobre nuestros mares y ríos. Es aquí donde se encuentra el gran desafío, no solo para Europa, sino también para el resto del mundo. Para renovar la gobernanza de nuestras aguas, la *Mission Starfish* 2030 señala dos cometidos: construir un sistema europeo integrador y participativo, y que Europa ejerza un liderazgo efectivo para la gobernanza del océano. Para llenar el vacío emocional y de conocimiento, los dos cometidos propuestos por el documento de la misión son: en primer lugar, poner a disposición un sistema de observación marina funcional y accesible a todos a través de la creación de un doble digital de los océanos; y en segundo lugar, lograr que cada persona europea se convierta en ciudadano de nuestros mares y ríos. Es necesario preguntarse si estos cuatro cometidos serán

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

suficientes para alcanzar unos objetivos tan ambiciosos.

Un cambio estructural para lograr una ciencia marina integradora y transformadora

Para poder alcanzar los cinco objetivos de la *Mission Starfish 2030*, se señala como necesario un cambio de base en nuestra sociedad. Es decir, una transformación estructural que requerirá una valiente inversión económica y una sociedad implicada en el cuidado de nuestros océanos. La ciudadanía y el sector económico se convierten en actores principales en el futuro de la ciencia oceánica europea. Un futuro donde el Institut de Ciències del Mar (ICM) también jugará un rol destacado.

Los tres retos de investigación del ICM –vida, clima y peligros–, son un marco de trabajo idóneo para poder contribuir a los objetivos fijados en la Mission Starfish 2030 en cuanto a regenerar los ecosistemas, eliminar la contaminación y descarbonizar nuestros océanos. Del mismo modo, los valores institucionales del ICM de creatividad, cooperación y compromiso nos permiten abordar de forma natural la colaboración con las entidades de gobernanza, así como lograr una fluida integración de la ciudadanía con nuestra ciencia.

El carácter y la trayectoria del ICM nos posicionan idóneamente ante las exigencias que plantea la ciencia marina de excelencia y transformadora de los próximos años en Europa. Sin embargo, es preciso tener presente el cambio estructural que implican estas exigencias. Se hace esencial hacer una reflexión plena sobre cómo la ciencia y conocimiento que genera el ICM puede contribuir a promover una implicación profunda de la sociedad en el cuidado de nuestros océanos, y de cómo puede incentivar una inversión valiente para dinamizar la economía azul. Si en unos años, cuando finalice el *Horizon Europe* y la Década de la Ciencia Oceánica para el Desarrollo Sostenible, queremos poder afirmar que hemos construido el futuro que ahora imaginamos para los océanos, no será suficiente haber generado conocimiento de excelencia científica. Se requiere una ciencia oceánica integradora y transformadora. La investigación marina para un planeta saludable reclama ir más allá de los diecisiete cometidos que propone la *Mission Starfish 2030*.

El gran reto tanto individual como colectivo para todos los que formamos parte del ICM será haber sido los promotores de una ciencia marina estimulante y que entusiasma, que involucre y genere empatía para con las personas, que potencie las alianzas estratégicas y que se gane la confianza del tejido productivo. En los últimos años estamos viendo un espíritu en el ICM que apuesta por una gobernanza más colectiva; una gestión más integrada con la investigación; unos grupos de trabajo de impacto transversal con clara orientación a los sellos de calidad; y unos comités de estrategia, cultura científica marina y de servicios científico-técnicos que quieren avanzar en esta dirección. Que la cultura e investigación marina que genera el ICM para un planeta saludable tenga un papel activo en la *Mission Starfish 2030* es cosa de todos.

Referencias

European Commission. Work Programme 2021-2022. Missions. 2021. European Commission Decision C(2021)4200 of 15 June 2021. https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2021-2022/wp-1-general-introduction_horizon-2021-2022_en.pdf

Lamy P., Citores A., Deidun A., *et al.* 2020. Mission Starfish 2030: Restore our Ocean and Waters. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 88 pp.

Salvo V.S. 2022. Ocean Decade. Un decenio hacia la gobernanza participativa de los océanos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 228-230.

(1) Los tres retos de investigación del ICM son: interacciones entre el Océano y el Clima (Clima), Conservación y Uso Sostenible de la Vida y los Ecosistemas Marinos (Vida), y Comprensión y Mitigación de los impactos Naturales y Antropogénicos (Peligros).

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14123

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

7.3. *Ocean Decade*. Un decenio hacia la gobernanza participativa de los océanos

Vanessa Sarah Salvo

Cambio climático, contaminación, tráfico marítimo, sobreexplotación de los recursos y la destrucción de los hábitats son algunas de las presiones que sufre el planeta azul. En 2016 la 1ª Evaluación Integrada del Medio Marino a Escala Mundial (UN 2016) evidenció la urgencia de hacer frente a las amenazas que afectan a los océanos invitando a una acción colectiva y contundente. En respuesta a este reto, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI) (https://ioc.unesco.org) decidió proponer la Década de los Océanos. El COI es el organismo de las Naciones Unidas responsable de apoyar las ciencias y los servicios oceánicos mundiales, impulsando las capacidades científicas e institucionales de los 150 Estados miembros, con el fin de proteger el océano. Es decir, favorecer el logro de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, conseguir las metas del Acuerdo de París sobre el Cambio Climático (UNFCC 2015) y aquellas del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDIR 2015). La propuesta del COI quedó registrada como Resolución nº XXIX-1[(1)] en junio 2017. Sucesivamente, en diciembre del mismo año, durante la Asamblea General de Naciones Unidas se aprobó oficialmente el *Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible 2021-2030* con el lema «La ciencia que necesitamos para el océano que queremos».

La Década pretende brindar una ocasión única para juntar a los actores de todo el mundo, en el marco de una alianza por las ciencias en respuesta al declive de los ecosistemas marinos. Por lo tanto, esta iniciativa persigue dar un impulso al conocimiento, a la innovación, a las nuevas tecnologías, para crear conexiones intercambiando buenas prácticas, educando, formando y fomentando acciones transformadoras hacia la sostenibilidad. Acciones que han de definirse colectivamente para identificar movimientos globales a los problemas presentes y futuros a los que se enfrenta el océano. La participación, colaboración y co-creación son fundamentales para aunar los conocimientos multidisciplinares necesarios en la búsqueda de soluciones transformadoras aplicables y adaptables a los ámbitos regionales, nacionales y locales.

El objetivo es pasar del *océano que tenemos*, afectado por la acción humana, al *océano que queremos,* limpio y saludable, cambio alcanzable a través de un camino colaborativo enmarcado en la *ciencia que necesitamos* (figura 1) que se articula en tres pilares:

1. Definir los conocimientos necesarios para la sostenibilidad.
2. Generar datos e información para la comprensión del océano (componentes e interacciones).
3. Crear las bases para el aprovechamiento de los conocimientos identificados.

Grupos de expertos multidisciplinares e internacionales, que han retroalimentado la preparación de la Década, sus objetivos y resultados, identificaron un total de diez desafíos a los que las ciencias tendrán que enfrentarse para sostener las ambiciones propias de la Década. Estos desafíos han sido agrupados en áreas:

1. Conocimientos y soluciones.
2. Infraestructuras básicas o herramientas necesarias para alcanzar los objetivos.
3. Fundamentos para garantizar la inclusión y el cambio cultural necesario.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

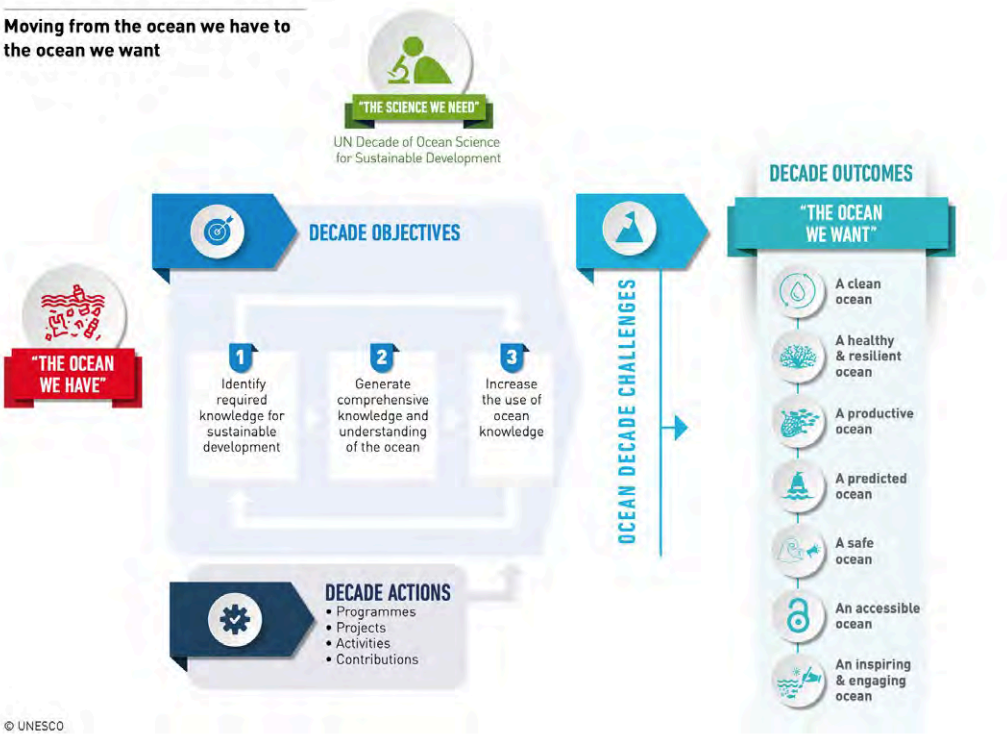


Figura 1. La Década de las Ciencias Oceánicas.

Tabla 1. Los siete resultados esperados en la Década de las Ciencias Oceánicas (COI-UNESCO 2020).

Nº	Resultado	Significado
1	Un océano limpio	Se detectan, reducen o eliminan las fuentes de contaminación.
2	Un océano saludable y resiliente	Se entienden, protegen, restauran y gestionan los ecosistemas marinos.
3	Un océano productivo	Sustenta el suministro de alimentos y una economía oceánica sostenible.
4	Un océano predecible	Las condiciones cambiantes son entendidas por la sociedad, que está capacitada para responder a ellas.
5	Un océano seguro	La vida y los medios de subsistencia están protegidos de los peligros relacionados con el océano.
6	Un océano accesible	Acceso abierto y equitativo a los datos, la información, la tecnología y la innovación.
7	Un océano inspirador y estimulante	La sociedad entiende y valora su relación con el bienestar humano y el desarrollo sostenible.

Los diez desafíos no son fijos para todo el periodo, pudiendo evolucionar y cambiar a lo largo de la Década en razón de la capacidad de los actores involucrados en conseguir los resultados esperados (tabla 1).

El cambio hacia la Cultura Oceánica

La participación, la cooperación y las ciencias son las bases para la planificación y gestión con el fin de conseguir los objetivos de la Década en el 2030. Esto implica un cambio cultural en la sociedad porque «no se puede amar lo que no se conoce, ni defender lo que no se ama»[(2)]. Es decir, son fundamentales la *Ocean Literacy* (https://oceanliteracy.unesco.org), o cultura oceánica, la capacitación en la economía azul y la innovación, tareas que el Institut de Ciències del Mar (ICM-CSIC) viene desarrollando desde hace muchos años (Pelegrí 2022, Salazar *et al.* 2022). El ICM-CSIC y la Unitat de Tecnología Marina (UTM-CSIC) han recibido, el 8 de ju-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

nio de 2021, el respaldo oficial de COI-UNESCO para el programa OC-NET[3] dedicado a las Ciudades Oceánicas y sus retos, a través de la colaboración de varios actores, incluida la ciudadanía. Tenemos un decenio para reaprender a relacionarnos con el planeta azul, beneficiándonos de sus riquezas y servicios protegiéndolo siempre.

Referencias

IOC-UNESCO. 2020. Decade of Ocean Science for Sustainable Development 2021-2030. Implementation Plan version 2 July 2020. COI-UNESCO. 61 pp.

Pelegrí J.L. 2022. Una oportunidad para un desarrollo armónico con la naturaleza. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 222-224

Salazar J., Gili J.-M., Vendrell B. 2022. Cultura oceánica: hacia una sociedad científicamente informada y comprometida con el océano. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 236-238.

UN. 2016. The First Global Integrated Marine Assessment World Ocean Assessment I. 1st cycle of Regular Process for Global Reporting and Assessment of the State of the Marine Environment, including Socioeconomic Aspects. United Nations General Assembly. 1752 pp.

UNFCC. 2015. Decision 1/CP.21 Adoption of the Paris Agreement. Framework Convention on Climate Change. Conference of the Parties 21ª Session Paris (France) 30 November- 13 December 2015. FCCC/CP/2015/10/Add.1. 40 pp.

UNISDR. 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Adopted in the Third UN World Conference in Sendai (Japan) 18 March 2015. UNISDR/GE/2015 - ICLUX ES 1ª edition. 40 pp.

(1) Resolución adoptada por la Asamblea de la COI en su 29ª Sesión, París, 21-29 de junio de 2017, el 29 de junio de 2017.

(2) Frase atribuida a muchos autores, entre ellos Leonardo da Vinci.

(3) https://www.oceandecade.org/resource/166/Announcement-of-the-results-of-the-first-endorsed-Decade-Actions-following-Call-for-Decade-Actions-No-012020

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14124

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

7.4. Una sociedad civil comprometida con el medio marino

Carine Simon, Magda Vila, María Vicioso, Maravillas Abad, Josep L. Pelegrí

Tradicionalmente, los centros de investigación han tenido el papel de generadores de conocimiento, pero no se les acostumbraba a pedir que hicieran llegar esta información a la sociedad civil. Afortunadamente, esto ha ido cambiando y los centros de investigación, cada día más, asumen el compromiso de generar un conocimiento que sea transformador. Esto es especialmente importante para los centros de investigación en ciencias marinas, que estudian un medio a menudo muy alejado de la realidad cotidiana de gran parte de la ciudadanía.

Este es el caso del Institut de Ciències del Mar (ICM), que desde hace varias décadas ha tomado el compromiso de explicar el comportamiento y la relevancia del entorno marino a la ciudadanía, a través de numerosos proyectos culturales y actividades de divulgación y comunicación científica marina. Muchas de estas acciones se reflejan en la plataforma educativa ICM Divulga (http://icmdivulga.icm.csic.es/), creada en 2005. Sin embargo, en esta tarea de dar a conocer el estado y funcionamiento del entorno marino, los centros científicos requieren del compromiso y la participación de toda la sociedad.

El aumento de la cultura científica marina es relevante en un momento de cambio global y emergencia climática como el que estamos viviendo actualmente, una situación en la cual se pierden hábitats y biodiversidad a un ritmo vertiginoso, la contaminación y la sobrepesca son más la norma que la excepción, las invasiones de especies exóticas son frecuentes, y se incrementa la temperatura del planeta a una velocidad alarmante, llevando al aumento del nivel del mar y a un mayor número de tormentas intensas. Ante esta situación, la ciudadanía ha dejado de ser un espectador pasivo, al contrario, ha empezado a convertirse en el actor de su propio cambio.

Las asociaciones civiles como instrumento hacia el cambio

Con la voluntad de conservar el patrimonio ambiental marino y para informar sobre las repercusiones que derivan de su alteración o pérdida, durante los últimos años se ha multiplicado la respuesta ciudadana en forma de pequeñas empresas –desde aquellas que se fundamentan en la producción y consumo sostenible hasta otras centradas en la educación y el conocimiento del medio natural – así como por medio de asociaciones civiles sobre temáticas relacionadas con el medio marino. La asociación Mar de Ciencia (http://mardeciencia.org/), nacida en 2019, es un ejemplo. Mar de Ciencia tiene el objetivo de acercar la realidad del medio marino a la sociedad a través de los principios de sostenibilidad, justicia social y respeto a la naturaleza.

Mar de Ciencia no tan solo busca educar, divulgar y comunicar, quiere también concienciar sobre la necesidad que tenemos, a escala individual y colectiva, de vivir en conexión y armonía con la naturaleza, y muy especialmente con el entorno marino, que a menudo vemos lejano y ajeno. La asociación sabe que la ciencia es necesaria, pero no suficiente para lograr este reto, hace falta que la ciudadanía se coordine en el desarrollo, y en la exigencia, de hábitos de comportamiento y consumo responsables y sostenibles.

La asociación Mar de Ciencia no solo apoya y promueve la participación de la ciudadanía

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

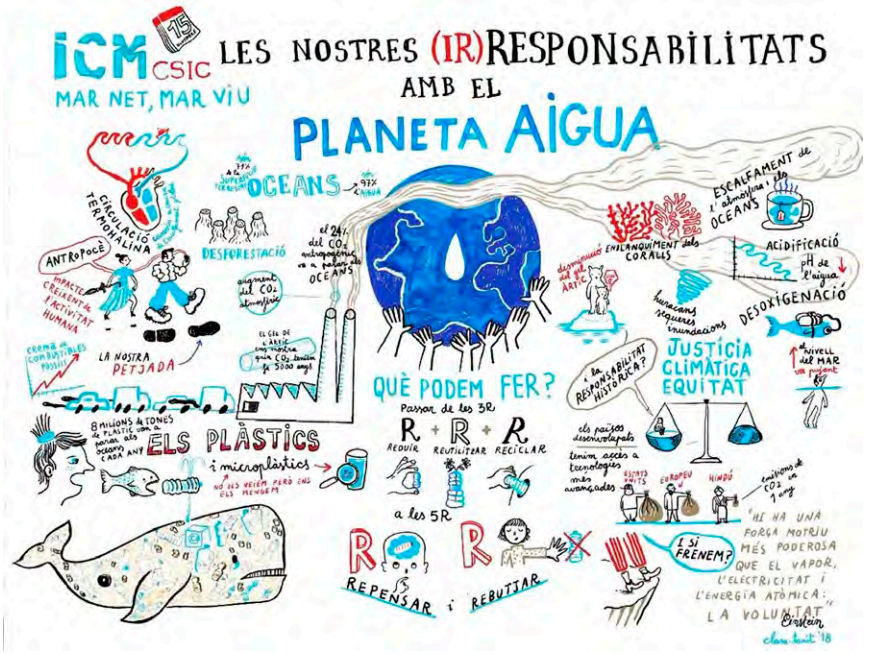


Figura 1. *Graphic recording* elaborado por la ilustradora Clara Tanit durante una actividad divulgativa del proyecto de sensibilización medioambiental *Operación Mar-Net, Mar-Viu* que incluyó una charla a cargo de Eva Calvo (ICM-CSIC) y una mesa redonda.

en la observación del entorno marino, sino que sobre todo lleva a cabo actividades culturales, educativas y de sensibilización. Como otras entidades civiles, participa en proyectos colaborativos y abre espacios para el debate abierto y el espíritu crítico. En su corto recorrido, Mar de Ciencia ha impulsado la creación de un espacio de encuentro entre las diversas iniciativas y asociaciones que trabajan desde el territorio para fomentar el conocimiento y el respeto hacia el océano (*Espai Mediterrani*: https://espaimediterrani.org/). Este gran océano que rodea nuestro planeta es un bien común, del mismo modo que los bosques son un bien compartido entre todas las personas, sin distinción de ningún tipo. Los océanos son probablemente el mejor ejemplo de cómo la justicia social y la naturaleza son elementos inseparables.

Mar de Ciencia también organiza y participa en jornadas divulgativas y concienciadoras, desde conferencias, mesas redondas, talleres y concursos de fotografía que promueven la reflexión, hasta la limpieza de playas. Junto con otras entidades civiles, apoya proyectos de investigación y ciencia ciudadana que tienen como objetivo final el repensar nuestra relación con el entorno costero y marino. La voluntad de la asociación es acercar y concienciar a la sociedad, desde la perspectiva científica, sobre los problemas ambientales relacionados con el mar, para fomentar futuros cambios de actitudes.

Del mismo modo que otras muchas iniciativas y asociaciones ciudadanas, Mar de Ciencia se expresa con su acción diaria en su entorno local, escuelas y barrio, y llega más lejos gracias a las redes sociales, especialmente mediante una web que quiere dar voz al litoral catalán, con artículos que nos hacen reflexionar, por ejemplo, sobre el uso urbanístico desmesurado del litoral y los problemas ambientales que comporta.

La tarea capital de la sociedad civil

Las asociaciones civiles estamos aquí para impulsar esta masa crítica necesaria para el cambio. Una de nuestras vías más claras de acción consiste en combinar conocimiento (ciencia) y sentidos (arte) para poder llegar a desarrollar una noción de pertenencia con nuestro entorno natural. El éxito será posible compartiendo vivencias y sensaciones, que lleven a la reflexión e interiorización de los

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. Limpieza de la playa del 12 de noviembre de 2018 organizada por la asociación ICM Young Researchers en colaboración con la asociación Mar de Ciencia, a la izquierda. Actividades con niños mezclando conocimiento y emoción, a la derecha.

estragos del cambio global y la emergencia climática. Esto implica, entre otras cosas, compartir experiencias diarias de la sociedad en que vivimos y reflexionar sobre aquella que deseamos. Todo ello va desde fortalecer del comercio de proximidad hasta conocer mejor cuáles son las empresas que tienen políticas justas hacia las personas y el medio ambiente, así como saber qué acciones podemos hacer los ciudadanos para mitigar el impacto que tiene el cambio global sobre el océano.

La Década de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (Salvo 2022) pone el énfasis en el hecho de que la transformación hacia la sostenibilidad solo será posible con la participación comprometida de la sociedad. Pero es una transformación que nunca debe ser impuesta, sino al contrario, tiene que surgir de la voluntad y el convencimiento de que es un cambio necesario y posible. Cuando una parte suficientemente importante de nuestra sociedad lo acepte y actúe en consecuencia para alcanzarlo, se habrá empezado a dibujar el camino, la inercia del cambio crecerá como una gran ola que se volverá imparable.

Esta combinación necesaria de conocimiento y convencimiento con emoción, este complejo binomio de mente y sentidos, corresponde a la sociedad civil (Balagué *et al.* 2022).

Las asociaciones civiles están llamadas a ser un elemento clave para fomentar el compromiso y el empoderamiento de todas las personas, de forma individual y colectiva, hacia una sociedad más justa y en armonía con la naturaleza.

Referencias

Balagué V., Rierola A., Vicioso M. 2022. Rigurosidad artística y creatividad científica. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 245-247.

Ocean Decade. 2021.United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. https://www.oceandecade.org/

Salvo V.S. 2022. *Ocean Decade*. Un decenio hacia la gobernanza participativa de los océanos. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 228-230.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14125

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

7.5. El corazón azul de la Tierra: conocerlo para protegerlo

Elena Martínez Batalla, María Vicioso

Existe una relación directamente proporcional entre el grado de desconocimiento y el de actuación de la sociedad a la hora de enfrentarse a un problema. En el caso de los problemas ambientales, a menudo su magnitud hace que, en vez de actuar, los ciudadanos adopten una actitud pasiva y se queden sentados en el sofá esperando a que otros encuentren una solución a lo que está pasando y, creen, les queda demasiado grande. Esto ocurre, sobre todo, cuando el desastre queda lejos, si bien en el caso del océano, las amenazas son desgraciadamente globales.

Los ecosistemas marinos producen una gran cantidad de oxígeno, son el reservorio más grande de dióxido de carbono de la naturaleza y ofrecen refugio a una gran cantidad de especies, incluida la humana. El océano nos proporciona recursos alimenticios, un lugar para vivir –cerca del 40% de la población mundial habita en zonas costeras– y actúa como nuestro mayor aliado en la lucha contra el cambio climático al regular el clima que permite la vida en la Tierra tal y como la conocemos. Sin embargo, el desconocimiento de la especie humana la ha llevado a poner sus intereses por encima de los de estos ecosistemas, y así lo demuestra el hecho de que sepamos más de la Luna y de Marte que de lo que los especialistas dicen que es el sistema que nos mantiene vivos: el océano global.

«Un mundo sin océano es un mundo sin nosotros», ha expresado en alguna ocasión la oceanógrafa Sylvia Earle, que renunció de su cargo como directora científica de la Administración Nacional de los Océanos y de la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) «por no poder decir lo que sabía». Y lo que sabemos ahora es que el 90% de los grandes peces que nos gusta comer han prácticamente desaparecido en los últimos cincuenta años (Myers y Worm 2003) porque somos lo suficientemente hábiles como para capturarlos, pero no para entender que, si los consumimos antes de que puedan reproducirse, no podremos hacer lo mismo con su descendencia. Asimismo, tenemos constancia de que la mitad de los arrecifes coralinos de todo el mundo han desaparecido en la última mitad de siglo y que, si nada cambia, la otra mitad podría desaparecer mientras nuestros hijos viven, entre otras muchas cosas. Sin embargo, seguimos sentados en el sofá.

Los datos del párrafo anterior echan por tierra la idea que se tenía antes de que el océano, dado que es muy grande, es también muy resistente y lo podemos explotar sin límites. Por lo tanto, solo nos queda actuar. Actuar para salvar lo que según Earle es el «sistema circulatorio» del planeta en el que vivimos, «el corazón azul de la Tierra». Un sistema que ha absorbido más del 90% del exceso de calor derivado de la emisión de gases de efecto invernadero y capturado de la atmósfera más de un 30% del dióxido de carbono emitido hasta ahora, lo que ha provocado su acidificación.

Conocer para proteger

Por todo ello, hay que actuar para asegurar la sostenibilidad del océano, es decir, su futuro más allá de la generación actual. Y esto pasa, primero, por conocerlo, ya que nadie es capaz de proteger lo desconocido. En este sentido, la divulgación y la educación científica son esenciales para crear una sociedad que tenga al alcance el conocimiento para tomar decisiones de forma crítica, informada y siempre desde el rigor y el compromiso, sea haciendo investigación o transmitiendo a las generaciones más jóvenes la importancia de proteger este corazón azul.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

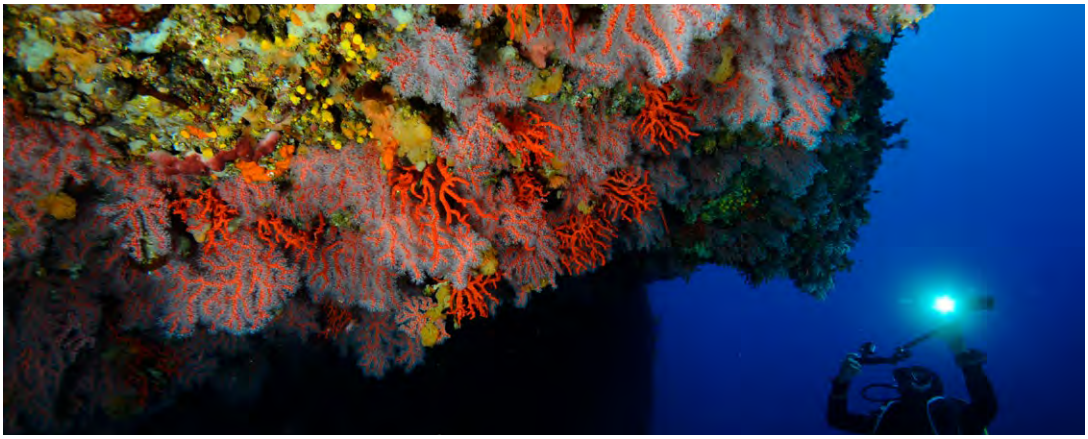


Figura 1. El desconocimiento del océano ha llevado a la especie humana a poner sus intereses por encima de la salud de los ecosistemas marinos y ya se empiezan a ver las consecuencias (foto: J. Garrabou).

Desde el ICM buscamos fomentar la cultura oceánica (Salazar *et al.* 2022), entendida como el conocimiento, por parte de la sociedad, de la influencia mutua entre el océano y la humanidad desde las primeras etapas del aprendizaje, incluyendo los conocimientos sobre el océano a los currículos escolares de manera transversal en las diferentes disciplinas en vez de como un «tema aparte». Porque el océano interconecta el mundo, y es así como creemos que debe conocerse.

Sin embargo, también queremos que esta cultura oceánica movilice una juventud que es cada vez más activista, está más preocupada por el futuro que les espera, tiene la conciencia más despierta y está más dispuesta a promover acciones relacionadas con la protección.

Finalmente, no podemos olvidarnos del público adulto, al que también debemos facilitar el acceso al conocimiento, ya que puede formar parte de proyectos de ciencia ciudadana y acabar convirtiéndose en una parte activa de la investigación y la conservación marina. Al fin y al cabo, todos los segmentos de la sociedad suman para alcanzar el objetivo final, que es que la ciencia y el océano formen parte de la cultura social compartida.

Con este objetivo, el ICM evoluciona como un centro próximo a su entorno, que va más allá de compartir los resultados de la investigación con la sociedad y comienza a escuchar y a generar espacios para dar lugar a una conversación que quiere enriquecer a todas las partes. Queremos que el mundo se ponga las «gafas azules», esta perspectiva desde la que se entiende el vínculo del océano con la vida.

Aún estamos a tiempo

Hace falta un cambio, y ese cambio debe producirse ahora. Aún estamos a tiempo. No hay excusa, disponemos del conocimiento y la tecnología necesarios. Solo nos falta la voluntad, aquella con la que debe llegar la esperanza de que podemos encontrar un lugar permanente en un sistema natural como lo es la Tierra donde vivir, y vivir bien.

«No todo el mundo puede hacerlo todo, pero todo el mundo puede hacer algo para marcar la diferencia», decía Earle, para la que «un mundo sin el océano es un mundo sin nosotros». Por lo tanto, solo nos queda protegerlo. Y por eso necesitamos una gran dosis de interés, aquella que nos haga levantar del sofá y nos impulse a cambiar nuestros hábitos de consumo y, por extensión, nuestra manera de interaccionar con el sistema natural que nos mantiene vivos.

Referencias

Myers R.A., Worm B. 2003. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. Nature, 423(6937): 280-283.

Salazar J., Gili J.-M., Vendrell B. 2022. Cultura oceánica: hacia una sociedad científicamente informada y comprometida con el océano. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 236-238.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14126

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

7.6. Cultura oceánica: hacia una sociedad científicamente informada y comprometida con el océano

Janire Salazar, Josep-Maria Gili, Begoña Vendrell

Conocer y comprender las relaciones entre el océano y nosotros y nosotros con el océano es la esencia del *ocean literacy* (cultura oceánica en castellano). Tiene el objetivo de formar individuos que sean *ocean literate* (que tengan conocimientos sobre el océano, podríamos traducir en castellano) y por tanto, capaces de tomar decisiones informadas y responsables hacia los recursos marinos y la sostenibilidad del océano y por extensión, del mundo.

Este concepto apareció en Estados Unidos en el contexto de un esfuerzo interdisciplinario y su formulación contó con la presencia de representantes de los sectores científico, educativo y político. El objetivo era, después de años en que, tradicionalmente, el océano quedaba excluido de la cultura científica o no estaba adecuadamente representado en los currículos oficiales de la educación formal, producir un marco de referencia consensuado por los diferentes sectores más directamente implicados en la mejora de la cultura oceánica y que dotara a este concepto de contenido específico. Este esfuerzo se alargó desde el año 2002 hasta 2005, en que surgió la publicación con la declaración de los siete principios esenciales (figura 1) y 45 conceptos fundamentales que toda persona debía de conocer y comprender para ser considerada como *ocean literate* (Ocean Literacy Network 2013).

A pesar de que el conocimiento marino puede adquirirse a través de múltiples y diferentes fuentes y maneras, tener un marco de referencia como el publicado en 2005, que actualmente ya está aceptado internacionalmente, permite dar contexto a los esfuerzos divulgativos y educativos. Este aspecto posibilita que sea utilizable por diferentes agentes y que se puedan incluso producir indicadores de evaluación para poder identificar y alcanzar objetivos y, en definitiva, desarrollar estrategias para conseguir objetivos locales y globales en torno a la cultura oceánica.

La adecuación del marco de la *ocean literacy* fue reconocido por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y ya forma parte de las agendas políticas de muchos países que trabajan por mejorar el conocimiento marino.

Figura 1. Los 7 principios esenciales de la cultura oceánica. Fuente: Elaboración propia a partir de *Ocean Literacy Network* (2013).

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. La gymkhana de los mares y océanos es un ejemplo de recurso desarrollado en el ICM que permite trabajar y mejorar la cultura oceánica de los más de 400 participantes, entre alumnado y profesorado, con más de 72 talleres teórico-prácticos y la implicación del personal del ICM.

El papel de los centros de investigación marina en la consecución de la cultura oceánica

Tradicionalmente, el conocimiento marino no ha sido igualitario y se ha visto relegado a ciertos sectores de la población (principalmente a personal científico y naturalista, al sector de la pesca y a miembros de las tripulaciones de embarcaciones). La extensión del conocimiento al resto de sectores se ha podido realizar, parcialmente, a través de la literatura y del saber popular principalmente, este último a menudo generado en localidades costeras y con muchas dificultades para extenderse más allá del territorio local.

Como resultado, a pesar de tener un papel fundamental en el planeta, el océano no ha estado tan presente en la educación formal como quizás tendría que haber estado y esto ha provocado grandes carencias tanto de conocimiento como de competencias actitudinales que impliquen acciones sostenibles y responsables hacia el océano.

Los centros de investigación y las universidades donde se produce ciencia marina, tienen un papel decisivo en los procesos de transferencia de conocimiento. Como espacios donde se genera conocimiento científico, es vital que formen parte de las estrategias para conseguir los objetivos en materia de cultura oceánica. Capacitar de manera adecuada a los centros para que puedan desarrollar actividades con metodologías adecuadas y producir recursos educativos y divulgativos atractivos y efectivos es vital para avanzar hacia una cultura oceánica universal y de calidad.

La experiencia y perspectivas de futuro del Institut de Ciències del Mar

En el Institut de Ciències del Mar (ICM) hay una larga tradición en la creación y desarrollo de contenidos y actividades divulgativas y educativas. Entre los principales recursos generados destacan los diarios de campaña que, con un componente marcadamente divulgativo y carácter vivencial, acercan el conocimiento acompañado por la emoción que despierta la exploración oceánica (Balagué *et al.* 2022). También destaca el proyecto *El Mar a Fons* (https://elmarafons.icm.csic.es/) que se inició en 2010 y con el cual se creó un gran repositorio de contenidos didácticos, juegos educativos, un libro ilustrado, protocolos de actividades de investigación y talleres presenciales, entre otros (figura 2), disponibles de forma pública y gratuita en la página web. Estos y muchos más ejemplos pueden encontrarse en el portal divulgativo de la institución, ICM Divulga (www.icmdivulga.icm.csic.es).

Los objetivos educativos y divulgativos futuros en el ICM no solo exigen seguir ofreciendo recursos y metodologías que permitan la comprensión de los ecosistemas marinos en un entorno cambiante, sino también ir avanzando hacia mejoras de los procesos de transferencia e intercambio con otros actores. Un ejemplo de esto es la participación del ICM en el proyec-

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

to europeo *Responsible Research in Biosciences* (ResBios)[1]. En este proyecto, gracias al aprendizaje mutuo de los participantes, donde se encuentran expertos de diferentes ámbitos del conocimiento que forman parte de instituciones con rasgos diferenciales, pero también comunes, se establecen acciones con el objetivo de consolidarlas institucionalmente y de permitir mejorar la investigación e innovación en clave RRI (*Responsible Research and Innovation*, de sus siglas en inglés). En este marco, el ICM ya está trabajando con centros educativos para formar una red de escuelas marinas que permita debatir y aprender sobre las mejores prácticas educativas para velar por una cultura oceánica universal y de calidad. Con esta red, desde el ICM se está creando un espacio común donde diferentes actores encuentren un espacio cohesionado donde encontrar recursos y buenas prácticas. En el primer curso escolar 2020-2021, a pesar de las dificultades añadidas por la crisis de COVID-19, se ha podido avanzar ya en esta dirección desarrollando una acción formativa piloto a partir de la cual se han recopilado numerosas peticiones y buenas prácticas de los centros participantes que permitirán construir esta primera comunidad teniendo en cuenta los diferentes puntos de vista y casuística de cada centro.

Desde el ámbito de la cultura oceánica a nivel de ciudadanía, también se está trabajando desde el ICM para escuchar cada vez más a la sociedad, para pasar de ser un centro donde principalmente las acciones divulgativas consistían en una transmisión investigador/a-ciudadanía a un centro donde se puedan ir creando espacios y acciones bidireccionales, para poder escuchar e integrar las inquietudes, limitaciones y también oportunidades emergidas desde la sociedad en la investigación marina.

Referencias

Balagué V., Cardelús C., Gili J.-M., *et al.* 2022. El mar explicado desde las campañas oceanográficas. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 239-241

Ocean Literacy Network. 2013. Ocean Literacy: The Essential Principles and Fundamental Concepts of Ocean Sciences for Learners of All Ages Version 2. Washington, DC: National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de: http://oceanliteracy.wp2.coexploration.org

(1) ResBios es un proyecto financiado por el programa de la Comisión Europea H2020 SwafS: ResBios RESponsible research and innovation grounding practices in BIOsciences, Grant Agreement Nº872146.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14127

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

7.7. El mar explicado desde las campañas oceanográficas

Vanessa Balagué, Clara Cardelús, Josep-Maria Gili, Carine Simon, María Vicioso, Magda Vila

Los océanos ocupan casi tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta y afectan a muchos aspectos de nuestra vida, tales como la producción pesquera o la regulación del clima, además del bienestar y ocio de las personas. Sin embargo, esta importancia no se traslada de forma proporcional a los contenidos curriculares que los estudiantes tratarán a lo largo de su etapa educativa y es, habitualmente, desconocida por gran parte de la sociedad.

Seguimiento de campañas oceanográficas en tiempo real

Una forma atractiva de explicar la investigación marina es a través del seguimiento en tiempo real de una campaña oceanográfica. Para ello, los equipos científico-técnicos del Institut de Ciències del Mar (ICM) que se embarcan en las expediciones escriben un diario de campaña donde se cuentan aspectos científicos del océano, cómo se lleva a cabo esta ciencia y cómo se vive en un buque oceanográfico (Simó 2017). En algunas campañas se invita de forma específica a los centros educativos, con el objetivo de ponerles en contacto directo con el personal científico y técnico y para que, guiados por sus profesores, puedan aplicar los contenidos curriculares a las ciencias marinas de una forma vivencial y transversal. A veces, el personal del ICM implicado complementa el diario con recursos didácticos teóricos que se completan con actividades educativas, propuestas experimentales y con la posibilidad de realizar preguntas al personal científico-técnico embarcado, ya sea a través de la web o con conexiones en tiempo real. Esta metodología también se complementa con la realización de charlas en centros educativos, formación del profesorado o visitas guiadas a los buques oceanográficos. Los diarios de campaña, así como las preguntas de los escolares y las respuestas del personal embarcado, quedan a disposición del público, acercando los contenidos a la ciudadanía de una forma amena y rigurosa.

El origen de este trabajo lo encontramos a partir del año 2000 en una serie de campañas oceanográficas (Antártida 2000 y 2003, Hawaii 2001 y Ártico 2004) cuyos diarios fueron publicados en la web del AGAUR (Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca). Posteriormente, estos cuadernos se siguieron publicando en la vigente web de Recerca en Acció (http://www.recercaenaccio.cat/) de la Fundació Catalana per a la Recerca i la Innovació (FCRI) y en la actualidad se están recuperando para volcarse en DIGITAL.CSIC, el repositorio del Consejo Superior de Investigaciones Científicas que preserva y difunde en acceso abierto los resultados de investigación del CSIC (figura 1).

El mar alcanza las aulas

A partir de 2004, desde el ICM y a través de la web ICM Divulga (http://icmdivulga.icm.csic.es/expedicions/), se ha realizado el seguimiento de treinta y cuatro campañas oceanográficas, convirtiéndose, desde 2015, en una tarea esencial de nuestras expediciones, siendo pioneros en esta iniciativa. Siete de las 18 campañas realizadas

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

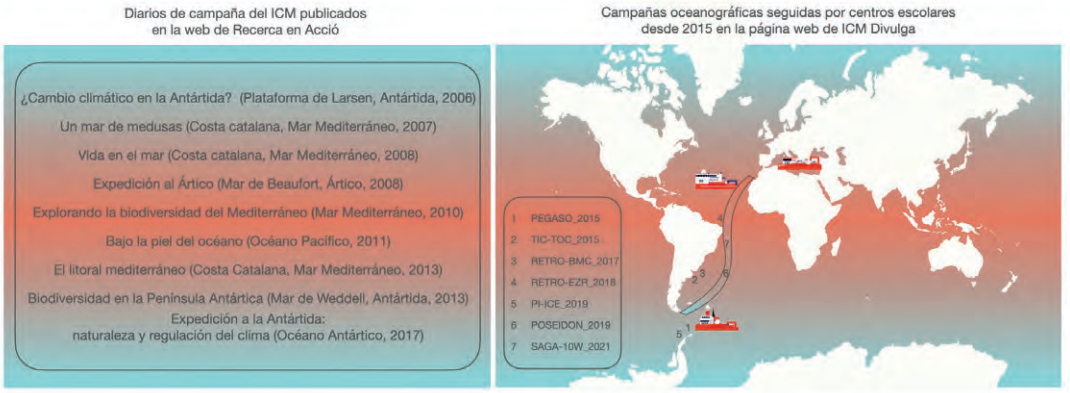


Figura 1. Relación de las campañas oceanográficas del ICM publicadas en la web de la Fundació Catalana per a la Recerca i la Innovació y las seguidas por los centros escolares en la web ICM Divulga desde 2015. Ilustraciones de los barcos oceanográficos: SHOOK Studio para el proyecto *Petits Oceanògrafs*.

desde 2015 (figura 1) han sido seguidas de forma específica por treinta y ocho centros escolares (veintinueve escuelas y nueve institutos que comprenden diecisiete localidades, principalmente de Cataluña), llegando a un total de 2227 estudiantes e involucrando a ochenta y ocho personas de los equipos científicos-técnicos del ICM (figura 2).

Los niveles educativos participantes en el seguimiento abarcan las etapas de educación infantil, primaria y secundaria en su totalidad, aunque desde los centros se dirige principalmente a los cursos comprendidos entre 4º de primaria y 2º de la ESO. En algunos casos, el seguimiento se ha llevado a cabo desde escuelas de alta complejidad o desde las aulas de acogida, valorándose por los profesores como una alternativa educativa muy potente para este tipo de alumnado.

A través de la divulgación de campañas oceanográficas se tratan diferentes temas científicos, desde una perspectiva vivencial, transversal e interdisciplinar (Pedrós-Alió 2017). Los contenidos abarcan disciplinas como las ciencias de la vida y de la Tierra (física, química, biología, geología, ciencias marinas, astronomía), la geografía e historia, la náutica, el arte o el lenguaje. Por otra parte, también se comentan asuntos relacionados con la logística y los sistemas de comunicación propios de un buque oceanográfico o de las bases antárticas, así como las diferentes profesiones de las personas ligadas a la campaña. Finalmente, se abordan temas desde una perspectiva psicológica o social que incluyen cuestiones relacionadas con las colaboraciones científicas, el trabajo en equipo o la convivencia, y cuestiones de relevancia actual tales como la contaminación marina, la emergencia climática o el papel de la mujer en la ciencia.

Toda esta información puede consultarse en la página web de ICM Divulga, desde donde

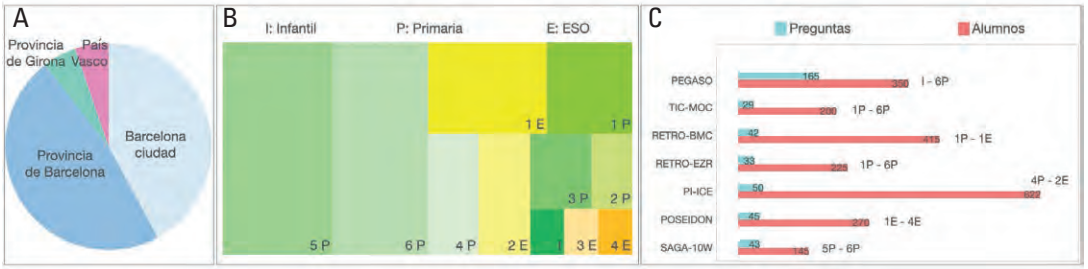


Figura 2. Resultados del seguimiento de las campañas oceanográficas por los centros escolares (ICM Divulga desde 2015) según su localización (A), los niveles educativos que han participado (B) y el número de alumnos y las preguntas realizadas según los niveles educativos en cada campaña (C). Atendiendo al personal embarcado implicado en los diarios, en varios proyectos se limitó el número máximo de preguntas a cincuenta.

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

se realiza la difusión y seguimiento de las campañas, y los contenidos completos pueden descargarse desde DIGITAL.CSIC. Esta difusión se refuerza con noticias puntuales en los canales de Twitter o Instagram del ICM. Los centros escolares también hacen difusión a través de sus plataformas con el objetivo de canalizar esta experiencia a toda la comunidad educativa. Algunas de estas iniciativas han recibido premios, como la web SotaZero que recibió el Premio *eLearning Awards* 2004 (*European Schoolnet* de la Unión Europea) por el diario de campaña antártica ANT XXI/2 (2003-2004). Finalmente, la mayoría de centros utilizan los trabajos escolares alrededor de las campañas oceanográficas para exponerlos en sus jornadas de puertas abiertas, viendo esta actividad como un valor añadido a sus proyectos educativos.

Educación y sensibilización mediante los diarios de campaña

Esta experiencia se ha valorado como un recurso pedagógico valioso ya que posibilita, gracias a la complicidad entre las comunidades docente y científica, introducir el estudio del mar en las aulas, habitualmente olvidado en los contenidos curriculares educativos, bajo una perspectiva «no-formal» (Gasol 2004). En muchas ocasiones, los estudiantes se han convertido en unos expedicionarios más, desarrollando incluso experimentos científicos paralelos a los propuestos durante la expedición. Se concreta además como un instrumento transversal aplicable a todos los niveles de la etapa educativa, en especial de ocho a catorce años. Una de las experiencias más gratificantes de los diarios de campaña es poder compartir «en directo y desde alta mar», a través de las preguntas, las vivencias y los resultados entre el equipo embarcado y los participantes, promoviendo la curiosidad, el diálogo, la reflexión, el espíritu crítico y el interés por la ciencia y sus métodos en una etapa clave para el desarrollo escolar y personal, a la vez que visibiliza la figura de los profesionales que estudian el mar, en especial el papel de las mujeres en la oceanografía actual. Se valora también muy favorablemente la preocupación que el alumnado ha manifestado por el estado de los océanos. La sensibilidad ambiental debe tratarse eficazmente desde los primeros niveles educativos. Una juventud que conozca el mar desde su etapa formativa aprenderá a respetarlo, perfilándose como actores activos implicados en su conservación.

El resultado del seguimiento de campañas oceanográficas siempre ha sido positivo, tanto para los centros educativos como para el personal investigador, quienes disfrutan de la oportunidad de dar a conocer su trabajo y la investigación que se lleva a cabo en el ICM, fomentando el aprendizaje simultáneo entre el equipo científico-técnico, escuelas y sociedad.

Agradecimientos: Elisabetta Broglio ha sido la impulsora del seguimiento de campañas oceanográficas desde ICM Divulga en sus inicios. Queremos agradecer a todo el personal científico y técnico que ha dedicado un rato de su valioso tiempo en campaña a escribir en los diarios, contestar preguntas o revisar textos, con rigor científico y entusiasmo por su trabajo y la divulgación del mismo. Las campañas cuyos resultados se presentan en este trabajo han sido financiadas por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. El proyecto de la FECYT *Petits Oceanògrafs* (https://petitsoceanografs.icm.csic.es) incluye el seguimiento de campañas oceanográficas dentro de sus objetivos y cinco de las campañas presentadas han sido seguidas específicamente por escuelas participantes en este proyecto.

Referencias

Gasol J. M. 2004. Des de la torre d'ivori del científic. Suplement GUIX 12.

Pedrós-Alió C. 2017. Bajo la piel del océano. Plataforma Editorial. 265 pp.

Simó R. 2017. Mar, gel i cel (diari antàrtic). Edició Núvol. http://icmdivulga.icm.csic.es/icmdivulga/icm/mar_gel_i_cel.pdf

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14128

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

7.8. Observadores del Mar: ciencia ciudadana marina como motor transformador

María Vicioso, Paula López, Sandra Espeja, María García, Gemma Agell, Macarena Marambio, Joaquim Garrabou

El mundo, como el océano, es global e interconectado. Ante la crisis social, sanitaria y climática actual a la que nos enfrentamos, se hace evidente la interrelación de la humanidad, en un contexto en el que solo de forma colectiva conseguiremos afrontar los retos del presente y avanzar hacia un futuro más sostenible y justo para las personas y los ecosistemas. Así como las corrientes oceánicas transfieren calor hacia los polos de la Tierra y distribuyen los nutrientes esenciales para la vida en los océanos, las corrientes e iniciativas sociales constituyen una potencia transformadora capaz de atravesar fronteras y cambiar realidades.

La ciencia ciudadana se presenta en este contexto como una de esas corrientes que atraviesan los conceptos establecidos y se posicionan como palancas de cambio. La ciencia ciudadana es un término amplio que se refiere a la participación del público no especializado en las actividades de investigación científica mediante su esfuerzo intelectual o conocimiento, con sus herramientas o recursos, según define el Libro Blanco de la Ciencia Ciudadana (Serrano Sanz *et al.* 2014). La definición de Caren Cooper, reconocida impulsora de ciencia ciudadana en ecología, es sin embargo más certera a la hora de evocar su impacto real: «la ciencia ciudadana es el movimiento que nos reta a repensar cómo se genera el conocimiento, quién lo genera, dónde ocurre y a quién sirve». De esta manera, las prácticas de ciencia ciudadana se establecen como un cambio de paradigma en el que la investigación científica no solo ocurre entre las paredes de la academia ni la desarrollan científicos y científicas, sino que ocurre en muchos más espacios y con muchos más colectivos de forma simultánea, impulsando nuevos diálogos y redes colaborativas.

Transformar la sociedad con ciencia

Las iniciativas en ciencia ciudadana pueden proveer de herramientas, formación e implicación de otras comunidades, además de la científica, desde donde explotar los beneficios mutuos de compartir el conocimiento tradicional. Tiene el potencial de poder consolidarse como un instrumento de transformación social al democratizar la generación de conocimiento haciéndolo de forma colectiva y abierta, fomentando una sociedad capaz de tomar decisiones informadas.

El océano y los mares proporcionan recursos y espacio vital a más de un tercio de la población mundial y a la vez son objeto de importantes impactos, consecuencia del cambio climático y las actividades humanas. En este contexto, las iniciativas de ciencia ciudadana, además de constituirse como una fuente de conocimiento que amplía las escalas temporal y espacial habituales, son un canal de sensibilización social frente a problemáticas ambientales, que fomenta e incrementa la cultura oceánica o *Ocean Literacy* (Salazar *et al.* 2022), necesaria para que el océano sea reconocido y valorado por su papel esencial para la humanidad y para la sostenibilidad del planeta. Es y será la manera de tender puentes entre diversos agentes

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 1. La ciencia ciudadana marina establece canales de participación y comunicación entre diferentes agentes claves para la conservación marina. Autor: Jordi Regás.

científicos, políticos y sociales, enriqueciendo una conversación que sirva para establecer medidas de conservación más eficaces, con mayor aceptación y calado social. Sin embargo, puede toparse con obstáculos en su implementación. A diferencia de los ecosistemas terrestres, con una mayor trayectoria en la unión de ciudadanía con vocación naturalista que colabora reportando observaciones (como proyectos de observaciones de aves o mariposas, que cuentan con largo recorrido), en los ecosistemas marinos, con un acceso más restringido, y al que la ciudadanía difícilmente puede contribuir más allá de las zonas costeras, la ciencia ciudadana marina tiene mucho camino todavía por recorrer (Garcia-Soto *et al.* 2017).

Observar el mar con la ciudadanía

Observadores del Mar es uno de estos caminos trazados gracias al esfuerzo colaborativo y constante. Nace de la necesidad de las personas de comunicar lo que veían en el mar, de reunir la experiencia de amantes del mar, habitantes de la costa y colectivos como los pescadores o buceadores, testigos de los cambios en los ecosistemas marinos y costeros. Desde 2012, Observadores del Mar se establece como una plataforma de proyectos que reúne las aportaciones de la población en torno a problemáticas marinas como las alteraciones en la biodiversidad y los hábitats; la evolución de poblaciones de especies vulnerables o amenazadas; los efectos del cambio climático sobre el medio marino; la llegada y expansión de especies exóticas o la presencia de basura marina, y las pone a disposición de la comunidad científica y la sociedad. Comienza de la mano de investigadores e investigadoras del Institut de Ciències del Mar, quienes validan y aportan rigor a la información recopilada, a quienes rápidamente se sumaron equipos de otros centros marinos del CSIC como el Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CEAB) y el Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA), quienes hoy en día co-coordinan el proyecto; así como otros centros de investigación y universidades. Observadores del Mar ha continuado su evolución, perseverando a lo largo de los años, con etapas de más y menos recursos, manteniendo siempre viva la confianza en su potencial

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

transformador. Hoy en día, cuenta con más de noventa personas en los equipos científicos, más de tres mil observadores y observadoras, y más de trescientas entidades diversas como universidades, oenegés y clubs de buceo. Ha establecido alianzas con la Fundación Biodiversidad –en el marco del proyecto INTEMARES– y con la Fundación Marilles en Baleares, y establece canales de transferencia de conocimiento a las administraciones para fortalecer la conservación marina con la colaboración de la ciudadanía. A las puertas de su décimo aniversario, Observadores del Mar se posiciona como una plataforma de ciencia ciudadana marina de referencia en España y continúa generando sinergias, participando activamente en el crecimiento de esa comunidad que comparte el objetivo común de trabajar por un océano más saludable.

En la Década de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (Salvo 2022), establecida por las Naciones Unidas para el periodo 2021-2031, se marca como reto la expansión del sistema de observación del océano; distribuir datos, conocimiento y tecnología; y cambiar la relación de la humanidad con el océano (Barbière *et al.* 2020). La ciencia ciudadana marina y Observadores del Mar contribuyen a superar estos retos y conseguir un océano transparente, con datos, tecnologías y herramientas de acceso abierto; e inspirador, donde la sociedad entienda y valore el vínculo de la humanidad con el océano.

Referencias

Barbière J., Rigaud J., Soriano P., Bonotto E., Lindoso V. (eds). 2020. The Science we Need for the Ocean We Want: The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030). 2020. IOC Brochure 2020-4 (IOC/BRO/2020/4). 20 pp.

Garcia-Soto C., van der Meeren G., Busch J., *et al.* 2017. Advancing Citizen Science for Coastal and Ocean Research. Position Paper 23 of the European Marine Board, Ostend, Belgium, V., Kellett, P., Delany, J., McDonough, N. (eds.), ISBN: 978-94-92043-30-6. 112 pp.

Salazar J., Gili J.M., Vendrell B. 2022. Cultura oceánica: Hacia una sociedad científicamente informada y comprometida con el océano. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 236-238

Salvo V.S. 2022. Ocean Decade. Un decenio para trabajar en redes hacia la gobernanza participativa. En: Pelegrí J.L., Gili J.M., Martínez de Albéniz M.V. (eds.), El océano que queremos: ciencia oceánica inclusiva y transformadora. Institut de Ciències del Mar, CSIC. Barcelona. pp. 228-230

Serrano Sanz F., Holocher-Ertl T., Kieslinger B., *et al.* 2014. White Paper on Citizen Science for Europe. Socientize Consortium.

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14129

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

7.9. Rigurosidad artística y creatividad científica

Vanessa Balagué, Anna Rierola, María Vicioso

La búsqueda de metáforas comunes para entender el mundo que nos rodea viene de antiguo. A lo largo de la historia de la humanidad hay numerosos ejemplos donde disciplinas aparentemente tan alejadas como la astronomía, la filosofía o la poesía han permeabilizado sus fronteras para la construcción de nuevo conocimiento y pensamiento. Pero a partir del siglo XVII, el progreso científico se centra en el uso de la razón y de las disciplinas exclusivamente académicas, y bajo las visiones cartesiana y mecanicista newtoniana se tiende a la especialización, a la fragmentación del conocimiento y al rechazo de los saberes no reglados. A pesar de la herencia del pensamiento clásico y moderno, el actual contexto de cambio global que acompaña el inicio del siglo XXI nos obliga a repensarnos como individuos y como colectivo, en un planeta donde naturaleza y sociedad están intra- e interconectadas, haciendo necesario un retorno al solapamiento entre los diferentes ámbitos del conocimiento. La ciencia, la filosofía y el arte vuelven a dialogar, difuminan los límites y negocian nuevas prácticas creativas de investigación (Hustvedt 2020).

Cambio de paradigma en el arte y ciencia contemporáneos

Durante el último tercio del siglo XX se produce un gran cambio de paradigma en el arte contemporáneo: la hegemonía de las Bellas Artes entra en crisis y empieza un periodo donde la investigación y la experimentación en las metodologías y los procedimientos se ponen en el centro de los proyectos artísticos y al servicio de las ideas que el artista quiere transmitir, mensajes generalmente ligados a los movimientos sociales y políticos del momento. También cambian las formas de expresión artística: el apoyo plástico y material ya no es imprescindible y aparecen nuevos lenguajes como el arte de acción, las artes sonoras y visuales o la performance. El arte ya no se fundamenta solo en la inspiración y su finalidad ya no es solo el goce o la emoción, sino que es un acto intelectual, con una función social transformadora, y se basa en la investigación, la experimentación y en el trabajo riguroso.

Otro cambio de paradigma también aparece en el mundo científico en la misma época, ligado a fenómenos como el movimiento ecologista o la era espacial. Los científicos y científicas se encuentran en la necesidad de transmitir los conocimientos adquiridos hacia la sociedad y aparecen, en paralelo en la investigación científica, la divulgación y la comunicación de la ciencia, en parte como estrategia para iniciar mecanismos como la protección ambiental o trasladar cuestiones de salud pública, pero también con la voluntad de tener una sociedad más culta y más masa crítica para participar en la construcción de los ejes vertebradores de nuestro futuro. Para hacerlo se recurre en un inicio a formatos clásicos como el documental, la charla o el artículo divulgativo, pero poco a poco los científicos hacen uso de nuevos formatos para llegar a nuevos públicos. En el último congreso de Comunicación Social de la Ciencia (Burgos 2019) se mostraron formas de explicar los conceptos abstractos de la ciencia a través de las artes escénicas, el cine, el juego, la música, la literatura, las exposiciones no convencionales o el *street art*. La finalidad de la ciencia, pues, no se limita solo

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Figura 1. Diálogos entre música, danza, arte y ciencia en la inauguración de la exposición *Bosque Ancestral* de Anna Rierola (2017) en el Centre Mediterrani d'Investigaciones Marines i Ambientals (CMIMA).

a descubrir, entender y explicar los hallazgos entre los colegas de profesión, sino también a compartir el conocimiento con una sociedad cada vez más participativa y con la voluntad de estar mejor informada.

De forma muy general se puede concluir que el rigor y la creatividad son valores compartidos entre ciencia y arte. Para ilustrarlo con dos ejemplos muy concretos: las libretas de artista de Fina Miralles son verdaderas libretas de laboratorio, mientras que no se puede negar la estética visual y conceptual, ni la capacidad inspiradora de teorías científicas recientes como Gaia de James Lovelock o la Simbiogénesis de Lynn Margulis. Más allá de estos ejemplos, las preguntas, los conflictos, las ideas, la curiosidad, el rigor, la creatividad y la investigación son los motores que propician tanto en el arte como en la ciencia contemporáneos la transformación y la construcción del conocimiento y del pensamiento (Tafalla 2011).

Art&Science y *Bosque Ancestral*

Actualmente, de la búsqueda para crear saberes globales, surge el movimiento *Art&Science (ArtSci):* una nueva corriente colaborativa que reúne una comunidad de artistas, científicos, tecnólogos, programadores, filósofos y agentes culturales donde se generan alianzas enriquecedoras para llevar a cabo proyectos interdisciplinarios. Hay científicos que han encontrado en el arte una forma de representar sus datos y ligarlos a un mensaje ambiental, político o social, o bien artistas que encuentran en la ciencia su motor de inspiración, el material de partida y el apoyo teórico de sus trabajos. Centros como el CCCB o el Arts Santa Mònica, o festivales como el Sónar, Eufònic, Llum BCN o el Ars Electronica, se han convertido en escaparates de estas nuevas interacciones (Kourochkina 2021).

Dentro de estas sinergias nace *Bosque Ancestral*, la primera obra de gran formato surgida de la colaboración entre la artista visual focalizada en imágenes científicas Anna Rierola,(1) la asesoría científico-técnica del Institut de Ciències del Mar (ICM) y el Servicio de Microscopía Electrónica y Óptica del ICM-CSIC.(2) La exposición (figura 1) se acompañó de paneles divulgativos y un ciclo de conferencias en torno a los protagonistas del mural: los microorganismos marinos y su papel crucial en el planeta.(3) Esta exposición temporal dio lugar en 2019 a un mural exterior de sesenta metros que recubre la fachada de la sede del ICM y se ha convertido en una identidad visual del centro, una ventana más para la ciudad y sus visitantes (figura 2). Reflejando el mar de la playa del Somorrostro de Barcelona, muestra que en la invisibilidad e inmensidad marina hay la esencialidad de los procesos que sustentan la vida en la Tierra y es esta conciencia la que nos tiene que ayudar a dejar atrás la era del Antropoceno.

Diálogos interdisciplinares y heterogéneos, motores de transformación social

Los mares y océanos son motor de cambio y de vida. Todo lo que pasa en la tierra está conec-

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Figura 2. *Bosque Ancestral* de Anna Rierola (2019), mural creado a partir de imágenes de microscopía electrónica de microorganismos marinos cedidas por el Institut de Ciències de Mar, y de nanomateriales y polímeros sintéticos, cedidas por el Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia.

tado con el mar: el intercambio de energía, de materia y de información. En el actual contexto de cambio global, es crucial que la ciudadanía entienda y conozca estos procesos, pues solo desde el conocimiento se pueden activar los sistemas de sensibilización y de acción colectiva. Llegar a todo el mundo no es fácil y pasa por explorar nuevos formatos de diseminación del conocimiento, colaborando con profesionales de otros campos. Una opción es el establecimiento de residencias artísticas en centros de investigación científica, fomentando la cocreación, más allá de la asesoría o la cesión de datos; o la promoción de espacios de debate y reflexión común, con una participación heterogénea en cuanto a las disciplinas, a las generaciones, a los actores sociales y culturales, donde desde el respeto mutuo, se puedan seguir encontrando metáforas comunes para entender y explicar el mundo y nuestra forma de estar y de habitarlo. La apuesta de un instituto de investigación de excelencia como el ICM para seguir impulsando este tipo de colaboraciones rigurosas y creativas con artistas y pensadores, es fundamental para retroalimentarnos y ensanchar los canales de transmisión y los públicos receptores de nuestros mensajes y valores (figura 2).

Agradecimientos. Agradecemos a José Manuel Fortuño, responsable del Servicio de Microscopía Electrónica y Óptica del Institut de Ciències del Mar (CSIC), su mirada única para captar la belleza escondida dentro del océano invisible y por ceder las imágenes que componen *Bosque Ancestral*. Agradecemos el asesoramiento científico para la elaboración del contenido divulgativo que acompañó la exposición *Bosque Ancestral* a Elisa Berdalet, Clara Cardelús, Lluïsa Cros, José Manuel Fortuño, Esther Garcés, Josep M. Gasol, Ramon Massana, Carles Pedrós-Alió, Rafel Simó y Dolors Vaqué.

Referencias

Hustvedt S. 2020. La dona que mira els homes que miren les dones. Assajos sobre feminisme, art i ciència. Edicions 62, Barcelona. 407 pp.

Kourochkina T. 2021. Un recorrido por la Barcelona *ArtSci*. https://www.lavanguardia.com/cultura/culturas/20210211/6240279/recorrido-barcelona-artsci.html

Tafalla M. 2011. Problemes filosòfics que planteja l'estètica de la natura. Actes del Primer Congrés Català de Filosofia. Edició de l'Institut d'Estudis Catalans i la Societat Catalana de Filosofia, pp. 580-592.

(1) http://www.annarierola.com/ancestral-forest-mural/

(2) https://www.icm.csic.es/en/service/electron-and-optical-microscopy

(3) http://icmdivulga.icm.csic.es/bosc-ancestral/?lang=ca

DOI: https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14130

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Foto: Josep-Maria Gili

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados

Índice de autores

Abad, Maravillas	SCT, ICM, CSIC, labnutri@cmima.csic.es
Abelló, Pere	GI ECRMV, ICM, CSIC, pabello@icm.csic.es
Acinas, Silvia G.	GI EMM, ICM, CSIC, sacinas@icm.csic.es
Afán, Isabel	EBD, CSIC, isabelafan@ebd.csic.es
Agell, Gemma	CEAB, CSIC, gemma@ceab.csic.es
Aguzzi, Jacopo	GI FVEM, ICM, CSIC, jaguzzi@icm.csic.es
Alcaraz, Miquel	ICM, CSIC, miquel@icm.csic.es
Alonso, Belén	GI MC, ICM, CSIC, belen@icm.csic.es
Ambroso, Stefano	GI EREBOC, ICM, CSIC, ambroso@icm.csic.es
Arín, Laura	GI EPSO, ICM, CSIC, larin@icm.csic.es
Baena, Patricia	GI EREBOC, ICM, CSIC, baena@icm.csic.es
Bahamon, Nixon	GI FVEM, ICM, CSIC, n.bahamon@csic.es
Balagué, Vanessa	GI EMM, ICM, CSIC, vbalague@icm.csic.es
Ballabrera, Joaquim	GI OFT, ICM, CSIC, joaquim@icm.csic.es
Ballesteros, Ainara	GI EREBOC, ICM, CSIC, ballesteros@icm.csic.es
Bardají, Raúl	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, bardaji@icm.csic.es
Bartolomé, Rafael	GI BCSI, ICM, CSIC, rafael@cmima.csic.es
Berdalet, Elisa	GI EPSO, ICM, CSIC, berdalet@icm.csic.es
Bernal, Ainhoa	GI ECRMV, ICM, CSIC, bernal@icm.csic.es
Biel, Marina	GI EREBOC, ICM, CSIC, marinabiel@icm.csic.es
Blázquez, Mercedes	GI FVEM, ICM, CSIC, blazquez@icm.csic.es
Bramanti, Lorenzo	LECOB, philebo@gmail.com
Bravo, Andrea G.	GI EMM, ICM, CSIC, andrea.bravo@icm.csic.es
Cabrera-Brufau, Miguel	GI EPSO, ICM, CSIC, cabrera@icm.csic.es
Calbet, Albert	GI EPSO, ICM, CSIC, acalbet@icm.csic.es
Calvo, Eva	GI BMAC, ICM, CSIC, ecalvo@icm.csic.es
Camp, Jordi	GI PBL, ICM, CSIC, jcamp@icm.csic.es
Cardelús, Clara	GI EMM, ICM, CSIC, ccardelus@icm.csic.es
Carreras, Marc	PIV, UdG, marc.carreras@udg.edu
Casas, David	GI MC, ICM, CSIC, davidcasas@icm.csic.es
Castellón, Arturo	UTM, CSIC, arturoc@utm.csic.es
Cermeño, Pedro	GI EPSO, ICM, CSIC, pedrocermeno@icm.csic.es
Chang, Paul	CSAR (NOAA STAR), USA, paul.s.chang@noaa.gov
Coll, Marta	GI FVEM, ICM, CSIC, mcoll@icm.csic.es
Colmenero, Ana I.	GI ECRMV, ICM, CSIC, colmenero@icm.csic.es
Company, Joan B.	GI FVEM, ICM, CSIC, batista@icm.csic.es
Corbera, Guillem	GI EREBOC, ICM, CSIC, guillemcorb@gmail.com
Cornejo-Castillo, Francisco M.	GI BMAC, ICM, CSIC, fmcornejo@icm.csic.es
Cossu, Federico	GI OFT, ICM, CSIC, cossu@icm.csic.es

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Dall'Osto, Manuel	GI BMAC, ICM, CSIC, dallosto@icm.csic.es
de Juan, Silvia	GI ECRMV, ICM, CSIC, sdejuan@icm.csic.es
del Río, Joaquín	SARTI-MAR, UPC, joaquin.del.rio@upc.edu
Demestre, Montserrat	GI ECRMV, ICM, CSIC, montse@icm.csic.es
Díez, Susana	UTM, CSIC, sdiez@utm.csic.es
Donoso, Silvia	DBMO, ICM, CSIC, donoso@icm.csic.es
Durán, Ruth	GI PBLO, ICM, CSIC, rduran@icm.csic.es
Emelianov, Mikhail	GI OFT, ICM, CSIC, mikhail@icm.csic.es
Ercilla, Gemma	GI MC, ICM, CSIC, gemma@icm.csic.es
Espasandín Soneira, Lucía	GI FVEM, ICM, CSIC, luciaes293@gmail.com
Espeja, Sandra	Fundación Marilles, sandra.espeja@marilles.org
Estrada, Marta	GI EPSO, ICM, CSIC, marta@icm.csic.es
Estrada, Ferran	GI MC, ICM, CSIC, festrada@icm.csic.es
Figuerola, Blanca	GI EREBOC, ICM, CSIC, figuerola@icm.csic.es
Flo, Eva	GI PBL, ICM, CSIC, evaflo@icm.csic.es
Fortuño, José Manuel	SCT, ICM, CSIC, jmanuel@icm.csic.es
Gabarró, Carolina	GI OFT, ICM, CSIC, cgabarro@icm.csic.es
Galí, Martí	GI BMAC, ICM, CSIC, mgali@icm.csic.es
Galiana, Savitri	GI LPGSSO, ICM, CSIC, galiana@icm.csic.es
Galimany, Eve	GI ECRMV, ICM, CSIC, galimany@icm.csic.es
Garcés, Esther	GI PBL, ICM, CSIC, esther@icm.csic.es
García, María	CEAB, CSIC, maria@ceab.csic.es
García, José Antonio	GI FVEM, ICM, CSIC, jagarcia@icm.csic.es
García, Xavier	GI LPGSSO, ICM, CSIC, xgarcia@icm.csic.es
García-Comas, Carmen	GI EPSO, ICM, CSIC, cgcomas@icm.csic.es
Garcia-de-Vinuesa, Alfredo	GI ECRMV, ICM, CSIC, agvinuesa@icm.csic.es
García-Ladona, Emilio	GI OFT, ICM, CSIC, emilio@icm.csic.es
García-Olivares, Antonio	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, agolivares@icm.csic.es
Garrabou, Joaquim	GI EREBOC, ICM, CSIC, garrabou@icm.csic.es
Gasol, Josep M.	GI EMM, ICM, CSIC, pepgasol@icm.csic.es
Gili, Josep-Maria	GI EREBOC, ICM, CSIC, gili@icm.csic.es
Giménez, Joan	GI FVEM, ICM, CSIC, joan.gimenez@csic.es
Giner, Caterina R.	GI EPSO, ICM, CSIC, caterina@icm.csic.es
Gomariz, Spartacus	SARTI-MAR, UPC, spartacus.gomariz@upc.edu
González Haro, Cristina	GI OFT, ICM, CSIC, cgharo@icm.csic.es
González-Gambau, Verónica	GI OFT, ICM, CSIC, vgonzalez@icm.csic.es
Grieco, Giuseppe	ISMAR-CNR, giuseppe.grieco@cnr.it
Grinyó, Jordi	GI EREBOC, ICM, CSIC, grinyo@icm.csic.es
Güell, Queralt	GI BMAC, ICM, CSIC, queraltguell@icm.csic.es
Guerrero, Elena	GI EREBOC, ICM, CSIC, eguerrero@icm.csic.es
Guillén, Jorge	GI PSLO, ICM, CSIC, jorge@icm.csic.es
Gutt, Julian	AWI, Julian.Gutt@awi.de
Hoareau, Nina	GI OFT, ICM, CSIC, nhoareau@icm.csic.es

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Isern-Fontanet, Jordi	GI OFT, ICM, CSIC, jisern@icm.csic.es
Isla, Enrique	GI PSLO, ICM, CSIC, isla@icm.csic.es
Jelenak, Zorana	CSAR (NOAA STAR), Zorana.Jelenak@noaa.gov
Lin, Wenming	NUIST, wenminglin@nuist.edu.cn
Liñán, Sonia	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, slinan@icm.csic.es
Lloret, Maribel	SCT, ICM, CSIC, maribel@cmima.csic.es
Logares, Ramiro	GI EMM, ICM, CSIC, logares@icm.csic.es
López, Paula	GI EREBOC, ICM, CSIC, plopez@icm.csic.es
Makarova, Eugenia	GI OFT, ICM, CSIC, makarova@icm.csic.es
Marambio, Macarena	GI EREBOC, ICM, CSIC, marambio@icm.csic.es
Marco-Herrero, Elena	COC, IEO, CSIC, elena.marco@ieo.es
Marrasé, Cèlia	GI EPSO, ICM, CSIC, celia@icm.csic.es
Martínez Batalla, Elena	UDC, ICM, CSIC, elenamb@icm.csic.es
Martínez de Albéniz, Maria Victoria	SG, *Scientia Marina*, ICM, CSIC, marivi@icm.csic.es
Masmitja, Ivan	GI MC, ICM, CSIC, masmitja@icm.csic.es
Massana, Ramon	GI EMM, ICM, CSIC, ramonm@cmima.csic.es
Mir-Arguimbau, Joan	GI ECRMV, ICM, CSIC, joanmir@icm.csic.es
Montseny, Maria	GI EREBOC, ICM, CSIC, montseny@icm.csic.es
Navarro, Joan	GI FVEM, ICM, CSIC, joan@icm.csic.es
Olivar, M. Pilar	GI ECRMV, ICM, CSIC, polivar@icm.csic.es
Olivé Abelló, Anna	GI OFT, ICM, CSIC, aolive@icm.csic.es
Olmedo, Estrella	GI OFT, ICM, CSIC, olmedo@icm.csic.es
Orúe-Echevarría, Dorleta	GI OFT, ICM, CSIC, dorleta.orue@gmail.com
Palanques, Albert	GI PBLO, ICM, CSIC, albertp@icm.csic.es
Palomera, Isabel	ICM, CSIC, palomera@gmail.com
Pedrós-Alió, Carlos	CNB, CSIC, cpedros@cnb.csic.es
Pelegrí, Josep Lluís	GI OFT, ICM, CSIC, pelegri@icm.csic.es
Pelejero, Carles	GI BMAC, ICM, CSIC, pelejero@icm.csic.es
Peters, Francesc	GI EPSO, ICM, CSIC, cesc@icm.csic.es
Piera, Jaume	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, jpiera@icm.csic.es
Piferrer, Francesc	GI BR, ICM, CSIC, piferrer@icm.csic.es
Pita, Lucía	GI BMAC, ICM, CSIC, lpita@geomar.de
Polverari, Federica	JPL (NASA), federica.polverari@jpl.nasa.gov
Portabella, Marcos	GI OFT, ICM, CSIC, portabella@icm.csic.es
Puga, Maria Gracia	DBMO, ICM, CSIC, mgracia@icm.csic.es
Puig, Pere	GI PSLO, ICM, CSIC, ppuig@icm.csic.es
Pujol, Núria	UTM, CSIC, npujol@utm.csic.es
Quirós, Lucía	GI LPGSSO, ICM, CSIC, quiros@icm.csic.es
Rabaneda, Albert S.	GI OFT, ICM, CSIC, arabaneda@icm.csic.es
Ramírez, Francisco	GI FVEM, ICM, CSIC, ramirez@icm.csic.es
Ramón, Montserrat	GI ECRMV, ICM, CSIC, mramon@icm.csic.es

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Raya, Vanessa	GI ECRMV, ICM, CSIC, vraya@icm.csic.es
Recasens, Laura	GI ECRMV, ICM, CSIC, laura@icm.csic.es
Reñé, Albert	GI PBL, ICM, CSIC, albertrene@icm.csic.es
Rierola, Anna	Artista visual, ar@annarierola.com
Rodero, Carlos	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, rodero@icm.csic.es
Rodríguez, Pablo	UTM, CSIC, pablo@utm.csic.es
Romera-Castillo, Cristina	GI BMAC, ICM, CSIC, crisrc@icm.csic.es
Rotllant, Guiomar	GI FVEM, ICM, CSIC, guio@icm.csic.es
Ruiz-González, Clara	GI EMM, ICM, CSIC, clararg@icm.csic.es
Sabatés, Ana	GI ECRMV, ICM, CSIC, anas@icm.csic.s
Sagristà, Sònia	OAI, ICM, CSIC, ssagrista@icm.csic.es
Saiz, Enric	GI EPSO, ICM, CSIC, enric@icm.csic.es
Sala, Maria Montserrat	GI EMM, ICM, CSIC, msala@icm.csic.es
Salat, Jordi	ICM, CSIC, salat@icm.csic.es
Salazar, Janire	GI EREBOC, ICM, CSIC, jsalazar@icm.csic.es
Sallarés, Valentí	GI BCSI, ICM, CSIC, vsallares@icm.csic.es
Salvador, Xavier	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, xsalvador@icm.csic.es
Salvador, Joaquín	GI OFT, ICM, CSIC, jsalvador@icm.csic.es
Salvo, Vanessa Sarah	OAI, ICM, CSIC, vsalvo@icm.csic.es
Sampedro, Nagore	GI PBL, ICM, CSIC, nagore@icm.csic.es
Sánchez, Pilar	GI ECRMV, ICM, CSIC, pilar@icm.csic.es
Sánchez, Pablo	GI EMM, ICM, CSIC, pablosanchez@icm.csic.es
Sans, Joel	UTM, CSIC, joel@utm.csic.es
Santín, Andreu	GI EREBOC, ICM, CSIC, santin@icm.csic.es
Santos-Bethencourt, Ricardo	GI ECRMV, ICM, CSIC, rsantos@icm.csic.es
Sanz-Sáez, Isabel	GI EMM, ICM, CSIC, isanz@icm.csic.es
Sapp, Joe	CSAR (NOAA STAR), USA, joe.sapp@noaa.gov
Sardà, Francesc	ICM, CSIC, francisco.sarda@gmail.com
Sbragaglia, Valerio	GI FVEM, ICM, CSIC, sbragaglia@cmima.csic.es
Schartup, Amina T.	SIO, USA, schartup@hsph.harvard.edu
Sebastián, Marta	GI EMM, ICM, CSIC, msebastian@icm.csic.es
Segura-Noguera, Mariona	GI EPSO, ICM, CSIC, mariona@icm.csic.es
Simarro, Gonzalo	GI PSLO, ICM, CSIC, simarro@icm.csic.es
Simó, Rafel	GI BMAC, ICM, CSIC, rsimo@icm.csic.es
Simon, Carine	GI OFT, ICM, CSIC, csimon@icm.csic.es
Soacha Godoy, Karen	GI EMBIMOS, ICM, CSIC, soacha@icm.csic.es
Solé, Jordi	DDTO, FCT, UB, jordi.sole@ub.edu
Sorribas, Jordi	UTM, CSIC, sorribas@utm.csic.es
Soto, Sara	SCT, ICM, CSIC, sarasoto@icm.csic.es
Steenbeek, Jeroen	EII, Jeroen.steenbeek@gmail.com
Stoffelen, Ad	KNMI, Ad.Stoffelen@knmi.nl
Talone, Marco	GI OFT, ICM, CSIC, talone@icm.csic.es
Tamames, Javier	CNB, CSIC, jtamames@cnb.csic.es
Torrecilla, Elena	GI BMAC, ICM, CSIC, torrecilla@icm.csic.es
Trindade, Ana	GI OFT, ICM, CSIC, atrindade@icm.csic.es
Turiel, Antonio	GI OFT, ICM, CSIC, turiel@icm.csic.es

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Ugalde, Arantza	GI BCSI, ICM, CSIC, a.ugalde@cmima.csic.es
Umbert, Marta	GI OFT, ICM, CSIC, mumbert@icm.csic.es
Urgeles, Roger	GI LPGSSO, ICM, CSIC, urgeles@icm.csic.es
Vallès-Casanova, Ignasi	GI OFT, ICM, CSIC, valles@icm.csic.es
Vallina, Sergio	COG, IEO, CSIC, sergio.vallina@oceanglobe.org
Vaqué, Dolors	GI EMM, ICM, CSIC, dolors@icm.csic.es
Vendrell, Begoña	Escola Sant Gregori, bvendrell@santgregori.org
Vicioso, María	UDC, ICM, CSIC, mvcasanal@icm.csic.es
Vigo, Maria	GI FVEM, ICM, CSIC, mvigo@cmima.csic.es
Vila, Magda	GI EPSO, ICM, CSIC, magda@icm.csic.es
Villanueva, Roger	GI ECRMV, ICM, CSIC, roger@icm.csic.es
Viure, Laia	GI EPSO, ICM, CSIC, laiaviure@icm.csic.es

Instituciones y grupos de investigación

AWI, Alfred Wegener Institute, Alemania
CEAB, Centre d'Estudis Avançats de Blanes, CSIC, España
CNB, Microbiome Analysis Laboratory. Centro Nacional de Biotecnología, CSIC, España
COC, Centro Oceanográfico de Cádiz, IEO, España
COG, Centro Oceanográfico de Gijón, IEO, España
CSAR (NOAA STAR), Center for Satellite Applications and Research, NOAA, USA
CSIC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España
DBMO, Departamento de Biología Marina y Oceanografía, ICM, España
DDTO, FCT, Departamento de Dinámica de la Tierra y del Océano, Facultad de Ciencias de la Tierra, UB, España
DGM, Departament de Geociencias Marinas, ICM, España
DOFT, Departamento de Oceanografía Física y Tecnológica, ICM, España
DRMR, Departamento de Recursos Marinos Renovables, ICM, España
EBD, Estación Biológica de Doñana, CSIC, España
EII, Ecopath International Initiative, España
GI BCSI, Grupo de Investigación Barcelona Center for Subsurface Imaging, ICM, España
GI BMAC, Grupo de Investigación Biogeoquímica Marina, Atmósfera y Clima, ICM, España
GI BR, Grupo de Investigación Biología de la Reproducción, ICM, España
GI ECRMV, Grupo de Investigación Ecología y Conservación de los Recursos Marinos Vivos, ICM, España
GI EMBIMOS, Grupo de Investigación EnvironMental and SustainaBility Participatory InforMatiOn Systems, ICM, España
GI EMM, Grupo de Investigación Ecología de Microorganismos Marinos, ICM, España
GI EPSO, Grupo de Investigación Ecología del Plancton y Salud de los Océanos, ICM, España
GI EREBOC, Grupo de Investigación Ecología y Resiliencia de los Ecosistemas Bentónicos en un Océano en Cambio, ICM, España
GI FVEM, Grupo de Investigación Funcionamiento y Vulnerabilidad de los Ecosistemas Marinos, ICM, España
GI LPGSSO, Grupo de Investigación Laboratorio de Procesos Geológicos del Suelo y Subsuelo Oceánicos, ICM, España
GI MC, Grupo de Investigación Márgenes Continentales, ICM, España
GI OFT, Grupo de Investigación Oceanografía física y tecnológica, ICM, España

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

GI PBL, Grupo de Investigación Procesos Biológicos Litorales, ICM, España
GI PBLO, Grupo de Investigación Procesos Biológicos Litorales y Oceánicos, ICM, España
GI PSLO, Grupo de Investigación Procesos sedimentarios Litorales y Oceánicos, ICM, España
ICM, Institut de Ciències del Mar, CSIC, España
IEO, Instituto Español de Oceanografía, CSIC, España
ISMAR-CNR. Istituto di Scienze Marine, Italia
JPL, Jet Propulsion Laboratory, NASA, USA
KNMI, Royal Netherlands Meteorological Institute, Holanda
LECOB, Observatoire Oceanologique Banyuls sur Mer, CNRS-Sorbonne Université, Francia
NASA, National Aeronautics and Space Administration, USA
NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA
NUIST, Nanjing University of Information Science & Technology, China
OAI, Oficina de Apoyo a la Investigación, ICM, España
PIV, UdG, Politècnica IV, Universitat de Girona, España
SARTI-MAR, Universitat Politècnica de Catalunya, España
SCT, Servicios Científico-Técnicos, ICM, España
SG, Servicios Generales, ICM, España
SIO, Scripps Institution of Oceanography, USA
UDC, Unidad de Divulgación y Comunicación, ICM, España
UB, Universitat de Barcelona, España
UTM, Unitat de Tecnologia Marina, CSIC, España

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

Índice temático

3Rs, principio de las 108-110
acidificación 50-52, 136-138
actividad antropogénica 21-26
actividades culturales, educativas y de sensibilización 231-233, 236-238, 239-241, 242-244, 245-247
aditivos 36-37
ADN 20-23, 50-52, 105-107, 136-138, 145-147
aerosoles 124-126
albedo 93-95
Albert Figueras 9-13
Albert Palanques 9-13
alguicultura 102-104
alquenonas 164-165
amenazas del océano 228-230
Andrés Maldonado 9-13
Antártida 156-157
Antropoceno 36-37, 65-67, 245-247
antropofonía 30-32
apoyo científico técnico 190-191
áreas protegidas marinas 114-116
Argo 201-203, 204-206
arte y ciencia 245-247
atmósfera 124-126
AUV, vehículo sumergible autónomo 198-200, 204-206
azufre 124-126

B/O Cornide de Saavedra 186-189, 190-191
B/O García del Cid 9-13, 30-32, 174-176, 186-189, 190-191
B/O Hespérides 9-13
B/O Sarmiento de Gamboa 9-13, 190-191, 198-200
balance de energía 124-126
Barcelona Mar de Ciència 15-17
base antártica 190-191
basura marina 33-35
batimetría 130-132
bentos 71-73
bienestar animal 108-110
Biennal Ciutat i Ciència 2021 15-17
big-data 186-189
biodiversidad 105-107
bioética 108-110
biofonía 30-32
biogeoquímica 50-52, 161-163
biomagnificación 27-29, 36-37
biomasa 142-144
biorremediación 20-23
biota antártica 71-73
biotecnología azul 20-23
bivalvos 111-113
bomba
  biológica del carbono 47-49, 151-153
  microbiana de carbono 56-58
Bosque Ancestral 245-247
boya, oceanográfica 180-182, 201-203
bucle microbiano 102-104
buenas prácticas oceánicas 228-230
Buenaventura Andreu 9-13
buques oceanográficos 186-189, 190-191, 198-200, 201-203, 207-209, 236-238, 239-241

cables submarinos 210-211
Calanus helgolandicus 148-150
calentamiento global 124-126
calibración 180-182
calidad del agua 154-155
cambio
  climático 27-29, 30-32, 62-64, 68-70, 71-73, 84-86, 96-98, 111-113, 156-157, 222-224, 225-227, 228-230, 234-235
  global 50-52, 80-83, 136-138, 222-224, 231-233, 245-247
campañas 186-189, 198-200, 207-209, 236-238, 239-241
captación de calor 44-46
carbono antropogénico 44-46
Carles Bas 9-13
Cenozoico 164-165

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals 9-13
cianobacterias 145-147
ciclo hidrológico 40-43
ciencia
ciudadana 214-216, 217-219, 231-233, 234-235, 242-244
inclusiva 9-13
para la sostenibilidad 222-224, 228-230, 231-233, 242-244
y sociedad 231-233
cinta transportadora oceánica global 44-46
circulación
oceánica 156-157, 201-203
termohalina 93-95, 133-135
ciudadanía oceánica 225-227
clorofila 96-98, 142-144, 145-147
co-creación 228-230, 245-247
co-gestión 77-79, 120-121
colecciones científicas 192-193, 194-195
Comisión Europea 225-227
Comité Externo de Asesoramiento Científico 15-17
complejidad 40-43, 222-224
compromiso 15-17, 108-110, 120-121, 161-163, 196-197, 214-216, 217-219, 225-227, 228-230, 231-233, 234-235
conductividad-temperatura-profundidad (CTD) 133-135
conectividad 53-55
conexión con el océano 225-227, 242-244, 245-247
conocimiento
científico 9-13, 47-49, 65-67, 87-89, 236-238, 242-244, 245-247
tradicional 242-244
consciencia planetaria 40-43
Consejo Social 15-17
conservación 74-76, 192-193, 214-216, 217-219
marina 65-67, 80-83
contaminantes 20-23, 36-37
orgánicos 21-26
convección profunda 99-101
Convenio de Minamata 27-29
coral del mar 30-32
corales 30-32, 59-61, 74-76, 77-79
corazón azul 234-235
corrientes 194-195, 201-203, 204-206
oceánicas 40-43, 93-95
costa 177-179
creatividad 225-227, 231-233, 245-247
crinoideos 68-70
crisis climática 124-126, 242-244
cultura
científica marina 231-233
oceánica 228-230, 236-238, 239-241, 242-244
culturómica 214-216

datos
abiertos 207-209, 217-219
en la nube 186-189
FAIR 207-209, 214-216. 217-219
Decenio
de la Ciencia Oceánica para el Desarrollo Sostenible 228-230
del Océano 9-13, 222-224, 228-230
programa *Ocean Cities* 15-17, 228-230
derrumbe de taludes 171-173
desarrollo armónico 222-224
deslizamientos sedimentarios 168-170
desplazamientos de comunidades 148-150
desprendimientos submarinos 171-173
diálogo 231-233, 236-238, 239-241, 242-244, 245-247
diarios de campaña 236-238, 239-241
digital object identifier (DOI) 207-209
dióxido de carbono 158-160
disolución 158-160
dispersión microbiana 53-55
dispersómetro 127-129, 180-182
divulgación científica 242-244
Dolors Blasco 9-13

ecología microbiana acuática 53-55
economía azul 20-23, 222-224
ecosistemas 15-17, 27-29, 33-35, 36-37, 47-49, 50-52, 53-55, 56-58. 59-61, 74-76, 114-116, 161-163, 225-227, 228-230, 234-235, 236-238, 242-244
marinos vulnerables 74-76
conservación y uso sostenible 9-13, 15-17, 80-83, 105-107, 111-113, 161-163, 222-224, 225-227
embarcaciones 217-219

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

emergencia climática 40-43, 156-157, 231-233
emoción 222-224, 225-227, 231-233, 239-241, 245-247
Enrique Macpherson 9-13
Enrique Tortosa 9-13
entropía 40-43, 222-224
equilibrio
  químico 158-160
  radiativo 93-95
erosión 168-170
erupción volcánica 168-170
escenarios de impacto 174-176
escorrentía de ríos 99-101
espacios de debate y diálogo 15-17, 196-197, 231-233, 242-244, 245-247
especies
  carismáticas 65-67
  clave 65-67
  indicadoras 65-67
  paraguas 65-67
estequiometría 145-147
estrategias
  de adaptación 87-89
  reproductoras 62-64
estratificación térmica 99-101
estructuras tridimensionales 111-113
European Research Council 15-17
evaluaciones de riesgo 80-83
evolución
  como especie 222-224
  costera 87-89
  geológica 127-129
Excelencia Severo Ochoa 9-13, 15-17
experimentación animal 108-110
exploración 154-155

factorías microbianas 59-61
fallas sísmicas 168-170
fibra óptica 210-211
fisiología oceánica 40-43
fitoplancton 15-17, 40-43, 99-101, 145-147, 156-157
flota 190-191, 194-195, 198-200
flujos
  continentales 154-155
  turbidíticos 130-132
fondos
  marinos 130-132
  móviles 168-170
fotosíntesis 9-13, 56-58, 151-153, 222-224
Francisco García del Cid 9-13
función ecosistémica 68-70
fusión del hielo 156-157

Gaia 40-43
gases efecto invernadero 93-95
generación y transmisión de conocimiento 221-247
genómica 105-107
geofonía 30-32
gestión
  científica 190-191, 194-195, 214-216
  costera 177-179
  de datos 192-193, 207-209
  de recursos 161-163
  pesquera 161-163
glacial/interglacial 164-165
governanza 77-79, 225-227, 228-230, 242-244

hábitats bentónicos 68-70
hábitos de consumo 231-233, 234-235
hielo 44-46
homeostasis 222-224

ICM Divulga 231-233, 236-238, 239-241, 242-244, 245-247
ICTS
  BAEs 9-13
  FLOTA 9-13
iEcology 214-216
igualdad de género 196-197
impacto pesquero 68-70
indicadores bio-ecológicos 117-119
innovaciones biológicas 59-61
insolación 96-98
Institut d'Aqüicultura Torre de la Sal 9-13
Institut de Biologia Aplicada 9-13
Institut de Ciències del Mar 9-13, 15-17
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía 9-13
Instituto de Investigaciones Pesqueras 9-13
Instituto de Investigacións Mariñas 9-13
Instituto Español de Ocanografía 9-13
interacciones
  físico-biológicas 62-64, 133-135
  océano-clima 15-17

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

interdisciplinar 236-238, 239-241, 245-247
interoperabilidad 186-189, 207-209, 214-216
investigación e innovación responsable 236-238
isótopos 158-160

Jordi Sorribas 9-13
José Maria Albareda 9-13
Josefina Castellví 9-13
Josep Lluís Pelegrí 9-13
Juan José Dañobeitia 9-13
justicia social 222-224, 231-233

Lagrangiana 201-203
larvas de peces 62-64
litoral 154-155

maërl 68-70
marcadores epigenéticos 105-107
maremoto 171-173
márgenes continentales 127-129
Marta Estrada 9-13
masas de agua 142-144, 201-203
materia orgánica
  disuelta 151-153
  particulada 114-116, 151-153, 154-155, 161-163, 234-235, 236-238, 242-244
mecanismos de mitigación 15-17
Mediterráneo noroccidental 62-64
medusa 177-179, 212-213
  picaduras, prevención 212-213
mercurio 27-29
metabolismo planetario 40-43, 133-135, 180-182
metacomunidades 53-55
metadatos 186-189, 192-193, 207-209
metales
  pesados 21-26
  traza 21-26
metilmercurio 27-29
mezcla vertical 96-98
microalgas 145-147
microescala 139-141
Micromonas pusilla 136-138
microorganismos 20-23, 50-52, 136-138
  heterótrofos 102-104
  marinos 20-23
microplásticos 33-35, 50-52
microscopio electrónico 145-147
microzooplancton 148-150
misión
  SMOS *(Soil Moisture and Ocean Salinity)* 133-135
  Starfish 2030 225-227
mitigación del bycatch 77-79
modelos de proliferación 177-179
monitoreo 198-200, 204-206, 210-211, 217-219
  a largo plazo 99-101
  no invasivo 114-116
  de la salud de los océanos 65-67, 80-83
movimiento *ArtScience* 245-247
mujeres oceanógrafas, visibilidad 196-197, 236-238, 239-241

nivel del mar, aumento 44-46, 87-89
nutrientes 96-98, 102-104, 142-144

objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 222-224, 225-227, 228-230, 231-233, 242-244
observadores del mar 242-244
Ocean Cities 15-17, 228-230
océano
  Ártico 156-157
  Austral 44-46, 71-73
  global 44-46, 156-157, 234-235
Oficina de Apoyo a la Investigación 15-17

paleoceanografía 164-165
Panel Intergobernamental de Cambio Climático (IPCC) 161-163
participación ciudadana 217-219
patrimonio ambiental 231-233
perfil sísmico 127-129
pesca 117-119
  artesanal 77-79
  fantasma 77-79
  tradicional 120-121
pesquerías demersales 114-116
pH 158-160
plancton 47-49, 139-141
planeta
  saludable 15-17
  vivo 40-43, 222-224
Plasticeno 36-37, 68-70, 99-101, 133-135, 136-138, 156-157, 168-170
plastiglomerados 36-37

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.

plataforma
  continental 74-76
  autónoma 214-216
polinias 44-46
prácticas colaborativas 242-244
primeros auxilios 212-213
procesos
  sedimentarios 127-129
  marinos 71-73
producción primaria 96-98, 102-104
productos naturales 111-113
Programa *Horizon Europe* 15-17, 225-227
proliferación algal 96-98
  nociva 56-58
protección
  animal 108-110
  de los océanos 245-247
Proyecto ResBios 236-238

radiación lumínica 142-144
Ramon Margalef 9-13
reciclaje de materia orgánica 151-153
recursos
  educativos 225-227, 236-238, 239-241
  marinos 117-119
red
  escuelas marinas 236-238, 239-241
  trófica 139-141
  trófica marina 47-49
Redfield, estequiometría 145-147
regulador climático 44-46
remineralización 96-98, 145-147
residuos marinos 33-35
resiliencia 47-49, 62-64, 148-150, 177-179, 222-224, 234-235
  de las playas 87-89
respiración 148-150
restauración 111-113, 114-116
  bentónica 74-76
  de ecosistemas 161-163
retroalimentaciones climáticas
  complejas 148-150
riesgos 171-173
  geológicos marinos 168-170
  naturales y antropogénicos 15-17
robótica marina 114-116
Rosa Flos 9-13
ruido
  de fondo 30-32
  subacuático 30-32

salinidad 127-129, 133-135
salud
  de los océanos 84-86
  planetaria 40-43, 59-61, 239-241
satélite 164-165
secuestro de carbono 50-52, 151-153
sedimentos
  marinos 171-173, 192-193, 217-219
  costeros 21-26
sensibilización ambiental 231-233, 234-235, 239-241, 245-247
sensores
  oceanográficos 198-200, 201-203, 204-206, 210-211
  remotos 80-83
servicios ecosistémicos 111-113
simbiogénesis 47-49
simbiosis marina 59-61
sísmica 192-193, 210-211
sistema
  CRISPR-CAS9 20-23
  Global de Observación de Mercurio 27-29
sobrexplotación 114-116, 117-119, 120-121
sociedad civil 231-233
sonda GPS de caida libre 180-182
sonido de fondo 30-32
sonso 120-121, 145-147
sostenibilidad 117-119

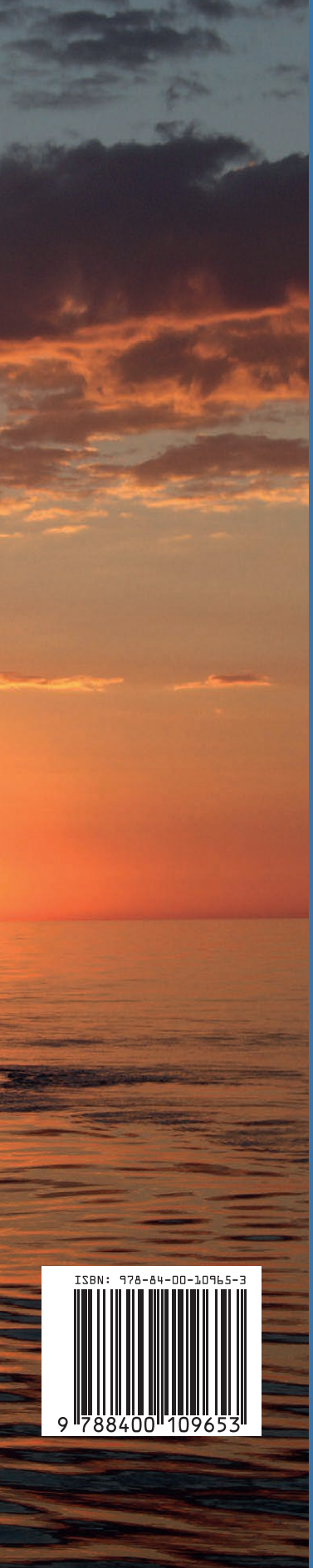
taxonomía 136-138
técnicas ómicas 105-107
tecnologías de seguimiento 80-83
tectónica 130-132
telecomunicaciones 186-189, 210-211
temperatura 139-141
terremoto 174-176, 210-211
testigos de sedimento 127-129, 192-193
transcriptómica 105-107
transición
  energética 84-86
  evolutiva 59-61
transporte
  marítimo 84-86
  renovable 33-35, 53-55, 71-73, 84-86, 130-132, 133-135, 142-144, 151-153, 225-227
turbulencia marina 139-141

Copia gratuita / Personal free copy http://libros.csic.es

UNESCO 9-13, 15-17, 36-37, 102-104, 111-113, 161-163, 222-224, 225-227, 228-230, 236-238, 242-244
Unitat de Tecnologia Marina 9-13, 190-191, 204-206, 207-209

variabilidad en el reclutamiento 62-64
vida
  flujo, proceso o substancia 40-43
vientos 96-98
  atmosféricos 93-95
  extremos 180-182
vigilancia y alerta marina 174-176
visibilidad, mujeres investigadoras 196-197
visualización de datos 207-209
voluntariado 214-216

© CSIC © del autor o autores / Todos los derechos reservados.



Los investigadores y tecnólogos de los centros de investigación y tecnología tenemos la gran fortuna de trabajar en temáticas que, además de interesantes y creativas, pueden contribuir efectivamente hacia un desarrollo integral de la especie humana. El Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible hace patente este reto en un momento donde el impacto antrópico, sea en forma de cambio global o cambio climático, nos urge a tomar un nuevo rumbo, a buscar nuevos modelos para relacionarnos entre nosotros y con la naturaleza. El Decenio de los Océanos pone el foco en la oportunidad, surgida de la grandeza y complejidad de los océanos, que tienen las ciencias oceánicas para tornarse inclusivas y transformadoras hacia un futuro compartido de justicia social, sostenibilidad ambiental y evolución humana individual y colectiva.

2021 2030 Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible

Institut de Ciències del Mar

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN

CSIC CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

EDITORIAL CSIC

ISBN: 978-84-00-10965-3

9 788400 109653