

Sargazo en movimiento

Analizaremos las causas de las arribazones de sargazo a escala regional y local. Los florecimientos parecen estar relacionados con procesos de fertilización oceánica. La forma en que esto ocurre depende de variaciones estacionales e interanuales de los vientos, olas y corrientes, además de la presencia de remolinos y otros procesos en la zona costera, donde la fricción tiene un papel relevante.

Introducción

El año 2011 marca el inicio de las invasiones masivas de sargazo en el mar Caribe y de lo que ahora conocemos como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA). Estos crecimientos anómalos continuaron de forma irregular pero recurrente en 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019 (véase la Figura 1a). En 2015 y 2018, fueron particularmente intensos.

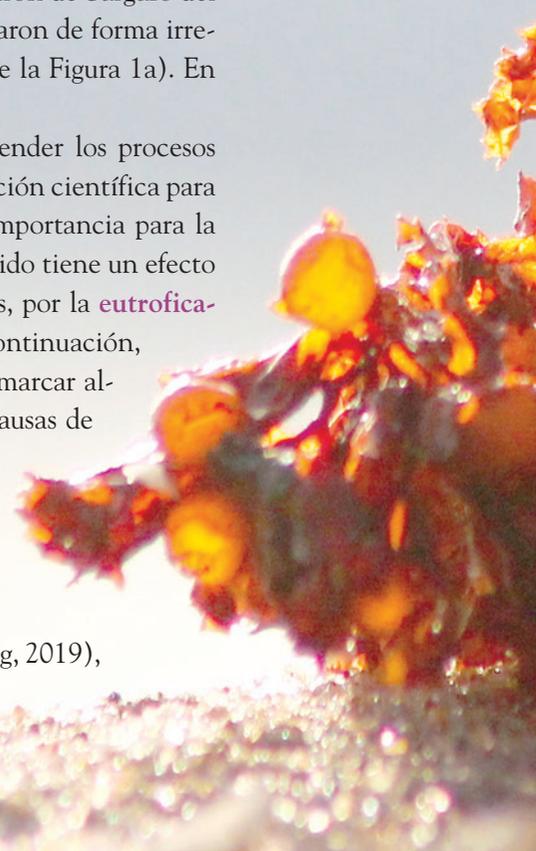
Al respecto, se han formulado muchas hipótesis para entender los procesos involucrados en este fenómeno, pues se requiere de la investigación científica para mitigar su impacto y aprovechar el sargazo. Éste es de vital importancia para la supervivencia de diversas especies, pero su crecimiento desmedido tiene un efecto negativo en los ecosistemas costeros, en especial los arrecifales, por la **eutroficación** y por un manejo inadecuado del sargazo en las playas. A continuación, presentamos un contexto más amplio y su variabilidad para remarcar algunos eventos importantes que podrían relacionarse con las causas de estas arribazones anómalas de sargazo a escala regional y local.

Eutroficación

También llamada eutrofización, significa aumento de la concentración de fósforo, nitrógeno y otros nutrientes en un ecosistema acuático, lo que provoca un exceso de fitoplancton o de plantas acuáticas.

Océano, atmósfera y tierra en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico

El GCSA parece tener su origen en el Atlántico Tropical (Wang, 2019), en la región denominada NEER (por las siglas en





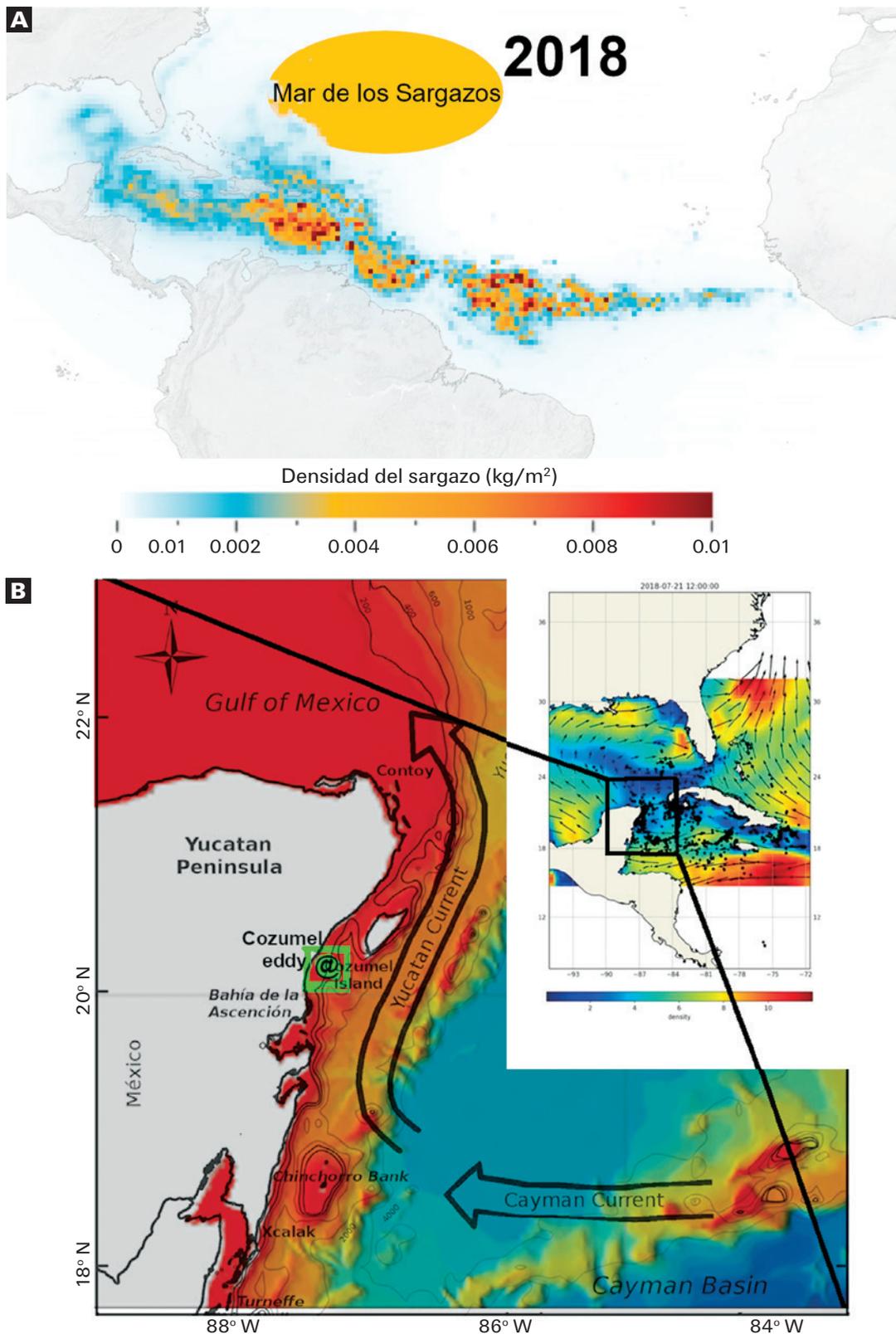


Figura 1. a) Concentración superficial de sargazo en julio de 2018 (adaptada de Wang y cols., 2019 y del sitio web de la NASA: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/145281/scientists-discover-the-biggest-seaweed-bloom-in-the-world>>). Se indica la localización del mar de los Sargazos. b) Ejemplos de la batimetría en el Caribe mexicano (modificada de Carrillo y cols., 2015) y de una predicción del movimiento del sargazo durante julio de 2018 (1 día, modelo desarrollado por CIGOM: <<http://www.cigom.org>>). Se muestra la corriente Cayman, la corriente de Yucatán y el giro de submesoescala al sur de Cozumel (cuadro verde).

inglés de *North Equatorial Recirculation Region*). El sargazo que se produce en esta zona es transportado por las corrientes, los vientos y el oleaje hacia el Caribe, Golfo de México y parte de la costa este de Estados Unidos de América. La forma en que esto ocurre depende de variaciones estacionales e interanuales de los vientos, olas y corrientes, pero también se debe a la presencia de remolinos, frentes y otros procesos complejos de menor escala. El sargazo flota y no siempre está en la superficie, por lo que entender cómo se mueve es un tema candente de investigación.

La entrada de sargazo al Caribe ocurre, por lo general, en los primeros meses del año (de enero a marzo); el GCSA alcanza su máxima extensión en julio y agosto. Para explicar este comportamiento es necesario entender las características de la circulación oceánica y atmosférica, en combinación con la fisiología y la biogeoquímica. La Figura 2 muestra

una “fotografía” que ilustra de mejor manera algunas características típicas de la circulación atmosférica y oceánica a gran escala durante un día de agosto de 2018, cerca del pico de extensión del GCSA, que ocurrió en julio de ese año.

Podemos ver que en el Atlántico Tropical, Caribe y Golfo de México dominan los **vientos alisios** o del este (véase la Figura 2a). En la región tropical, los alisios del norte tienen un componente que apunta al suroeste, mientras que los que vienen del hemisferio sur tienen un componente norte. Esto produce un encuentro que da lugar a la llamada Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), representada en la Figura 2b por la banda de color azul cerca de la línea del ecuador, tanto en el Atlántico como en el Pacífico.

La fuerte precipitación en esta zona complica la detección satelital de las plumas de agua dulce de

Vientos alisios
Son aquellos que soplan en las regiones tropicales desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales, y son desviados por el movimiento de la Tierra hacia el oeste.

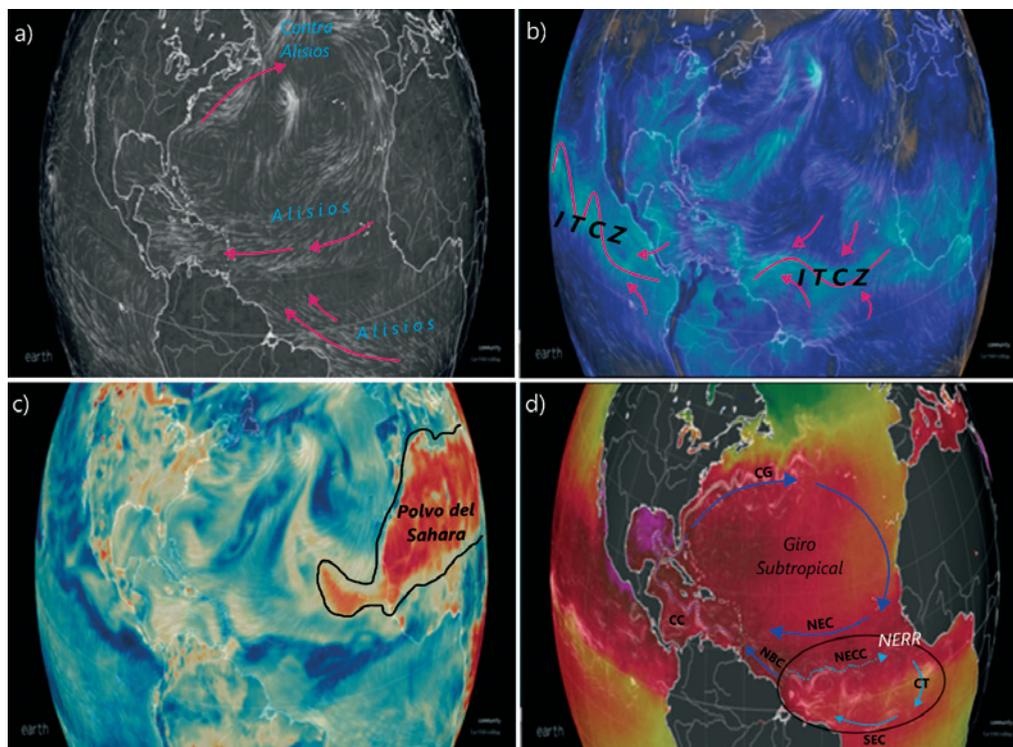


Figura 2. Fotografías del 15 de agosto de 2018 de: a) vientos superficiales, con marcas de color que señalan a los vientos del este (alisios) y del oeste (contralisios); b) vientos y agua precipitable en la atmósfera, con valores máximos en azul claro y en los que se identifica a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ); c) partículas suspendidas en la atmósfera; con color rojo se muestra la extensión de la pluma generada por los polvos del Sahara; d) corrientes oceánicas y temperaturas superficiales, en las que se marcan varias estructuras mencionadas en el texto: el giro subtropical del Atlántico Norte, la corriente ecuatorial norte (NEC), la corriente norte de Brasil (NBC) y la zona de recirculación norecuatorial (NERR), conformada por la corriente sur ecuatorial (SEC), que fluye al oeste, y la contracorriente ecuatorial norte (NECC). CT (por las siglas en inglés de *cold tongue*) es una lengüeta de agua fría. Las imágenes fueron extraídas del programa *Earth: An animated map of global wind and weather*, disponible en: <<https://earth.nullschool.net>>.



Fuerza de Coriolis

Es una fuerza aparente, debida a la rotación terrestre, que desvía el movimiento de masas de agua o de aire a la derecha (izquierda) en el hemisferio norte (sur).

los ríos Amazonas y Congo, las cuales se han sugerido como mecanismos importantes de fertilización (Wang y cols., 2019; Oviatt y cols., 2019); aunque otros estudios (Johns y cols., 2020) no encuentran evidencia de ello y proponen que los florecimientos ocurren en el centro del Atlántico Tropical, bajo la ITCZ, lejos de la influencia de los ríos. Otra fuente de fertilización son los polvos provenientes del Sahara, cuya presencia puede identificarse por su color rojo (véase la Figura 2c). Durante julio a septiembre, estas partículas tienden a viajar en dirección al oeste, incluso hasta el Caribe, mientras que en el invierno viajan hacia al ecuador, llegan al Amazonas y participan en la fertilización de la región. Además, está la fertilización proveniente de los procesos oceánicos de afloramiento ecuatorial y por huracanes (Oviatt y cols., 2019).

En la latitud 30° N se puede apreciar el inicio de los vientos del oeste, o contraalios, que se extienden hasta los 60° N. El mar de los Sargazos se ubica precisamente entre los dos sistemas de viento (véase la Figura 1a). Las variaciones en la posición e in-

tensidad de los vientos se relacionan con diferentes índices de variabilidad climática, como la oscilación del Atlántico Norte (NAO), que mide la diferencia de presión atmosférica entre la alta de las Azores y la baja de Islandia. Este sistema de vientos explica la circulación oceánica y sus variaciones de temperatura, cuya expresión superficial puede verse en la Figura 2d. La forma en que el forzamiento del viento da lugar al patrón de corrientes oceánicas que ahí se marca está determinada por el balance dinámico entre el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar, el gradiente de presión y la **fuerza de Coriolis**. Comenzando por latitudes más altas, entre los alios y contraalios se forma el giro subtropical del Atlántico Norte, producto de la convergencia del flujo oceánico por el arrastre del viento hacia dicha región (transporte de Ekman), que resulta a la derecha (izquierda) de la dirección del viento en el hemisferio norte (sur). Esta convergencia da lugar a un transporte vertical de agua cálida hacia profundidades mayores, al hundimiento de las **isotermas** y a una elevación del nivel del mar en el centro del

Isotermas

Curvas que representan puntos de igual temperatura en una visualización gráfica de los campos de temperatura.



giro. Todo esto se combina para generar las corrientes geostróficas (corrientes oceánicas que resultan del balance entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión), que conforman el giro subtropical (véase la Figura 2d).

En las regiones tropicales cercanas al ecuador, donde se ubica el sistema de corrientes de la NERR, la dinámica es un poco diferente a la que ocurre en latitudes más altas. Como la fuerza de Coriolis se anula sobre el ecuador, los vientos alisios arrastran el agua en su misma dirección y la apilan cerca de la costa de Brasil. Al mismo tiempo, en cuanto se separa del ecuador, la fuerza de Coriolis deja de ser nula y toma valores de signo contrario dependiendo del hemisferio. Ello provoca que el transporte de Ekman en la superficie sea hacia los polos en ambos hemisferios, lo cual genera una divergencia superficial en el ecuador y el afloramiento de aguas más profundas, frías y ricas en nutrientes hacia la superficie.

La NERR se conforma por varias corrientes (véase la Figura 2d). La corriente norte de Brasil (NBC) se alimenta al este por la rama norte de la corriente sur ecuatorial (SEC). La NBC, a su vez, mediante un proceso conocido como retroflexión, nutre a la contracorriente ecuatorial norte (NECC), que fluye de regreso hacia el este y está conectada estacionalmente con la ITCZ. Al llegar a las cercanías de África, la NECC se reconecta con la SEC por una de sus ramas que fluye al sur; así se cierra el patrón de recirculación.

Se esperaría que, si los ríos son los principales responsables de los afloramientos de sargazo, algunos eventos importantes que ocurrieron en los últimos 20 años –como las sequías (2005, 2010) y en particular las inundaciones (2009, 2012) de la cuenca del Amazonas– deberían tener algún tipo de correlación. Sin embargo, durante esos años no ocurrieron afloramientos fuertes. Una explicación (Wang y cols., 2019) sugiere que el retraso (pues el pico inicial de sargazo fue en 2011) se debe a varias circunstancias; entre ellas, que había una temperatura oceánica más alta que impidió un crecimiento mayor del sargazo. Por otra parte, también se ha notado que los eventos de 2011, 2012, 2015 y 2018 estuvieron precedidos por una intensa actividad de





huracanes (Oviatt y cols., 2019), por lo que se sugieren mecanismos para conectar esta actividad con los crecimientos de sargazo en el Atlántico Occidental, mientras que se propone que los flujos de ríos y el afloramiento de aguas ricas en nutrientes en las costas de África son las causas del crecimiento en el Atlántico Oriental.

■ **Movimiento del sargazo**

■ A partir de un análisis de datos atmosféricos y oceanográficos (Johns y cols., 2020), se ha señalado que en 2010 se presentó un alto índice negativo de la NAO, lo que indica que los contraalisos se intensifican y se desplazan un poco al sur, mientras que los alisos se debilitan. El análisis incorpora el efecto directo de arrastre del viento y las corrientes oceánicas para simular el movimiento de partículas en el océano, y sugiere que el cambio en los vientos ocurrido en 2010 produjo que grandes cantidades de algas del mar de los Sargazos llegaran al Atlántico Tropical, donde encontraron condiciones propicias para su crecimiento. Asimismo, se sugiere que los mecanismos que controlan los florecimientos de sargazo en la NERR parecen estar relacionados con procesos de fertilización ligados a la dinámica oceánica.

En el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) se han desarrollado diferentes modelos para simular el movimiento del sargazo, a los cuales se ha incorporado el arrastre por viento y olas, así como el hundimiento de partículas por rompimiento de olas y turbulencia. La Figura 1b muestra un ejemplo de un “pronóstico” (denominado en inglés *hindcast*) que se hace en el pasado tomando el pronóstico de corrientes marinas y vientos de esos días y utilizando posiciones del sargazo a partir de datos satelitales.

De lo oceánico a lo costero

Mientras se avanza en el entendimiento del transporte del sargazo a gran escala, existe poco conocimiento de las rutas de transporte del sargazo desde el océano a las costas. Al acercarse a la costa se presenta un umbral de cambios en los fenómenos que controlan la circulación, debido en parte al

cambio en la profundidad de la columna de agua. Ahí, la extensión del continente hacia el océano –llamada plataforma continental– ejerce fricción y empieza a gobernar el comportamiento de la circulación y la disipación de la energía, lo cual genera inestabilidades y turbulencia (Simpson y Sharples, 2012). Por otro lado, en la zona costera se tiene el efecto de las mareas, los vientos locales y el oleaje en la configuración de la costa y en la pendiente del fondo marino. Si a eso se añade la existencia de la barrera de los arrecifes de coral, la complejidad para modelar el transporte y comportamiento del sargazo hacia la playa se incrementa. La extensión de la plataforma, su pendiente y la configuración de la línea de costa van cambiando, de tal manera que hay sitios como una plataforma de varias centenas de kilómetros y otros cuya extensión es de sólo un par de kilómetros (véase la Figura 1b).

El Caribe mexicano

Si bien la llegada de sargazo a las costas del Caribe mexicano ya se había observado, no fue sino hasta 2015 que se presentó de manera masiva. Se sabe que entre los aspectos oceanográficos relevantes destaca la corriente de Yucatán (véase la Figura 1b), una de las más intensas del mundo, que es parte del sistema de circulación del Atlántico, y que conecta el Caribe con el Golfo de México a través del canal de Yucatán. Por otro lado, se han observado contracorrientes costeras y la presencia de remolinos a una escala de decenas de kilómetros, capaces de generar retención y fortalecer estas contracorrientes, como la del sur del canal de Cozumel (Carrillo y cols., 2015).

■ **Relevancia de las observaciones**

■ En esta revisión hemos transitado de lo oceánico a lo costero, a partir de las distintas aproximaciones entre las dos escalas, para esclarecer los procesos físicos involucrados en la cantidad de sargazo que llega a la costa, lo cual sigue siendo una incógnita. La resolución de los sistemas actuales de pronósticos para el Caribe no permite predecir el arribo y la dispersión a las costas mexicanas. En otro tipo de contin-



gencias, como los derrames de petróleo, las observaciones *in situ*, junto con herramientas satelitales y la modelación numérica, han probado el desarrollo de escenarios de predicción de corto plazo y en tiempo casi real. Todavía México no cuenta con un sistema de observación para las costas del Caribe que permita definir las mejores acciones de mitigación ante la presencia masiva de sargazo, por lo que se requiere de un sistema interinstitucional de observación de los océanos y las costas en el Caribe mexicano.

Laura Carrillo

El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.
lcarrillo@ecosur.mx

Julio Sheinbaum Pardo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
julios@cicese.mx

Referencias específicas

- Carrillo, L., E. M. Johns, R. H. Smith, J. T. Lamkim y J. L. Largier (2015), "Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System, Part 1: Circulation Continental", *Shelf Research*, 109:164-176.
- Johns, E. M., R. Lumpkin, N. F. Putman, R. H. Smith, F. E. Muller-Karger, D. Rueda, C. Hu, M. Wang, M. T. Brooks, L. J. Gramer y F. E. Werner (2020), "The establishment of a pelagic *Sargassum* population in the tropical Atlantic: biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event", *Progress in Oceanography*, 102269.
- Oviatt, C. A., K. Huizenga, C. S. Rogers y W. J. Miller (2019), "What nutrient sources support anomalous growth and the recent *Sargassum* mass stranding on Caribbean beaches? A review", *Marine Pollution Bulletin*, 145:517-525.
- Simpson, J. y J. Sharples (2012), "Introduction to the shelf seas", en J. Simpson y J. Sharples, *Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-24. Disponible en: <doi.org/10.1017/CBO9781139034098.004>, consultado el 25 de agosto de 2020.
- Wang, M., C. Hu, B. B. Barnes, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya (2019), "The great Atlantic *Sargassum* belt", *Science*, 365(6448):83-87.