Número especial 263
abril
2023

Directora general:
Carmen Lira Saade
Director fundador:
Carlos Payán Velver
Director: Iván Restrepo
Editora: Laura Angulo

La Jornada ecológica

El sargazo

¿llegó para quedarse?

Números anteriores

Correos electrónicos: ivres381022@gmail.com • estelaguevara84@gmail.com

Presentación

Iván Restrepo
Director del suplemento

Foto: Jaime Farías/ JF Informa

Foto en portada: Akumal, en 2021

Foto: Cinvestav

Al sobrevolar sobre Tulum, en Quintana Roo, el presidente López Obrador se congratuló porque casi no había sargazo en el litoral de esa parte de Quintana Roo. El gusto duró poco pues una semana después comenzó a llegar en mayores cantidades. Se adelantó tres meses a lo previsto. Ya rebasó las previsiones que existían sobre su arribo y sobrepasó la capacidad para recolectarlo y enviarlo a un lugar seguro. Cuando los lectores de este suplemento disfruten los trabajos que sobre este enorme problema ambiental y social ofrecen calificados investigadores, el problema será muchísimo mayor.

Por muchos años, el sargazo llegaba a la franja litoral en reducidas cantidades y generalmente desaparecía por la acción del oleaje. Todo cambió a partir de 2015 cuando lo hizo en cantidades mayores, lo que activó la alarma entre los propietarios de los hoteles, prestadores de servicios turísticos comerciantes y pescadores ubicados en los nuevos polos turísticos: Cancún y la Riviera Maya, Tulum, Isla Mujeres, Cozumel, Holbox y la zona sur del estado de Quintana Roo.

Inicialmente, el gobierno mexicano reconoció que no existía ninguna estrategia para enfrentar un problema que también afecta a Cuba, Puerto Rico, Dominicana, Barbados, Antigua, Granada, Santa Lucía, Jamaica y cuatro países más del Gran Caribe.

Ese arribo cada vez más frecuente y voluminoso parece deberse al cambio de corrientes oceánicas, las tormentas más intensas ocasionadas por el cambio climático, el incremento de la temperatura del mar y los nutrientes que aportan los grandes ríos. Todo ello daría por fruto un crecimiento excesivo de las diferentes especies marinas. El origen del alga está a miles de kilómetros de distancia de nuestro país, por el rumbo de Las Bahamas, en aguas del Océano Atlántico, en el llamado Mar de Sargazo, cuya extensión suma 3.5 millones de kilómetros cuadrados.

Van casi 10 años de que en la franja litoral del Caribe mexicano el sargazo es un problema grave pues afecta especialmente a los polos turísticos más importantes. Y pese a tantos planes y promesas del sector público y los empresarios locales, no existe una estrategia global para evitar su llegada. Y en caso de hacerlo, recogerlo con las técnicas más adecuadas y depositarlo en sitios que garanticen que no causará ningún daño al medio ambiente en la península de Yucatán, donde se localiza el enorme acuífero maya, el más importante del país. Igualmente faltan los proyectos para utilizar el alga como insumo para diversas actividades económicas.

*La Jornada Ecológic*a se ha ocupado de ofrecer los estudios más puntuales sobre el sargazo. Ante la llegada masiva que ahora se registra en el litoral de Quintana Roo, ofrecemos ahora los más recientes sobre el alga. Una manera de reconocer el trabajo que realizan los centros de investigación nacionales especializados en los temas marinos. Dedicamos los números de abril y mayo para exponerle a los lectores de manera clara el problema y posibles soluciones. Hemos contado para ello con el apoyo de los doctores Horacio de la Cueva y Eduardo Peters que laboran en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CICESE, y el Consorcio de Investigación del Golfo de México, CIGoM. A ellos y a los demás colaboradores expreso mi mayor agradecimiento.

La Jornada ecológica

Introducción

Retos del sargazo en México: entender su presente y diseñar su futuro

Horacio de la Cueva
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)
Edward M. Peters
Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM)
Correo-e: cuevas@cicese.mx

La inesperada llegada de sargazo a las costas del Caribe y Golfo de México pudo haber sido predicha, si tuviéramos la visión de modelar el futuro con lo que hoy conocemos y podemos conocer. No fue así. La causa viene de la degradación de los ecosistemas y el cambio climático. Nuestros niños malos nos jugaron rudo otra vez.

La consecuencia de no predecir el futuro se expresa en la necesidad de limpiar grandes cantidades de sargazo de playas, impidiendo el disfrute de las mismas, atentando contra la salud de habitantes y turistas y amenazando la existencia de esta industria. Las grandes empresas turísticas han dejado de ganar dinero en el Caribe mexicano, tal vez lo recuperen en otros centros turísticos.

Los empleados y sus familias no tienen a donde ir, son los que corren con todos los riesgos económicos y sanitarios. La colecta de sargazo en mar y tierra (la única solución por hoy y en el futuro cercano), dispone todavía de una tecnología incipiente. Además, si planeamos correctamente su aprovechamiento, puede generar economías circulares en la península de Yucatán. Y la realidad que nos rodea: a pesar de los esfuerzos nacionales e internacionales de los grupos más destacados de investigación tanto nacionales como de otros países, seguimos sin poder impedir que el sargazo llegue a las playas y destruya economías y paisajes.

Este número de *La Jornada Ecológica* nos asoma a la investigación que consorcios de científicos mexicanos están realizando para entender el fenómeno del sargazo en todas sus dimensiones. Las razones oceanográficas de su existencia, presencia y movimientos en el Gran Caribe y en el Golfo de México. Su forma de vida y crecimiento, su papel en la ecología oceánica; el hábitat que forma, los organismos que alberga, y la capacidad y límites de regeneración de los ecosistemas que afecta.

Aquí se abordan los riesgos a la salud y la capacidad de autorregeneración. Las necesidades, formas, tecnologías y lugares de investigación, monitoreo y control. Los retos que conlleva el alga que llega por decenas de miles de toneladas.

Aun si reducimos los gases de efecto invernadero y los nutrientes vertidos en el mar (posibles causas principales de este fenómeno), el problema parece que llegó para quedarse y no desaparecerá de la noche a la mañana. Debemos también adaptar nuestras vidas, nuestras economías y nuestras labores a esta nueva y cambiante realidad. Sea esta *Jornada Ecológica* parte de la inspiración que necesitamos.

Agradecemos a Iván Restrepo que nos haya abierto las puertas de este suplemento, para dar a conocer los esfuerzos, resultados y limitaciones para entender el sargazo y diseñar un futuro con turismo de playa y aprovechamiento sustentable.

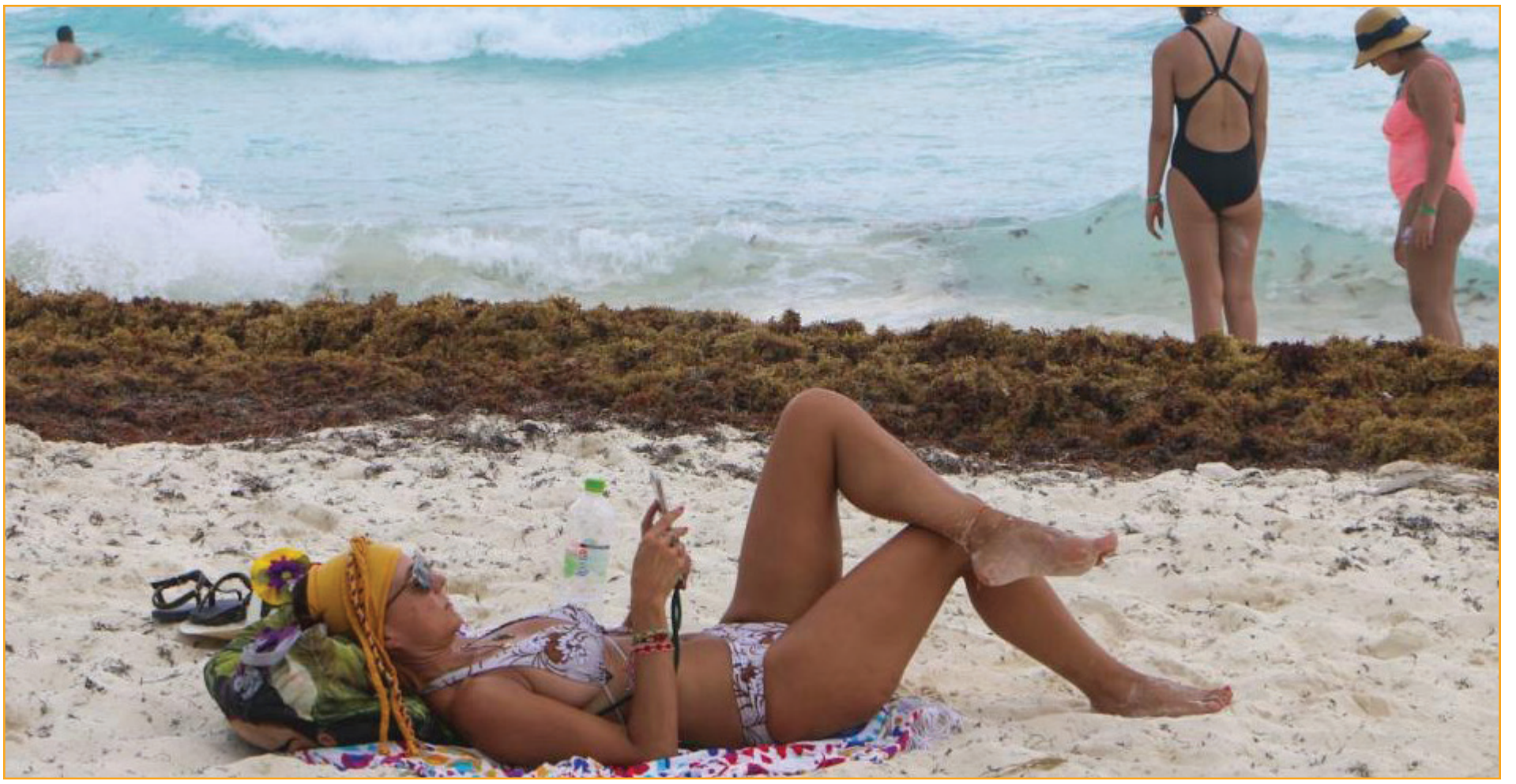


Foto: Oaxaca Digital

La Jornada ecológica

Algas abundantes con abundantes impactos negativos para el ecosistema

Rosa Elisa Rodríguez Martínez
y Brigitta van Tussenbroek
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales-Puerto Morelos, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México
Correo-e: rosaer@cmarl.unam.

Playa del Carmen, 2019

Foto: Infobae/Víctor Ruiz/AP

El sargazo se ha vuelto muy abundante en el Océano Atlántico, es el mayor florecimiento de macroalgas registrado. Sus mantos están compuestos por dos especies de algas pardas (*Sargassum fluitans* y *S. natans*) que viven flotando, y son transportadas por las corrientes marinas, el viento y el oleaje. Su mayor abundancia se presentaba en el Mar de los Sargazos y algunas arribaban ocasionalmente al Caribe y al Golfo de México.

A partir de 2011, una cantidad excesiva de sargazo comenzó a llegar a las costas del Caribe. Las imágenes satelitales colocan su origen en una zona ahora llamada el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico. Éste se extiende desde África hasta el Golfo de México y en junio de 2022 su biomasa alcanzó el récord histórico de 24 millones de toneladas.

Varios estudios sugieren que estos eventos son resultado del cambio climático y del aumento en la concentración de nutrientes en el océano. Las llegadas masivas y recurrentes de sargazo al Caribe afectan la biodiversidad, la economía, el bienestar y la salud humana. En México, los arribos comenzaron a finales de 2014 y desde 2018 se han vuelto anuales, durando entre cinco y siete meses. El estado de Quintana Roo es el más afectado, principalmente en primavera y verano, cuando dominan los vientos provenientes del este y sureste. La cantidad que recala en las playas puede ser considerable; en el 2018, los hoteles ubicados en la zona norte del estado retiraron un promedio mensual de mil 852 metros cúbicos por kilómetro de playa.

La llegada de miles de toneladas de sargazo y su posterior descomposición han tenido un gran impacto en los ecosistemas costeros. Las playas pierden su belleza escénica y se erosionan. Los lixiviados (líquidos residuales, generalmente tóxicos, que se generan de las algas) y la materia orgánica transforman las aguas de un color turquesa a marrón, lo que disminuye el paso de la luz y el oxígeno, se modifica el pH, y aumenta la concentración de nutrientes, sulfuros y amonio. El deterioro en la calidad del agua provoca mortalidad de pastos marinos y de fauna, incluso en los arrecifes coralinos.

Además, los mantos de sargazo vienen acompañados de virus, bacterias y especies exóticas potencialmente invasoras, que podrían ser otra amenaza para los ecosistemas costeros, ya que algunas pueden producir infecciones a organismos marinos y también al humano.

El sargazo también absorbe elementos que pueden acumularse en concentraciones tóxicas. En particular preocupa el arsénico, porque se ha encontrado en concentraciones que superan los límites tóxicos. El sargazo también puede acarrear cadmio, plomo y mercurio, metales que pueden incorporarse a las cadenas tróficas de pastizales marinos y arrecifes.

La mala o nula disposición que se hace del sargazo en México también representa un riesgo para otros ecosistemas, como manglares, selvas y acuíferos, y además para la salud humana ya que las algas terminan en tiraderos clandestinos o en sitios de depósito inadecuados, a partir de los cuales es posible contaminar los acuíferos que representan la principal fuente de agua dulce en la península de Yucatán.

Otro riesgo a la salud humana es la producción de gas de ácido sulfhídrico durante la descomposición del sargazo, ya que puede provocar enfermedades respiratorias y neurológicas.

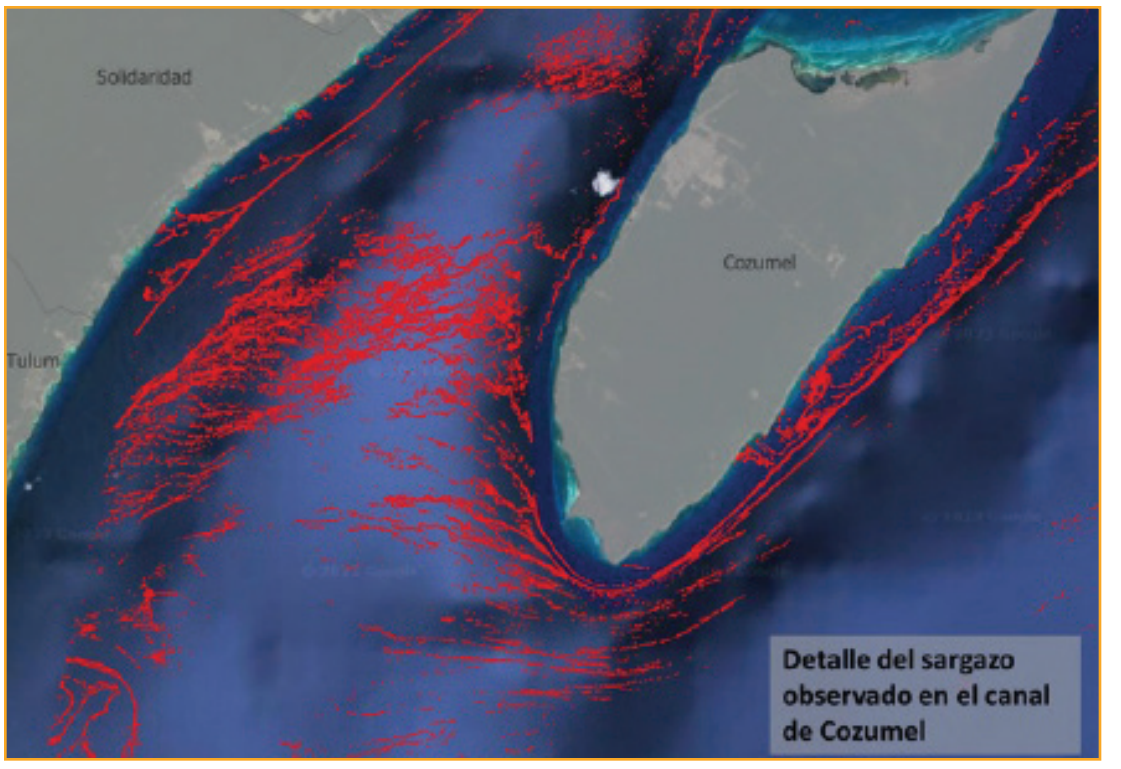
El recale masivo de sargazo también impacta la economía, ya que resulta en la devaluación de las propiedades en las playas y afecta a la industria turística. El costo anual de la limpieza del sargazo en el Caribe mexicano representa un gasto entre 129 y 285 mil dólares por kilómetro de playa, únicamente en salarios y transportación a sitios de disposición.

Las perspectivas a futuro sobre este fenómeno no son alentadoras considerando que su recurrencia en el Caribe apunta a que se trata de la "nueva normalidad". Además, las imágenes de satélite sugieren que es posible que la cantidad de algas arribando a las playas seguirá aumentando. Varios centros de investigación nacionales estudian este fenómeno, revisando aspectos como la biología y ecología de las algas, los factores que determinan su transporte oceánico y sus usos potenciales.

Desafortunadamente, los esfuerzos son insuficientes para evitar los daños provocados por la acumulación de las enormes masas algales en descomposición. El manejo de este fenómeno es complejo y representa un reto que requiere una respuesta coordinada de todos los sectores involucrados (gobiernos, academia, empresas y la sociedad civil). Una vez que se logre realizar un manejo adecuado del sargazo seguirá el reto de recuperar y restaurar los ecosistemas costeros del Caribe mexicano.

Abigail Uribe Martínez
Instituto de Ingeniería, UNAM, unidad Sisal/CIGoM
Eduardo Cuevas
Conacyt-Cinvestav/UABC
Sandra A. Gallegos Fernández
CIGoM
Jorge A. Trujillo Córdova
CIGoM
Correo-e: abigailum@gmail.com

Lo que sabemos a ocho años de monitoreo satelital sistemático



Detalle del sargazo observado en el canal de Cozumel

Ver grandes extensiones de la superficie terrestre en un instante, incluyendo sus mares y océanos, es posible desde hace más de 60 años a partir de la puesta en órbita de satélites que traen sensores especializados para construir lo que conocemos como imágenes satelitales. Estas imágenes son similares a las fotografías que tomamos con nuestros celulares, pero que contienen además información de "colores" que nuestros ojos no son capaces de percibir, ya que tienen una frecuencia y longitud de onda en el sector infrarrojo, que es muy útil para diferenciar la vegetación de otros objetos.

El sargazo flotando en el mar tiene una manera muy particular de verse a través de estos sensores especializados, lo que hace posible que podamos saber dónde está el sargazo a lo largo y ancho de cientos de kilómetros en un momento dado. La gran variedad de sensores satelitales genera imágenes de distintas extensiones en diversos periodos de revisita, es decir que cada tipo de imagen permite saber la distribución del sargazo en diferentes niveles de detalle espacial y temporal.

Para conocer la distribución del sargazo en una región relativamente pequeña, a un detalle suficiente para diferenciar patrones a nivel de localidad o municipio, mapeamos esta alga en 432 imágenes del sensor satelital Landsat 8-OLI, adquiridas entre enero de 2014 y diciembre de 2022. Estas imágenes proporcionan un dato integrado de lo contenido en 900 m^2 (píxel de 30 m por lado) y cubren hasta 150 kilómetros fuera de la costa del estado de Quintana Roo, obteniendo millones de datos de la misma zona cada 16 días, a manera de un muestreo sistemático. Los datos recabados nos permitieron observar las fluctuaciones de la presencia del sargazo en el mar, incluso un año antes de la arribazón masiva del 2015, así como determinar los picos máximos y la tendencia para este periodo de nueve años.

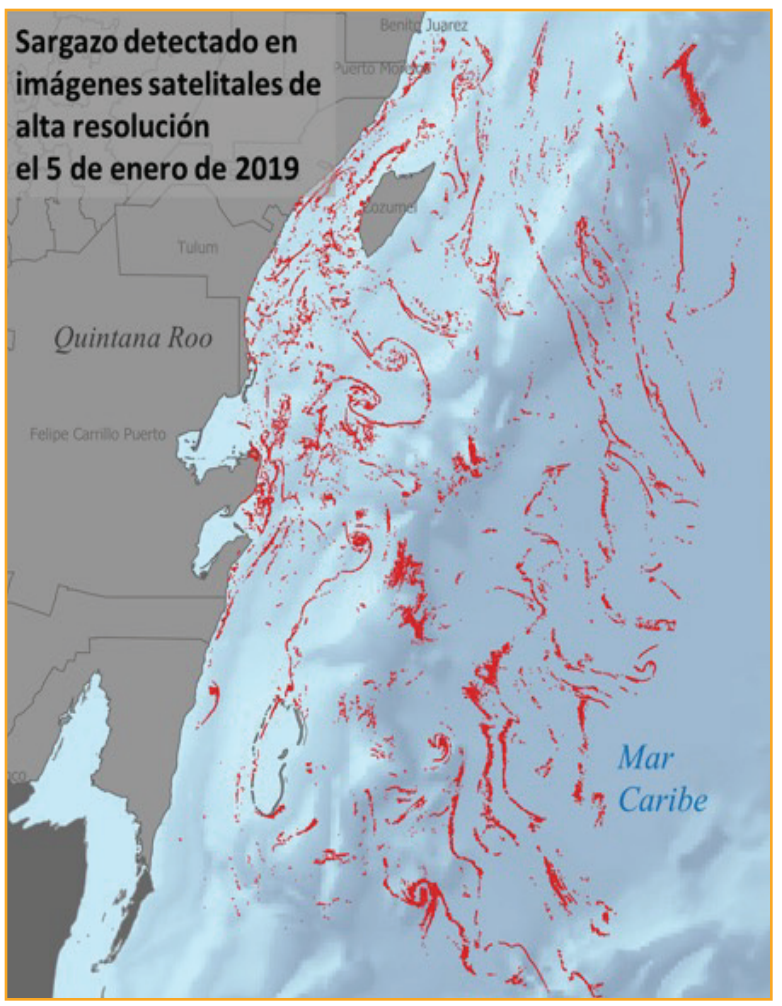
El sargazo en el mar visto desde el espacio

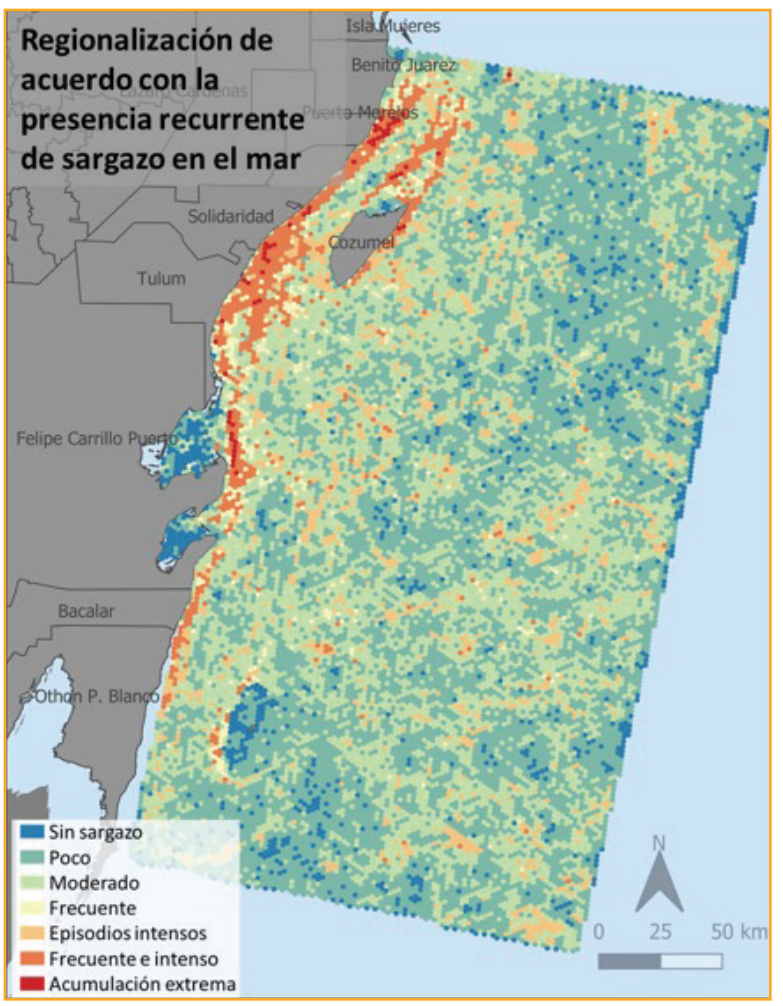
Los dóndes

A partir de conocer dónde estaba el sargazo en el mar del Caribe mexicano cada 16 días, quisimos contestar preguntas como ¿dónde ha habido más sargazo desde que comenzó el problema? ¿En dónde es más frecuente observarlo? ¿Qué municipios o playas han sido las más afectadas por la presencia del sargazo (considerando tanto la cantidad que ha llegado como el número de veces en que se ha observado)?

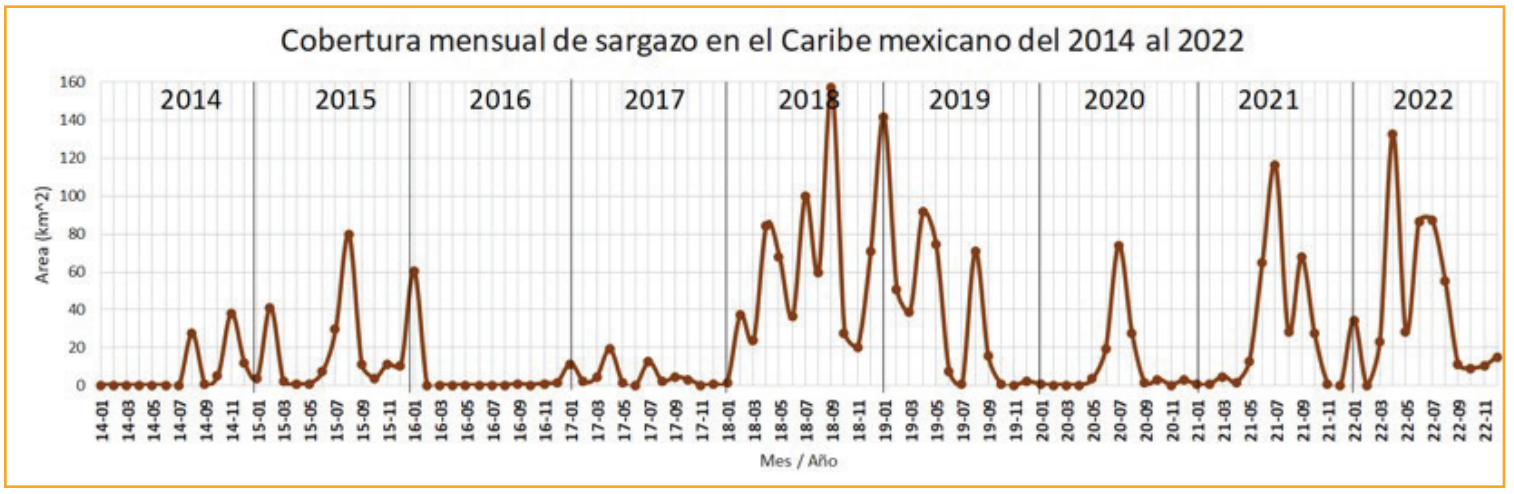
Para contestar estas y otras preguntas, realizamos diversos análisis espaciales para obtener mapas multitemporales que reflejan las zonas más o menos afectadas. Con esta información (y algunos análisis estadísticos) nos dimos cuenta de que, aunque toda la costa de Quintana Roo ha sido impactada por la presencia de esta alga en cantidades descomunales, hay regiones en las que la acumulación de sargazo es mucho más agresiva, en donde es más frecuente y ocupa mayores extensiones. Tal es el caso de la costa norte del municipio de Tulum y al sur de Solidaridad, donde se encuentran importantes ciudades turísticas como Playa del Carmen, Tulum y Akumal. En esta región el sargazo llega y se aglomera por un efecto similar a un embudo, debido a su ubicación geográfica frente a la gran isla de Cozumel y por la forma en que circula el agua predominantemente de sur a norte, lo que provoca que se aglomeren grandes cantidades por mucho tiempo. Le sigue el municipio de Puerto Morelos donde, además de afectar gravemente a las zonas hoteleras más importantes de la región, ha tenido fuertes impactos sobre los arrecifes de coral, pastos marinos, zonas de anidación de tortugas marinas, entre otros aspectos ecológicos importantes.

En el Caribe mexicano, la presencia recurrente de sargazo en el mar va decreciendo hacia la región sur de Quintana Roo, aunque con importan-





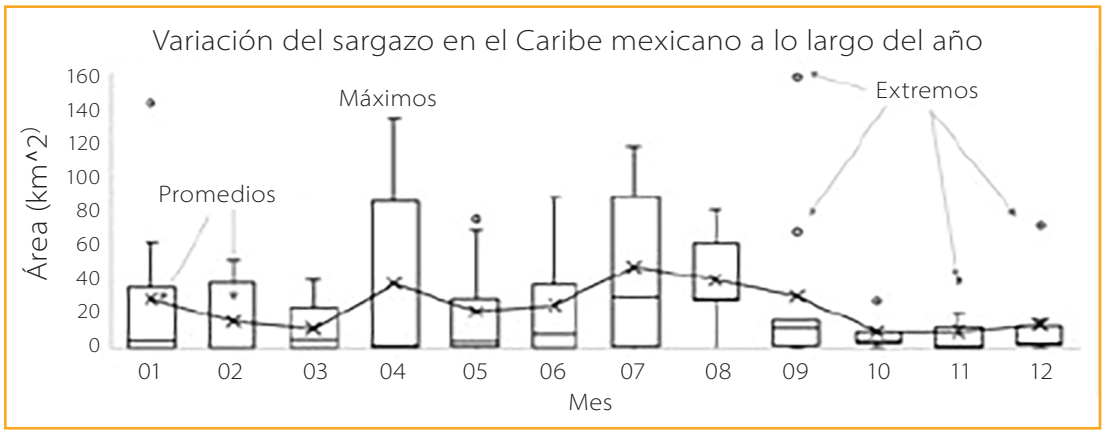
tes concentraciones del alga en las inmediaciones de la laguna de la Ascensión y en la costa del municipio de Bacalar. Es importante recalcar que los alrededores de la isla de Cozumel también han tenido de manera recurrente sargazo, aunque por la intensidad de las corrientes en el este de la isla (mar abierto) no llega a acumularse en cantidades como las observadas al sur de Puerto Morelos.



Los cuándos

Aunque se ha manejado que la "temporada de sargazo" ocurre durante el verano, con este largo acervo de imágenes satelitales analizadas, hemos observado la presencia extrema de sargazo en el mar prácticamente en toda época del año, con picos importantes inclusive en invierno. Sin embargo, debido a las condiciones (particularmente vientos y corrientes) que predominan entre otoño e invierno, el sargazo llega en mucho menores cantidades a las playas, en teoría porque los vientos del norte dificultan el transporte hacia el oeste.

A pesar de esto, es posible tener grandes arribazones de sargazo a las playas de Quintana Roo en temporada invernal, ya que si se conjugan grandes cantidades del alga en el mar, como las observadas en los inviernos del 2014-2015, 2018-2019 y 2021-2022 con las condiciones meteorológicas que transportan el sargazo a la playa, se tendrá un grave problema, más difícil de manejar al no estar preparados. Para el invierno de 2022-23 (tiempo en que se escriben estas líneas) ha sucedido uno de estos eventos, con cantidades inusuales de algas pelágicas llegando al litoral quintanarroense durante los meses de noviembre y diciembre.



Con estos años de monitoreo del sargazo en el mar utilizando imágenes satelitales de alta resolución observamos que la peor temporada sucedió entre febrero de 2018 y octubre de 2019, con una cantidad acumulada de sargazo (la suma de todo lo observado) mayor que todo lo detectado en los otros siete años. El 2022 fue un año también difícil, superando en cuatro meses, las cantidades máximas de la macroalga observadas previamente. Al inicio de este 2023 se ha planteado un pronóstico desalentador, con grandes extensiones de sargazo en la zona del Caribe central con potencial de arribar, aunque todavía falta muchísimo conocimiento para entender qué factores promoverían que este sargazo disponible en mar abierto recale en la costa mexicana.

Guillermo Díaz Méndez
CIGoM-CICESE

Francisco J. Ocampo Torres
CEMIE-Océano

Rogelio Hasimoto Beltrán
CIMAT

Bernardo Esquivel Trava
CIGoM-CICESE

Correo-e: gdiaz@cicese.mx

Microondas en el Caribe: los radares detectores de sargazo

Figura 1. Radar marino de banda-X. Forma parte de la estación RadMar. Se instaló en 2017 en el CICESE, como parte de las tareas del Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano

Foto: G. Díaz del 5 de febrero de 2019

Con principios físicos postulados a finales del siglo XIX, los radares se desarrollaron de manera secreta –pero simultánea– en varios países de Europa durante la Segunda Guerra Mundial. El término radar se acuñó a partir de las iniciales de Radio Detection and Ranging, que en inglés designaban a un aparato que empleaba ondas de radio para detectar objetos en el aire o en el mar, y estimar su localización.

Esta tecnología fue particularmente valiosa durante la guerra porque permitió detectar barcos y aviones enemigos tanto de día como de noche, aun en presencia de la niebla más intensa.

Con el tiempo, se propuso una nueva clasificación para las diferentes ondas que forman parte de la llamada radiación electromagnética (de la cual forma parte la luz que emiten el sol y las estrellas) y a las ondas de radio que se utilizaban en estos radares se les redefinió como *microondas*.

De acuerdo con esa reclasificación, pertenecen a este grupo aquella porción de la radiación electromagnética cuya longitud de onda, es decir, la distancia que existe entre dos crestas o dos valles sucesivos, mida de 1 mm a 1 metros –para nuestros lectores más técnicos, eso corresponde a valores de frecuencia de aproximadamente trecientos millones a trecientos mil millones de ciclos por segundo.

Las observaciones realizadas con la tecnología del radar son relevantes para detectar objetos en la superficie del océano, por ejemplo, cuando la nubosidad o la oscuridad son tales que impiden su observación a simple vista. Por lo tanto, es común ver radares –los llamados radares marinos o radares de navegación– instalados en las partes altas de los grandes barcos mercantes y pesqueros, por ejemplo, así como en puertos de mar, aeropuertos –donde suelen instalarse los famosos radares meteorológicos para detectar lluvia, tema que no tocaremos en este artículo–, y otras estaciones terrestres, como la que se muestra en la figura 1.

Figura 2. Sargazo varado en las costas del Caribe mexicano

Foto: G. Díaz el 7 de noviembre de 2022

Aunque en nuestro caso no se trata de detectar buques enemigos, investigadores del CICESE en Ensenada, del CIMAT en Guanajuato e independientes, (grupo de Teledetección Activa de la Rugosidad Superficial del Océano, TARSO; https://tarso.cicese.mx/), aprovechamos la tecnología del radar y los métodos computacionales avanzados para localizar grandes balsas y filamentos de sargazo que, flotando en la superficie del océano, son arrastrados por las corrientes marinas hacia las costas del Caribe mexicano (figura 2). Allí, si se acumulan en grandes cantidades, pueden llegar a causar fuertes impactos a la salud y a la economía de la región.

¿Y cómo se detecta el sargazo? Pues bien, en analogía con la eco-localización animal, como la que emplean delfines y murciélagos, por ejemplo, algunos radares forman imágenes con la reflexión de las microondas que emiten hacia la superficie del mar.

La señal reflejada por el sargazo tiende a ser de mayor intensidad que la del agua de mar que le rodea.

En la figura 3, donde mostramos una imagen de radar adquirida desde el espacio –¡sí!, desde el espacio, a más de 500 kilómetros sobre el nivel del mar–, podemos apreciar balsas de sargazo de más de 10 kilómetros de longitud, con forma de gota en tonos de gris claro que se destacan sobre un fondo gris más oscuro. Debido a que las microondas no tienen color, solemos representarlas en tonos de gris.

Una vez que se emplean esos métodos computacionales avanzados, como la llamada *inteligencia artificial,* se pueden aislar aquellos pixeles que corresponden al sargazo solamente (figura 4), para determinar su extensión y su ubicación geográfica.

Como mencionamos anteriormente, el radar se de-

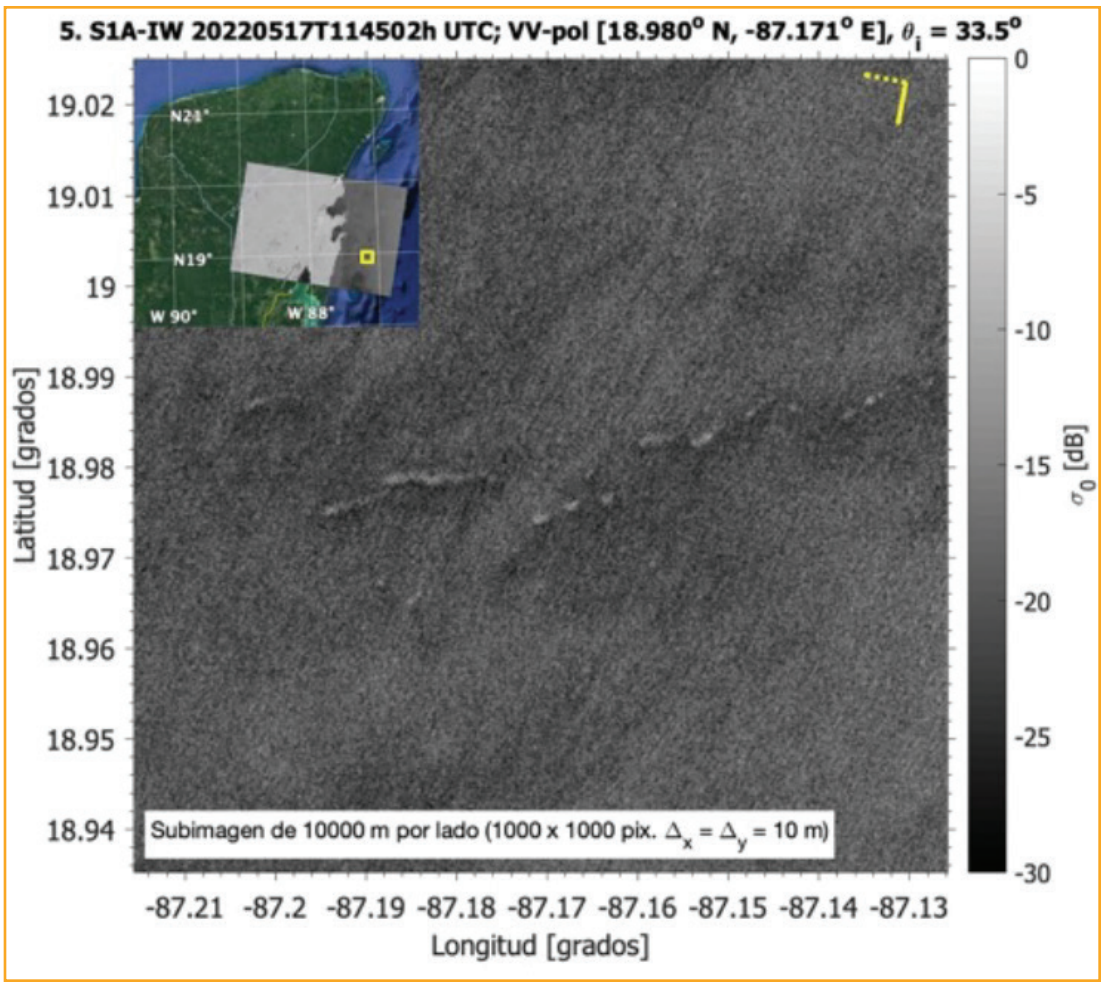


Figura 3. Sargazo detectado en una imagen de radar adquirida desde el espacio por el satélite europeo Sentinel-1A, el 17 de mayo de 2022 al noreste del banco Chinchorro, en el Caribe mexicano

Figura 4 (abajo). En blanco se muestran los pixeles correspondientes a las balsas y filamentos de sargazo detectados mediante técnicas de cómputo avanzado; en negro, los pixeles asociados con el océano circundante

Cortesía de R. Hasimoto Beltrán y Metros. Canul, CIMAT

sarrolló para detectar barcos y aviones enemigos, y desde la construcción de los primeros radares se aprovechó esta gran ventaja estratégica, aunque por su tamaño debían ser alojados en instalaciones secretas.

Más tarde, se diseñaron radares de menor tamaño para poder ser instalados también en barcos y en aviones. El avance de la tecnología permitió la construcción de radares cada vez más pequeños; tanto que, en 1978, la NASA (la dependencia encargada de la gestión aeronáutica y espacial de los Estados Unidos de América), puso en órbita el primer satélite civil que transportaba un radar diseñado para tomar imágenes de la superficie de la Tierra.

Aunque este satélite tuvo un tiempo de vida de unos pocos meses, las imágenes que adquirió de la superficie del océano fueron impresionantes. Tanto, que las agencias espaciales de países como Canadá, Alemania, Japón, China, India, Italia, España y Argentina, tienen algún tipo de radar en sus programas de observación de la Tierra.

Organismos multinacionales, como la Agencia Espacial Europea, han puesto en órbita dos satélites equipados con tecnología de radar (los Sentinel-1) que, irradiando con microondas el mar Caribe de manera regular, adquieren imágenes de la superficie del océano desde 2014.

Esta plétora de radares complementa las observaciones que se realizan regularmente con cámaras muy especializadas también transportadas en satélites, cuyas imágenes fotográficas estamos más acostumbrados a observar. Aunque en ellas las islas de sargazo se podrían apreciar más claramente, las imágenes de radar tienen la ventaja de que las microondas no se ven afectadas por las nubes y son independientes de la radiación solar.

Por lo tanto, en las imágenes de radar se pueden registrar las características de aquellos procesos físicos, químicos y biológicos que imprimen su huella sobre la superficie del océano, aún durante las condiciones más extremas y a cualquier hora del día o de la noche.

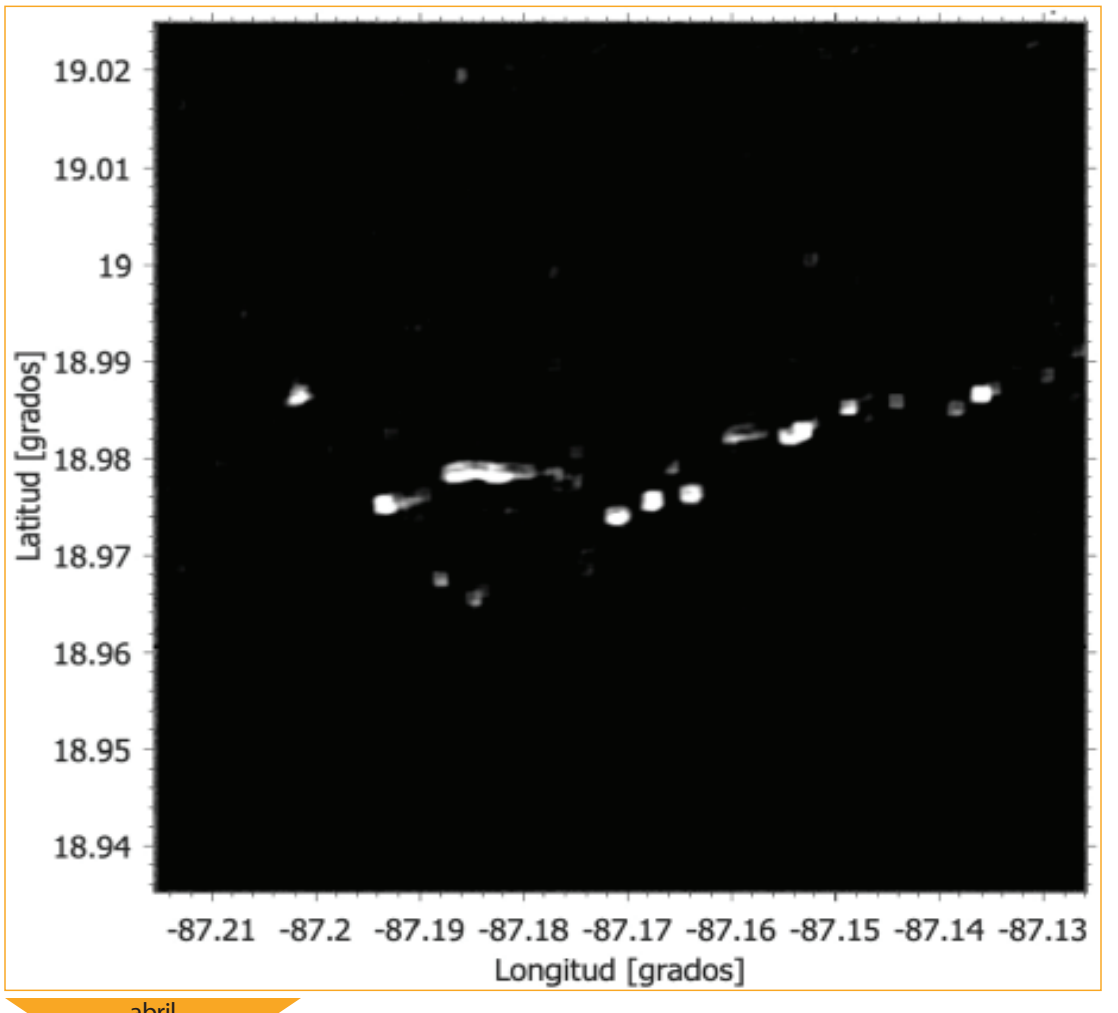
Y si lo anterior fuera poco, cabe mencionar que los radares también aportan un granito de arena en otro aspecto relevante para la detección de sargazo en el mar abierto, como la estimación de algunas características de la dinámica de la capa superficial del mar.

A partir de las imágenes de radar es posible estimar la velocidad del viento sobre la superficie del océano y obtener información de algunas de las características de las olas. Estos parámetros son fundamentales porque influyen significativamente en la capacidad de los radares para detectar objetos en la superficie del océano, como sargazo, petróleo, buques, etcétera.

En cuanto al viento, en muchos casos es posible estimar directamente de la imagen la dirección en la que sopla, ya que éste imprime una huella en forma de estrías sobre la superficie del mar. Conociendo esta dirección, la rapidez se calcula a partir de fórmulas matemáticas relativamente sencillas.

Por lo que toca al oleaje, a partir de las imágenes del radar se puede estimar la dirección predominante de las olas, así como su longitud de onda; incluso, se puede determinar si existe más de un sistema de oleaje, situación a la que los marinos llaman "mar cruzado" y que puede ser muy peligrosa para la navegación.

Bajo ciertas condiciones, con base en esta información es posible calcular las características de una corriente que es fundamental para el transporte de material –como el sargazo– en la superficie del mar. A esta corriente inducida por las olas se le denomina "deriva de Stokes", en honor al físico anglo-irlandés Sir George G. Stokes, que la estudió en el siglo XIX.



La Jornada ecológica

Detección satelital del sargazo flotante

Eduardo Cuevas
Conacytxp-Cinvestav/UABC
Abigail Uribe Martínez
Instituto de Ingeniería, UNAM, unidad Sisal/CIGoM
Correo-e: amir.cuevas@gmail.com

La luz que ilumina los objetos sobre la Tierra se refleja de forma diferente en el agua, la vegetación y los suelos. Estos reflejos son captados por cámaras especiales colocadas en satélites que permiten registrar la magnitud de los reflejos y así determinar los objetos presentes.

Dos de las características de los instrumentos es su resolución espacial, que se refiere al tamaño del área de la cual se registrará el reflejo, también conocido como el tamaño del píxel, y la otra son las regiones de la luz ya sea luz visible o del infrarrojo de donde se captará la intensidad del reflejo, conocida como resolución espectral o bandas.

Los datos adquiridos se complementan con la capacidad del satélite para pasar por el mismo lugar, a lo que se denomina resolución temporal, ya sea que pase todos los días o cada semana. Esta tecnología es conocida como teledetección o percepción remota.

Para detectar el sargazo se aprovecha de sus propiedades como planta para que su reflejo sea registrado por teledetección. En este trabajo comentaremos sobre tres instrumentos cuyas características permiten la detección del sargazo a diferentes escalas espaciales y temporales ilustradas con imágenes frente a la costa del Caribe mexicano.

Sentinel 2, A y B

Son dos satélites idénticos del proyecto European Union's Earth observation programme Copernicus (https://www.copernicus.eu/en) que orbitan la Tierra a una altura aproximada de 786 kilómetros, en un modo que se conoce como heliosíncrono o sincronizado con el sol.

Estas características permiten que las tomas realizadas con estos instrumentos sean más o menos a la misma hora, y revisitas sobre el mismo lugar con los dos satélites cada cinco días.

Los satélites llevan a bordo el sensor Multispectral Instrument (MSI) que permite adquirir información de un amplio rango de canales espectrales (similares a "colores", incluyendo algunos que los humanos no podemos ver) con tamaños de píxel de 10 y 20 metros, bastante útiles para detectar balsas de sargazo considerablemente pequeñas. En un solo paso de estos satélites se puede observar toda la costa de Quintana Roo y hasta aproximadamente 150 kilómetros mar adentro, de tal forma que después de hacer diversos tratamientos a estas imágenes, se pueden generar los llamados índices de vegetación y algas flotantes (ver figura 1).

Landsat 8 y 9

Estos satélites fueron puestos en órbita por Estados Unidos. Tienen la capacidad de medir en diferentes bandas tanto del visible como del infrarrojo en píxeles de 30 x 30 metros. Al moverse en su órbita, tienen una vista del territorio en una franja de 190 kilómetros de ancho conocidas como trayectorias, que son divididas cada 200 kilómetros asegurando un pequeño traslape entre ellas.

Los dos satélites tienen un intervalo de 16 días para volver al mismo lugar, pero si se combinan, el tiempo se reduce a ocho días. Esto quiere decir que con este par de satélites es posible monitorear semanalmente y en cualquier lugar la localización del sargazo.

El área de monitoreo se integra de dos trayectorias, la contigua a la costa que se extiende hasta los 180 kilómetros mar adentro y la más alejada de la costa, que inicia a 180 kilómetros y se extiende hasta los 360 kilómetros. Las imágenes descargadas de la plataforma https://earthex-

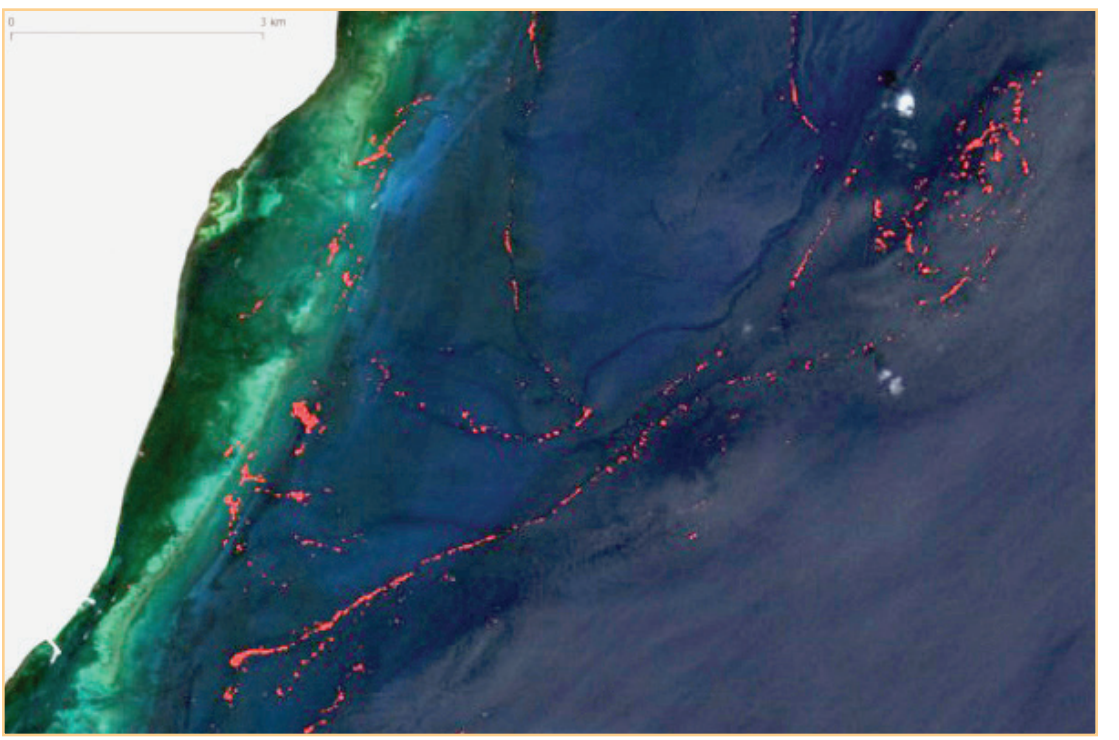


Figura 1. Sargazo detectado (en rojo) en una imagen Sentinel 2-MSI del 18 de septiembre de 2022 frente a las costas de Puerto Morelos, Quintana Roo

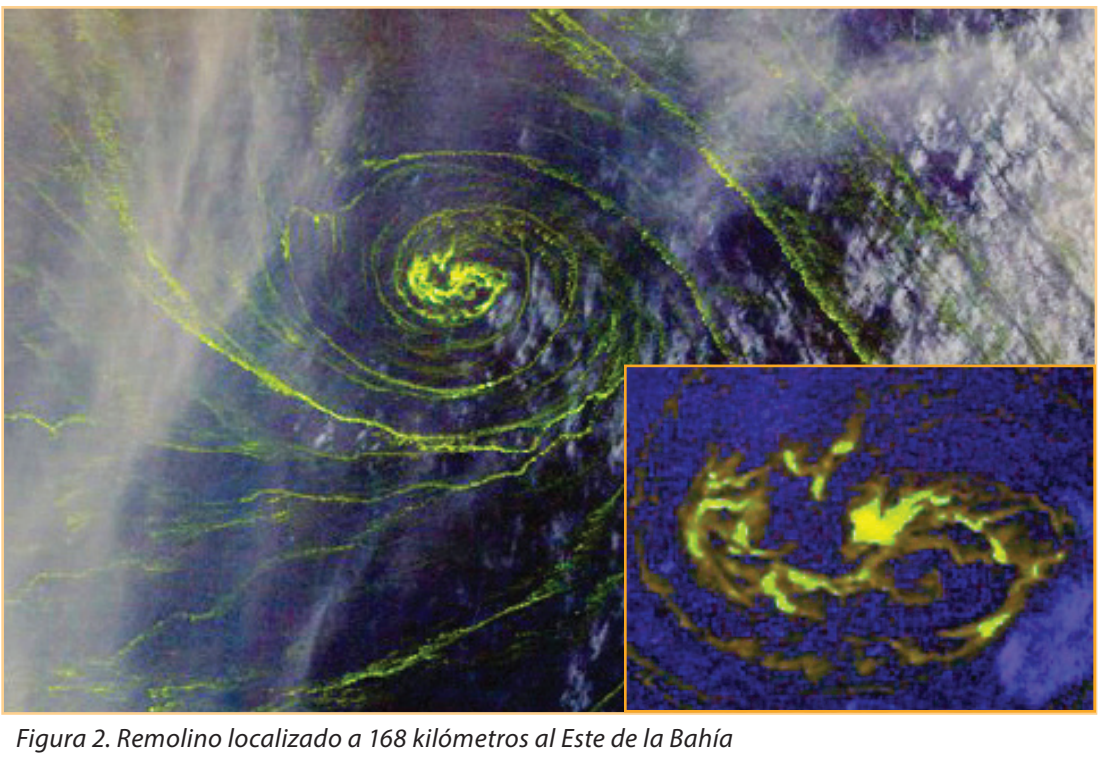


Figura 2. Remolino localizado a 168 kilómetros al Este de la Bahía de la Ascensión el 14 de mayo de 2022. Tiene un diámetro de 33 kilómetros y al centro una isla de acumulación de 21 hectáreas mostrada en el recuadro

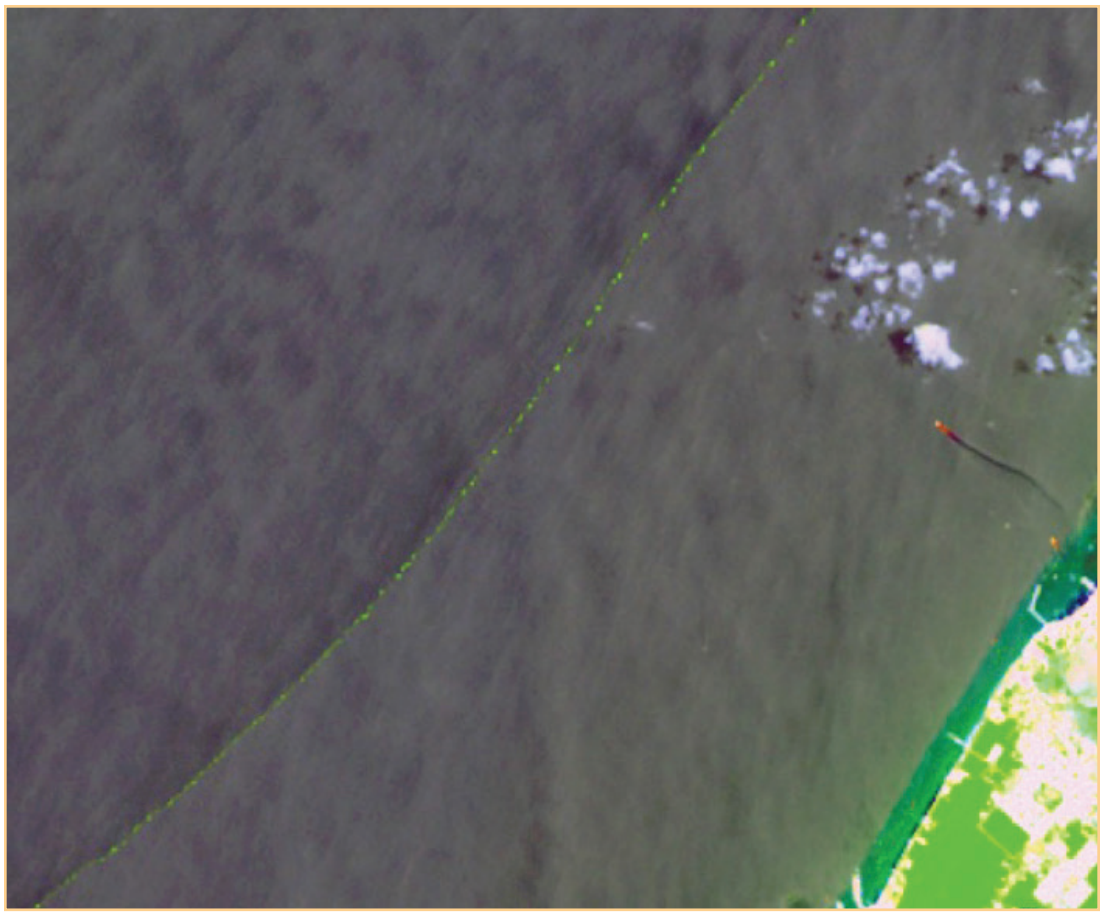


Figura 3. Segmento de 14 kilómetros de un filamento de longitud total de 92 kilómetros localizado entre Cozumel y Playa del Carmen el 16 de julio de 2022

Figura 4. Conjunto de segmentos paralelos en dirección ONO de longitud entre 2 y 5 kilómetros en un área de 20 mil hectáreas localizada a 242 kilómetros dirección SE entre los límites de México y Belice de fecha 6 de mayo de 2022

Figura 5. En rojo se distinguen largas balsas de sargazo de más de 100 kilómetros de longitud acercándose a las costas de Quintana Roo que fueron observadas por el sensor Sentinel 3-OLCI a partir de índices de vegetación y algas flotantes el 25 de septiembre de 2022

plorer.usgs.gov ilustran el nivel de detección de este instrumento con una selección de bandas que recibieron un tratamiento digital para resaltar el sargazo flotante (ver figuras 2, 3 y 4).

Sentinel 3

Esta misión también es parte del proyecto European Union's Earth observation programme Copernicus que opera en coordinación con Eumetsat (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) para colectar y distribuir imágenes satelitales, especialmente del mar.

Esta es una gran ventaja sobre otros sensores como Landsat o Sentinel 2, que fueron diseñados fundamentalmente para estudiar sistemas terrestres. Este satélite lleva varios sensores, entre los que está el OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) con una gama de canales mucho más amplia.

Tiene un detalle espectral tan fino como para detectar pequeñas diferencias en el color del mar, que más allá de ser azul, varía de acuerdo con objetos flotantes incluyendo algas desde microscópicas que forman parte del plancton, hasta macroscópicas, como el sargazo.

Aunque este sensor genera información de 300 metros de tamaño de pixel, lo que se conoce como resolución moderada, tiene un periodo de revisita entre uno y dos días y genera datos en una sola toma de hasta 700 kilómetros fuera de la costa de Quintana Roo.

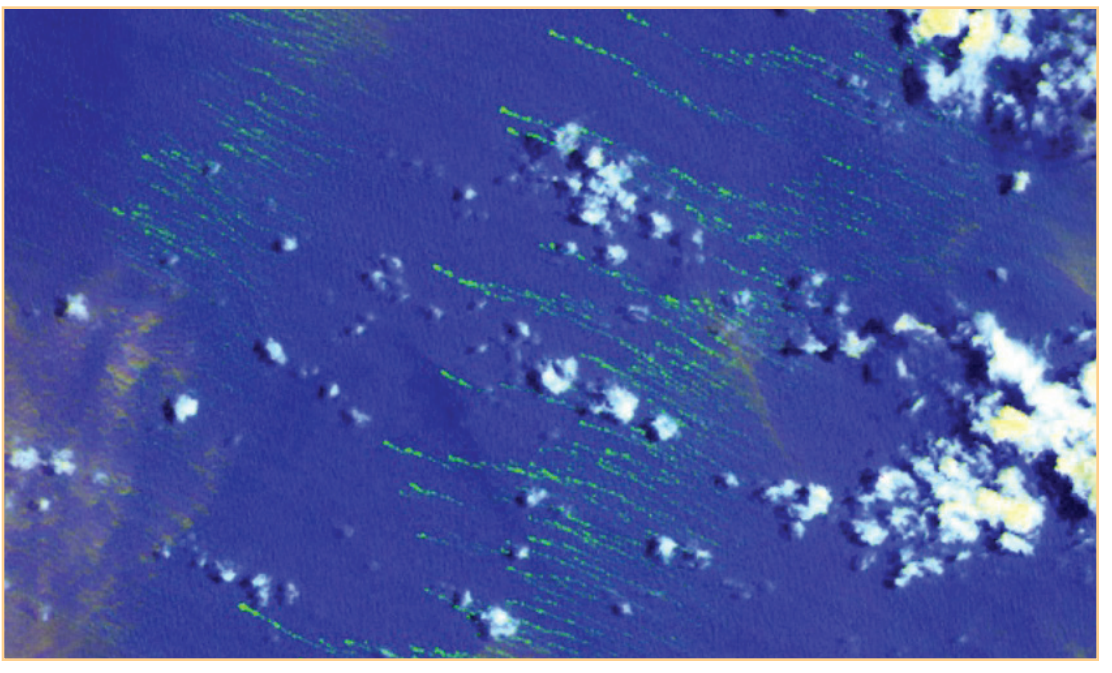
Estas características nos permiten conocer la distribución del sargazo casi todos los días en regiones considerablemente alejadas de la costa, con lo que podemos contribuir con otros especialistas en oceanografía, para pronosticar a dónde potencialmente pueden llegar a recalar esas balsas de sargazo con varios días de anticipación.

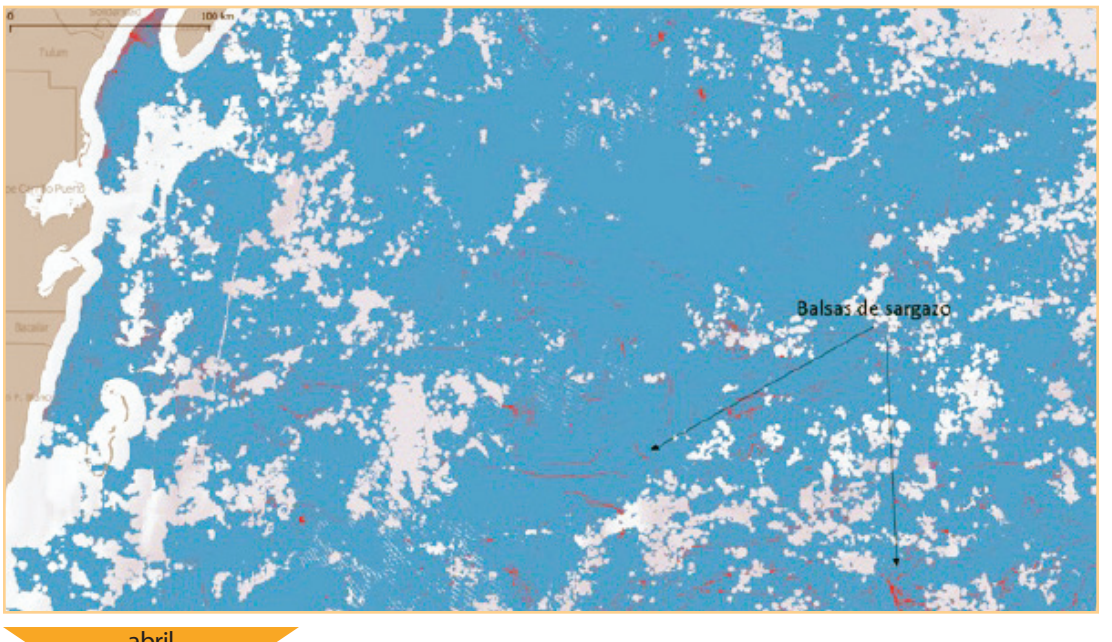
Las técnicas de percepción remota con sensores multiespectrales nos presentan oportunidades invaluables para observar grandes extensiones de mar y conocer en dónde está el sargazo en un momento dado para así aportar elementos a las herramientas predictivas que ayuden a anticipar las necesidades de personal, equipos, traslados, etc., así como los tiempos adecuados para instrumentar las medidas de manejo.

Estas medidas serán de gran utilidad para determinar zonas de colecta tanto en playas como en el mar y para el diseño y colocación de estructuras de desvío.

Es importante considerar que no son perfectas, ya que tienen grandes debilidades como que no pueden "ver" nada por debajo de las nubes (¡una gran desventaja en temporada de tormentas!) y que solo representan una instantánea del momento en que pasa el satélite, por lo que en ciertos periodos puede no existir información disponible que nos ayude a anticipar dónde anda el sargazo que puede llegar a nuestras costas.

A pesar de todo, las imágenes satelitales nos permiten generar productos que constituyen una fuente invaluable de información para cuantificar la presencia del sargazo, determinar su ubicación, establecer la posible recurrencia o preferencia de arribos a ciertas zonas y, lo más importante, para poder predecir su desplazamiento.





La Jornada ecológica

Fernando Andrade-Canto
ECOSUR

Francisco Javier Beron-Vera y Josefina Olascoaga
Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami

Lorena Guerrero Moreno
CICESE

Correo-e: fernando.andrade@ecosur.mx

Kukulcán, génesis, evolución y apocalipsis de un portador de sargazo

Fue al minuto 55 que un chaparrito y gordito se giró rápidamente y se llevó el balón desde la media cancha, sin que Hoddle, Reid, Sansom, Butcher y Fenwick se lo pudieran arrebatar. Finalmente quedando mano a mano frente al portero, ese singular joven eludió al arquero y concluyó con una hermosa y gloriosa jugada que lo convirtió en un héroe, y para algunos en un Dios.

Esto sucedió el sábado 22 de junio de 1986 en la ciudad de México. Para muchos, que como yo, consideramos al fútbol como un deporte tan popular que se puede jugar en un patio de tres metros cuadrados con una botella de plástico, o hasta en un templo dedicado a tan noble arte, sabemos que jugadores de fútbol hay miles por todo el mundo, sin embargo como *Pelusa* y *Pelé* hay pocos, realmente pocos.

Al igual que con los jugadores de fútbol, en los océanos y mares, la cantidad y presencia de remolinos es casi infinita. Hay de todos los tamaños (radios): milímetros, metros y kilómetros, no hablemos de su profundidad.

Al formarse, algunos de ellos atrapan masas de agua con características típicas de salinidad, temperatura y nutrientes. Al desplazarse acarrean estas masas a grandes distancias, eludiendo o interactuando con otros remolinos y corrientes. Imaginen a un jugador de fútbol que tiene la capacidad de llevar el balón por toda la cancha esquivando a jugadores que tratan de arrebatarle el balón, ahora piensen en un remolino con semejante capacidad, que no son muchos.

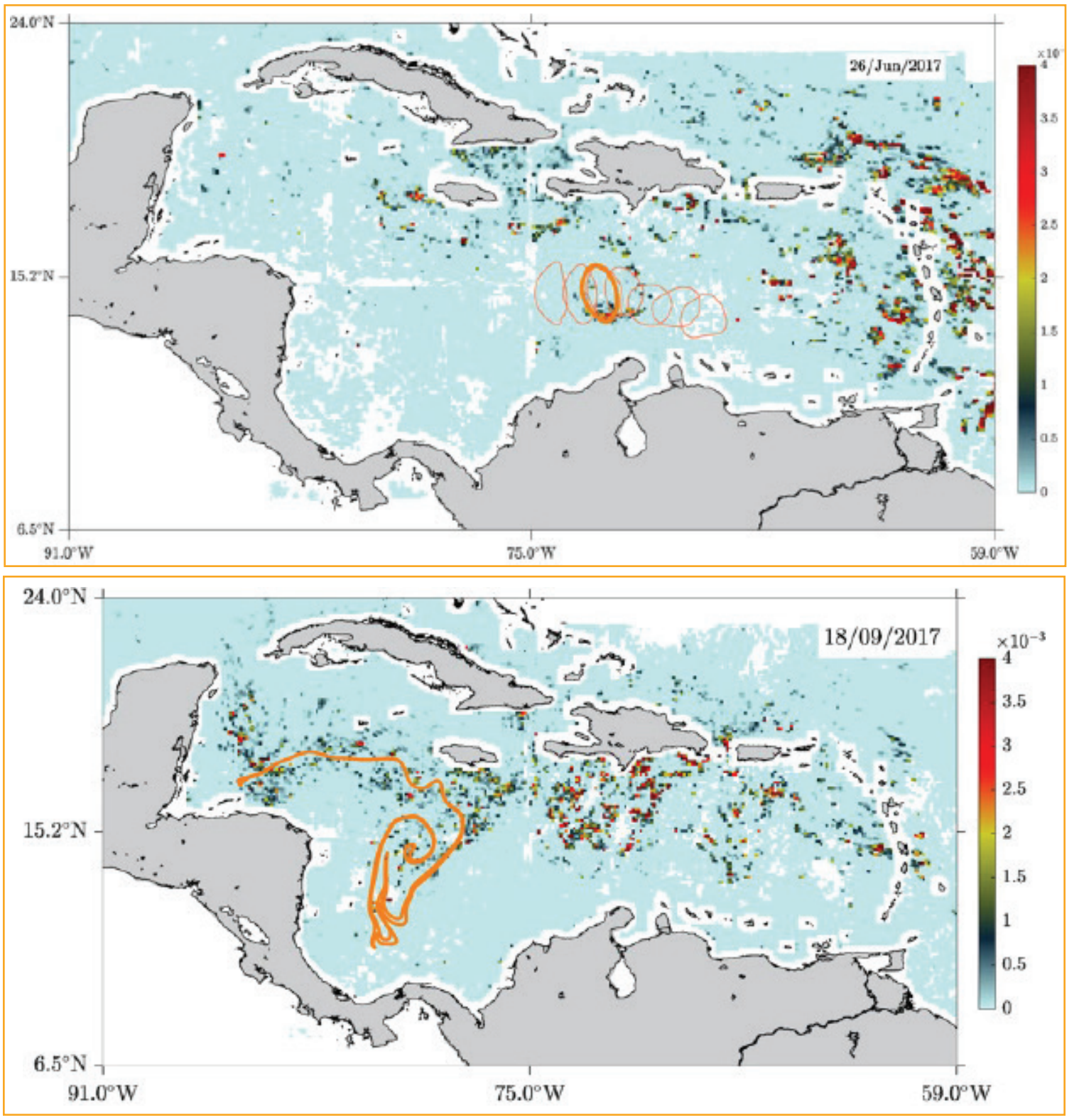


Figura 1: Evolución de Kukulcán:
a) Remolino en periodo de coherencia, donde se puede ver como el sargazo... *(ver pág. 12)*

Siguiendo con la cansina temática del fútbol, a los remolinos podemos separarlos en anticiclónicos y ciclónicos, los primeros patean o giran a la derecha, y los ciclónicos a la izquierda. Esto solo sucede en el hemisferio norte, en el hemisferio sur ocurre al revés.

Por ello, al encontrar un remolino que pueda acarrear nutrientes o masas de agua por un tramo grande, exagerando un poco, podríamos considerarlo una tarea difícil tal como lo es descubrir a jugadores como *Pelé,* Maradona y hasta Messi, para que no se quejen.

Dirán "¡no le echen tanta crema a los tacos!" pero de-

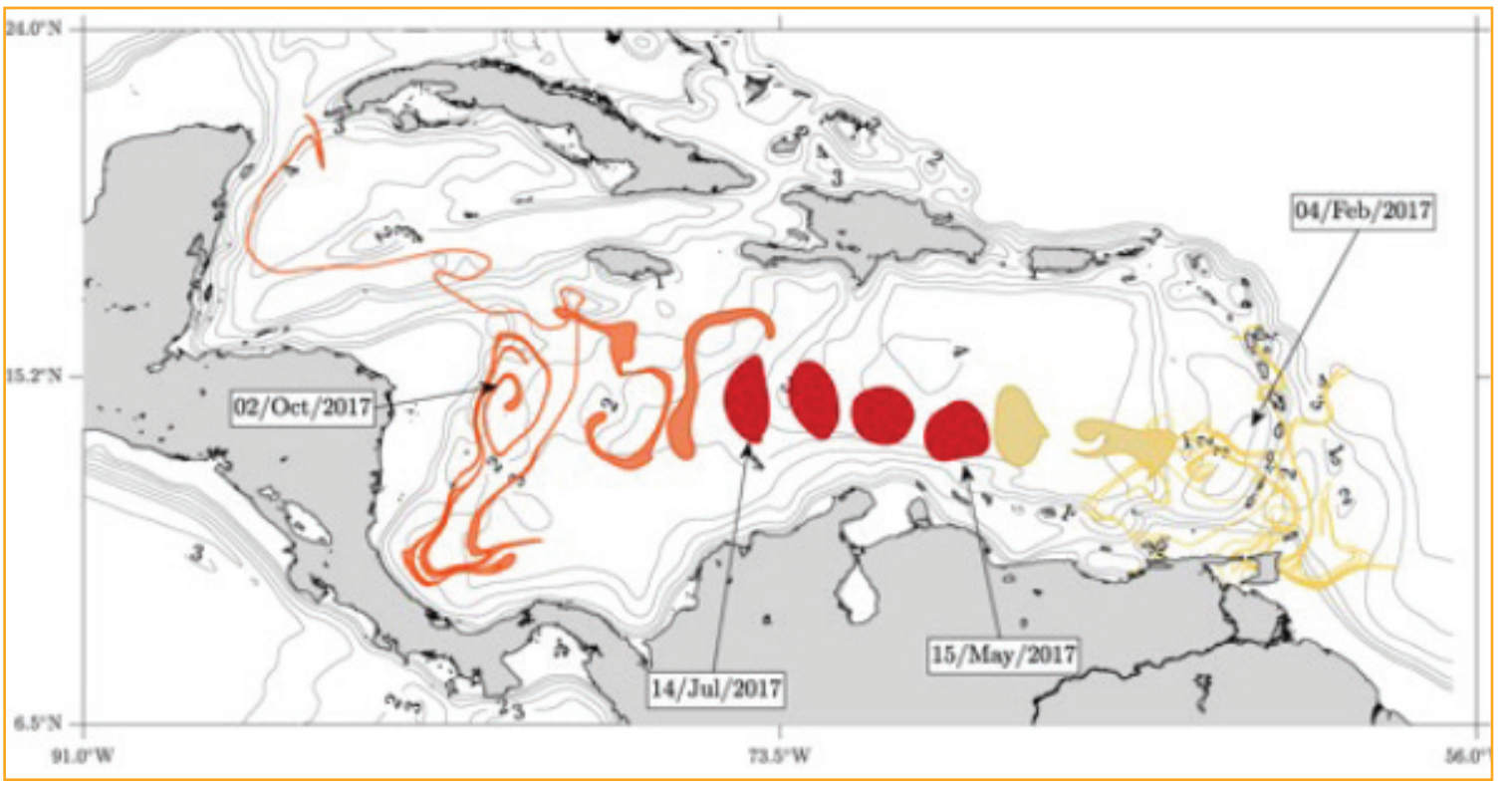


Figura 2: Génesis, evolución y apocalipsis de Kukulcán

tectar este tipo de remolinos hace algunos años no era posible. Lo que se hacía y se sigue haciendo es detectar contornos cerrados de la vorticidad en un instante, a esto se le definía como remolino. Para seguir su trayectoria cada día se identificaba el contorno cerrado asociado a dicho remolino y se estimaba la trayectoria y vida de los remolinos.

Siguiendo el símil del fútbol, si en dicho partido hubiésemos definido a los jugadores por su percha, hubiésemos dejado a nuestro gran héroe en la banca; lo más común sería decantarnos por jugadores atléticos y altos, que parcialmente no cumplía nuestro héroe.

No obstante, el método de contornos es bastante práctico y fácil de usar, sigue siendo bastante útil, a pesar de su halo de incertidumbre.

Los matemáticos que estudian los fluidos desarrollaron teorías y metodologías que permitieran una detección más objetiva de un remolino. No puedo hacer mención de todos los que han trabajado en los remolinos, pero sí mencionar que en el año 2000, George Haller acuñó el término Lagrangian Coherent Structures (LCSs).

Estas LCSs actúan como barreras materiales que las partículas no pueden atravesar. Las LCSs organizan el flujo en regiones cuyas trayectorias poseen una dinámica distinta. Fue en 2013 cuando, junto con Francisco Javier Beron-Vera, se desarrolla la metodología para determinar de manera objetiva los bordes de los remolinos que son capaces de preservar el área que delimitan.

En su trabajo mostraron que los remolinos encontrados rápidamente se deformaban rápidamente mientras que los remolinos detectados por este método eran capaces de mantener su forma transportando las propiedades que estos habían atrapado al momento de formarse.

Posteriormente, junto con María Josefina Olascoaga y Philippe Miron formularon una ecuación (conocida por sus siglas como BOM) en la que simulan el movimiento del sargazo y postularon la idea de que el sargazo puede moverse como una red de puntos unidos por resortes.

Inicialmente uno define que tanto este resorte puede estirarse o comprimirse. Gracias a esta ecuación demostraron que los remolinos coherentes tienden a atraer el sargazo.

En 2021, analizamos los remolinos que se forman en el este del mar Caribe, entre las Antillas menores hasta la línea imaginaria comprendida entre Nicaragua y Jamaica.

Utilizamos velocidades de la superficie del mar calculadas a partir de la altura dinámica de la superficie del mar que se obtiene de mediciones realizadas por altímetros montados en satélites. Analizamos datos desde 2011 hasta 2019, encontramos que generalmente hay hasta cuatro remolinos ciclónicos por año con tiempos de vida que van de 20 a 90 días y un radio medio de alrededor de 75 kilómetros, mientras que de los anticiclónicos podemos encontrar hasta siete al año con tiempos de vida de 30 hasta más de 100 días y radio medio de unos 80 kilómetros.

Podemos decir que en la región este del mar Caribe hay más remolinos derechos que viven más tiempo y son más grandes que los remolinos zurdos.

Para los remolinos derechos detectados, encontramos una secuencia en la que observamos como el sargazo se aproximaba al remolino y como éste, al desestabilizarse o deformarse, contribuía a la inundación de sargazo en las costas del Caribe.

La presencia de nubes y otros factores complican la detección de sargazo, lo cual es apreciable en las manchas blancas que se muestran en la figura 1. La detección del sargazo en mar abierto se describe en otras secciones de esta edición.

Por lo difícil que puede ser detectar a estos grandes futbolistas-remolinos, decidimos denominar a uno de ellos *Kukulcán*. Las imágenes pueden decir más que mil palabras, por ello la crónica de este gigante se describe en la figura 2. El color amarillo indica la formación o génesis del remolino, se observa como una maraña de filamentos va convirtiéndose en una pelota alargada.

Se torna de color rojo durante su periodo de coherencia, el tiempo durante el cual no se deforma y transporta masas de agua. Los tonos anaranjados muestran a un Kukulcán "trastabillando" al final de la cancha, donde la batimetría (profundidad) pareciera jugarle una mala broma.

Es ahí que, con el ímpetu de llegar a como dé lugar, comienza a deformarse y desestabilizarse hasta que se filamenta por completo y todo aquello que acarreaba se mezcla con el océano.

La aplicación de estas metodologías puede contribuir a la previsión de arribo de sargazo a la costa vigilando la progresión de los remolinos de mesoescala detectados geodésicamente a partir de altimetría.

Nuestro proyecto se enfoca en el Caribe mexicano por lo que la detección de estos remolinos, de momento, no está contemplada. Pero sí se pretende determinar las rutas más probables que puede llevar el sargazo utilizando las metodologías de las LCSs, con esto se quiere ayudar al personal encargado de la recolección de sargazo en aguas costeras y en mar abierto.

Esto último se realizará utilizando predicciones hechas con datos de radares y de modelos oceánicos. Se espera proporcionar las rutas más probables del sargazo en tiempo cuasi real y durante los días pronosticados.

La metodología, usos de los radares y modelos numéricos se describen en otras secciones de esta edición.

Figura 1 ...está ingresando en el anillo con línea gruesa y b) Kukulcán *completamente desestabilizado con el sargazo viajando con él contribuyendo a la marea dorada en la costa del Caribe. En ambas figuras se muestra la distribución de sargazo obtenida por satélite (porcentaje de cobertura en un píxel) en la superficie oceánica del Mar Caribe*

En búsqueda de patrones en la dinámica poblacional del sargazo

Jaime M. González Cano
Inapesca/Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera (CRIAP)-Puerto Morelos

Francisco Arreguín Sánchez
IPN-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas

Jaime E. García Zúñiga
Inapesca/CRIAP-Puerto Morelos

Correo-e: jaime.gonzalez@inapesca.gob.mx

En los últimos nueve años la palabra sargazo implica "problemas" e incertidumbre en las costas del Caribe mexicano. Año con año, la población que vive a lo largo de la costa de Quintana Roo, la gente que se dedica a la actividad turística y las autoridades del estado se preguntan: ¿qué tan abundante serán los arribazones?, ¿serán peores que en años anteriores?, ¿en qué mes comenzarán a llegar?

Lo que llamamos sargazo está conformado de dos especies de macroalgas pardas que viven solo en la superficie del mar. Se sabe de su presencia desde que Cristóbal Colón realizó su primer viaje, en el área conocida como Mar de los Sargazos, ubicada en la zona septentrional del Océano Atlántico. Desde el año 2011, estas especies comenzaron a crecer rápidamente esparciéndose por la zona del Mar Caribe, generando problemas en las costas de los países caribeños con afectaciones al turismo, la salud de los pobladores locales y la de los ambientes costeros.

¿Por qué se generó un crecimiento explosivo en las poblaciones de estas dos especies? No se sabe con certeza y se están haciendo estudios para poder dar una respuesta a este acontecimiento. Este tipo de fenómenos no son fáciles de explicar, generalmente son muchos los factores que tienen que analizarse para poder dar respuestas concluyentes. En espera que se pueda contar con más información y, para efectos prácticos, interesa saber si el fenómeno será más abundante cada año, agravando los problemas que ya se generan.

Para quienes nos dedicamos a estudiar la dinámica de recursos naturales en el medio acuático, una forma de dar respuestas es tratando de encontrar patrones en el comportamiento de las poblaciones. Cuando hablamos de patrones, nos referimos a algo que se repite o que se manifiesta, como la presencia de una tendencia a seguir creciendo o, por el contrario, si manifiesta un decremento; otra opción es que no se presente una tendencia y que oscile en el tiempo, con relación a un valor promedio. El problema es que para encontrar estos patrones y contestar a estas preguntas, se necesita más tiempo.

La problemática que está generando el sargazo y su manejo demandan respuestas rápidas. No existe un periodo de espera, además, se debe trabajar con lo que se tiene. Es importante hacer análisis con los datos e información disponibles. Estos análisis permitirán establecer el comportamiento más probable en el futuro, información que serviría para dar consejo y ayudar en la toma de decisiones. De esta manera se establece un "manejo adaptativo" utilizando la información que se va adquiriendo para futuros análisis.

La información sobre la biomasa del sargazo en la nueva zona de distribución es generada desde el año 2011 por investigadores del Laboratorio de Oceanografía Óptica de la Universidad del Sur de Florida. Esta información es de acceso público. Con esta información se ha trabajado para encontrar patrones en la dinámica poblacional en nuesta zona de interés. Estos resultados también han sido analizados utilizando las anomalías de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), encontrando relaciones que permiten entender más sobre este fenómeno.

Los 12 años de datos de sargazo analizados permiten

distinguir la presencia de un patrón estacional de cuatro años; lo que significa tener máximos de biomasa de sargazo cada cuatro años y, por consiguiente, mínimos también cada cuatro años. A partir del año 2018 no se observa una tendencia ascendente. De seguir con el mismo comportamiento, el promedio de biomasa de estas especies de macroalgas es probable que se mantenga oscilando entre los 53 y 115 millones de toneladas anuales, teniendo un comportamiento oscilatorio tipo convergente; pudiendo mantenerse, mientras no cambien las condiciones.

Sabremos más y podremos confirmar esta oscilación en la medida que se continúe generando información que permita conocer más sobre este fenómeno. La información sobre los volúmenes y biomasas de sargazo son importantes para la planeación y prevención de este fenómeno. Solo con el paso del tiempo se podrá determinar si los resultados a la fecha son correctos o no. Sin embargo, por cuestiones de manejo y aprovechamiento, es de suma importancia conocer los años en que se esperan afluencias y arribazones máximas o, por el contrario, cuándo el recurso se comportará benévolamente y reducirá las tareas de limpieza, los gastos para la extracción y control en las playas y en las actividades relacionadas con este fenómeno.

Para abordar este fenómeno y su problemática, las tareas deben ser repartidas. En nuestro caso, analizamos este fenómeno con el conocimiento adquirido para otros recursos marinos. Se conoce poco del sargazo, por lo que la tarea de otros grupos de investigación es tratar de explicar porqué se generó, cuáles son las posibles causas de ello, de qué nutrientes se alimenta, etc. Nuestro trabajo está enfocado a entender el comportamiento de la población de sargazo, estimar qué tan rápido crece, qué tan rápido muere y qué tan rápido migra hacia la zona de interés o sale de ésta. Información que nos permite relacionarla con cuánto de lo que se genera en toda su área de distribución llega a las costas de Quintana Roo.

El trabajo que realizamos permite conocer el comportamiento de la población de sargazo año con año tratando de identificar los patrones de crecimiento y los niveles que alcanza la población. Cabe aclarar que esta información no sirve para pronosticar cuánto llega en cada playa y las variaciones que pueden darse. Ésta es la tarea de otros grupos encargados de la teledetección de las manchas de sargazo cerca de las costas del Caribe mexicano.

Por lo pronto, en ausencia de más información que explique este comportamiento, con base en el análisis de la serie de tiempo, se espera un comportamiento similar en los siguientes años. De confirmar la presencia de un patrón estacional de cuatro años, se espera un nuevo máximo en el año 2026.

***Foto: Reuters*/Gaceta UNAM**

Lo que conocemos y desconocemos del sargazo y los nutrientes

Juan Carlos Herguera
CICESE, Ensenada

Brigitta van Tussenbroek
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM, Puerto Morelos

Correo-e: herguera@cicese.mx

El sargazo, una macroalga holopelágica parda del género *Sargassum,* crece en las aguas oligotróficas (bajas en nutrientes) del Atlántico norte, en el Mar de los Sargazos, posiblemente durante toda la historia del mismo océano. En la última década abunda en el Atlántico norecuatorial y tropical, llegando a las costas de África, Brasil y el Caribe, incluyendo el Sistema Arrecifal Mesoamericano, formando el Gran Cinturón Atlántico del Sargazo. Esta proliferación ha generado impactos catastróficos en los ecosistemas costeros, en las economías locales y en la salud humana de la población ribereña. Para entender y predecir estas inundaciones de sargazo es necesario conocer cómo crece, se mueve y se muere.

Las corrientes superficiales, las olas y los vientos controlan el movimiento de esta macroalga. El Mar de los Sargazos está bordeado dinámicamente por varias corrientes oceánicas de gran escala, la Corriente del Golfo en el oeste, su continuación al norte por la Corriente del Atlántico Norte, la Corriente de Canarias al este y al sur por la Corriente Norecuatorial. El Gran Cinturón Atlántico del Sargazo se extiende por más de 8 mil kilómetros, iniciando enfrente de África, pasa por la región de recirculación norecuatorial y, desde allí, el sargazo transita hacia al Caribe y el Golfo de México.

Comprender el papel e importancia de la circulación superficial tiene sus complicaciones que las vemos reflejadas en la dirección de propagación de los mantos de sargazo, los que muestran una importante variación interanual y estacional.

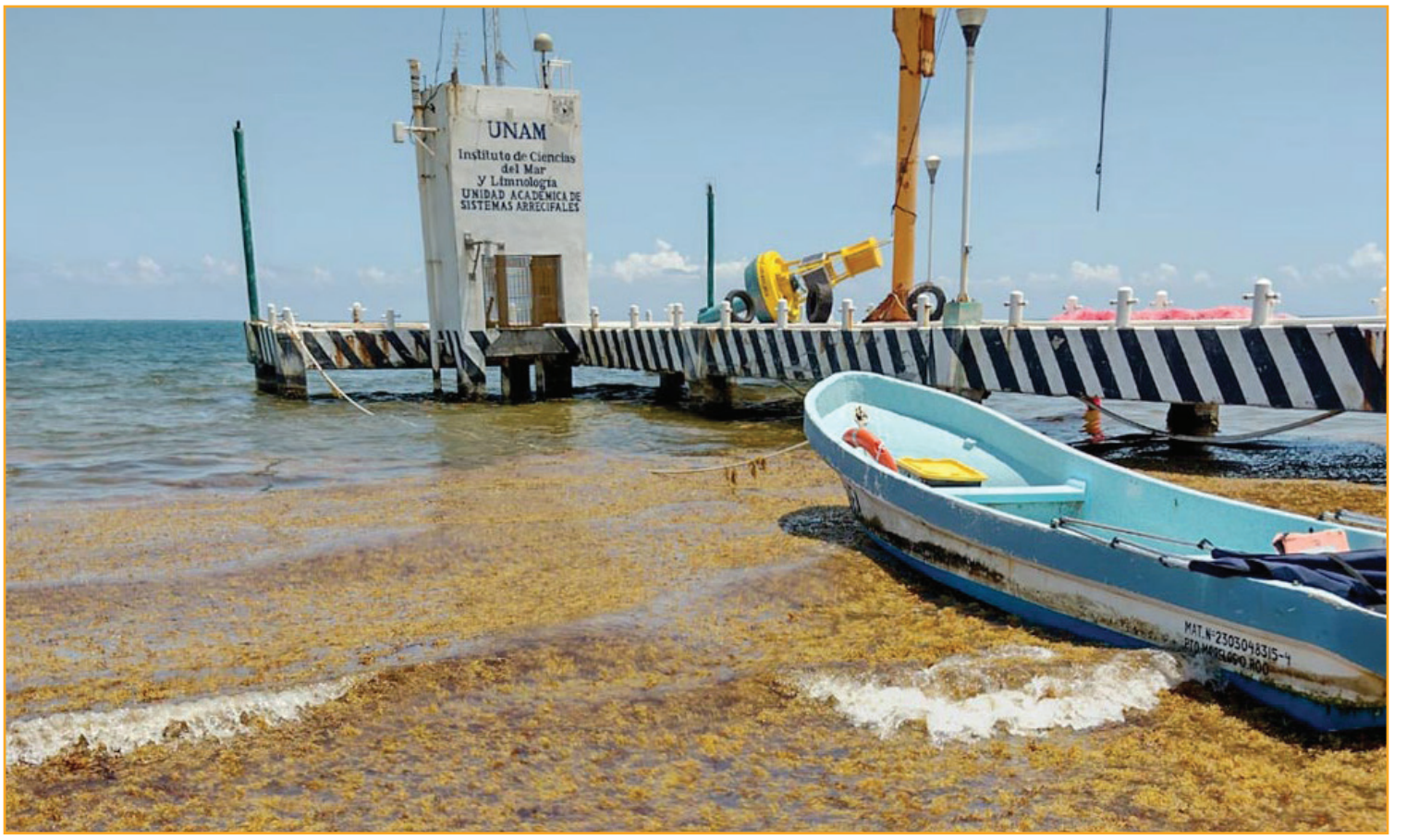


Foto: Rosa Elisa Rodríguez/UNAM

Los mantos de sargazo albergan muchas especies de invertebrados, peces, aves y tortugas marinas. La acumulación de cantidades pequeñas hasta moderadas de sargazo en las playas puede beneficiar a la fauna playera, además de ayudar a la formación de la vegetación en las dunas litorales aportando nutrientes, proceso que ayuda a estabilizar las dunas costeras.

La descomposición del exceso de estas algas en las costas es una fuente de problemas, generando sulfuros y amoniaco causando problemas de salud humana. El exceso de materia orgánica que se libera en las lagunas arrecifales genera un gran consumo de oxígeno que puede llevar a la asfixia de peces y pastos marinos, y pérdida de calidad del agua; estos impactos generan importantes pérdidas económicas al afectar la industria turística.

A pesar de todas las investigaciones realizadas, aun no comprendemos bien cuáles son los mecanismos físicos como temperatura, circulación, vientos y fenómenos extraordinarios como los huracanes, y biogeoquímicos como son la disponibilidad de nutrientes y su origen, que favorecen y potencian el crecimiento del sargazo y su desplazamiento en el océano.

Este desconocimiento ha sido aun más evidente durante esta última década durante la que se ha producido una considerable expansión del sargazo en el Atlántico tropical.

Cada vez es más urgente comprender preguntas fundamentales sobre los controles de su crecimiento, desplazamiento y mortalidad.

Creemos que las especies de sargazo que conforman los enormes mantos en el océano se reproducen exclusivamente por clonación al crecer y fraccionarse, no se han encontrado estructuras de reproducción sexual.

Como todo productor primario fotosintético, el sargazo requiere luz y nutrientes para crecer. La luz no es un factor limitante en el Atlántico tropical, en contraste con el aporte de nutrientes, como nitrato y fósforo, y micronutrientes como el hierro, que en esta región del Atlántico son relativamente pobres, limitando su crecimiento.

Estos nutrientes proceden de diferentes fuentes. Las más importantes, identificadas para el Gran Cinturón Atlántico de Sargazo, incluyen

Foto: Xataka

las zonas de surgencia de las corrientes de frontera oriental como son la región noroccidental (Corriente de Canarias) y suroccidental (corriente de Benguela) de África, la zona de afloramiento ecuatorial, hay que agregar los grandes ríos como el Congo, en África ecuatorial occidental, el Amazonas (el río más caudaloso del planeta) y el Orinoco, y las fuentes de micronutrientes atmosféricas como el polvo del Sahara.

¿Qué factores físicos y biogeoquímicos han cambiado durante la última década y ahora controlan la introducción de nutrientes en el Atlántico ecuatorial y el Caribe? ¿Cuál es la importancia relativa de cada uno de estos procesos físicos o biogeoquímicos para explicar el crecimiento del sargazo?

Históricamente, las aguas del Mar de los Sargazos y del Caribe han sido consideradas como aguas oligotróficas, pobres en nutrientes. Aunque la región del Atlántico ecuatorial occidental tiene un aporte un poco mayor de nutrientes que las regiones mencionadas anteriormente, este aporte ha sido limitado y periódico; estas aguas también tienden a ser oligotróficas o mesotróficas; sin embargo, no se ha observado ningún cambio en esta región que explique la proliferación del sargazo.

Durante la última década, en esta región se han observado grandes florecimientos de algas microscópicas, conocidas como fitoplancton, atribuidos a la pluma del río Amazonas, observables hasta centenas de kilómetros de la desembocadura. Las inundaciones del río Amazonas registradas durante 2011, 2012, 2014 y 2015, consecuencia de una mayor precipitación en su enorme cuenca, coinciden con el crecimiento masivo del sargazo en el Caribe.

Estos fenómenos no siempre están relacionados; en 2009 no hubo florecimiento algal mientras las concentraciones de clorofila-a en la pluma del Amazonas eran altas, mientras que durante el 2018 no se produjo una inundación importante en el Amazonas y sin embargo se observó el mayor crecimiento histórico de esta macroalga en el Atlántico nortropical. Este comportamiento durante el 2018 probablemente está indicando que existen otros orígenes de los nutrientes, tales como surgencias que aportan aguas subsuperficiales y ricas en nutrientes a la superficie.

Estas surgencias se producen frente al margen oriental de África y en el Atlántico ecuatorial aportando nutrientes a las zonas donde prolifera sargazo, dependiendo de las condiciones meteorológicas y oceanográficas. Aunque no hay estudios detallados sobre este fenómeno, probablemente estas surgencias han variado con el cambio climático global.

Experimentos preliminares sugieren que el hierro es un micronutriente limitante para el fitoplancton y posiblemente también para el sargazo. El polvo del Sahara, transportado desde este desierto por la atmósfera, aporta éste y otros micronutrientes al océano Atlántico y al Mediterráneo. El polvo tiene un pequeño porcentaje de hierro soluble, considerando su volumen y las grandes regiones que cubre, este polvo probablemente constituye una importante fuente de hierro.

Los huracanes también pueden explicar la distribución y abundancia del sargazo. La energía mecánica que proveen estos ciclones puede generar una mezcla vertical con aguas subsuperficiales más ricas en nutrientes favoreciendo una mayor asimilación de nutrientes.

Los huracanes probablemente incrementan el hundimiento de sargazo al mar profundo, favoreciendo la exportación de carbono al océano profundo, pero también la fragmentación del sargazo, lo que potencia su crecimiento posterior.

El sargazo está adaptado a vivir en aguas oligotróficas típicas de su hábitat original, el Mar de los Sargazos. Cuando estas algas pasan por un área más rica en nutrientes, pueden absorberlos rápidamente y almacenarlos en sus tejidos para usarlos posteriormente.

Esta estrategia está complementada por la capacidad de la biota asociada al sargazo para reciclar la urea y el amonio que resultan de los productos de desecho en el agua por los pequeños animales asociados, y para fijar N atmosférico por las cianobacterias asociadas. Aún no se conoce la importancia de cada uno de estos procesos para el sargazo.

Estas observaciones y las múltiples preguntas aún por contestar sobre la dinámica, crecimiento y destino de esta macroalga requieren de programas de investigación internacionales que colecten datos sobre la dinámica de los florecimientos observados por imágenes satelitales, observaciones oceanográficas, meteorológicas, biogeoquímicas, biológicas y también ecológicas.

Estos, en su conjunto, podrán informar a las autoridades y usuarios en las tareas de planeación y estrategias de mitigación de estas inundaciones de sargazo en las costas del Caribe.

Veo, veo... ¿qué ves? Sargazo ayer, hoy y mañana también

Eduardo Cuevas
Conacytxp-Cinvestav/UABC
Abigail Uribe Martínez
Instituto de Ingeniería, UNAM, unidad Sisal/CIGoM
Correo-e: amir.cuevas@gmail.com

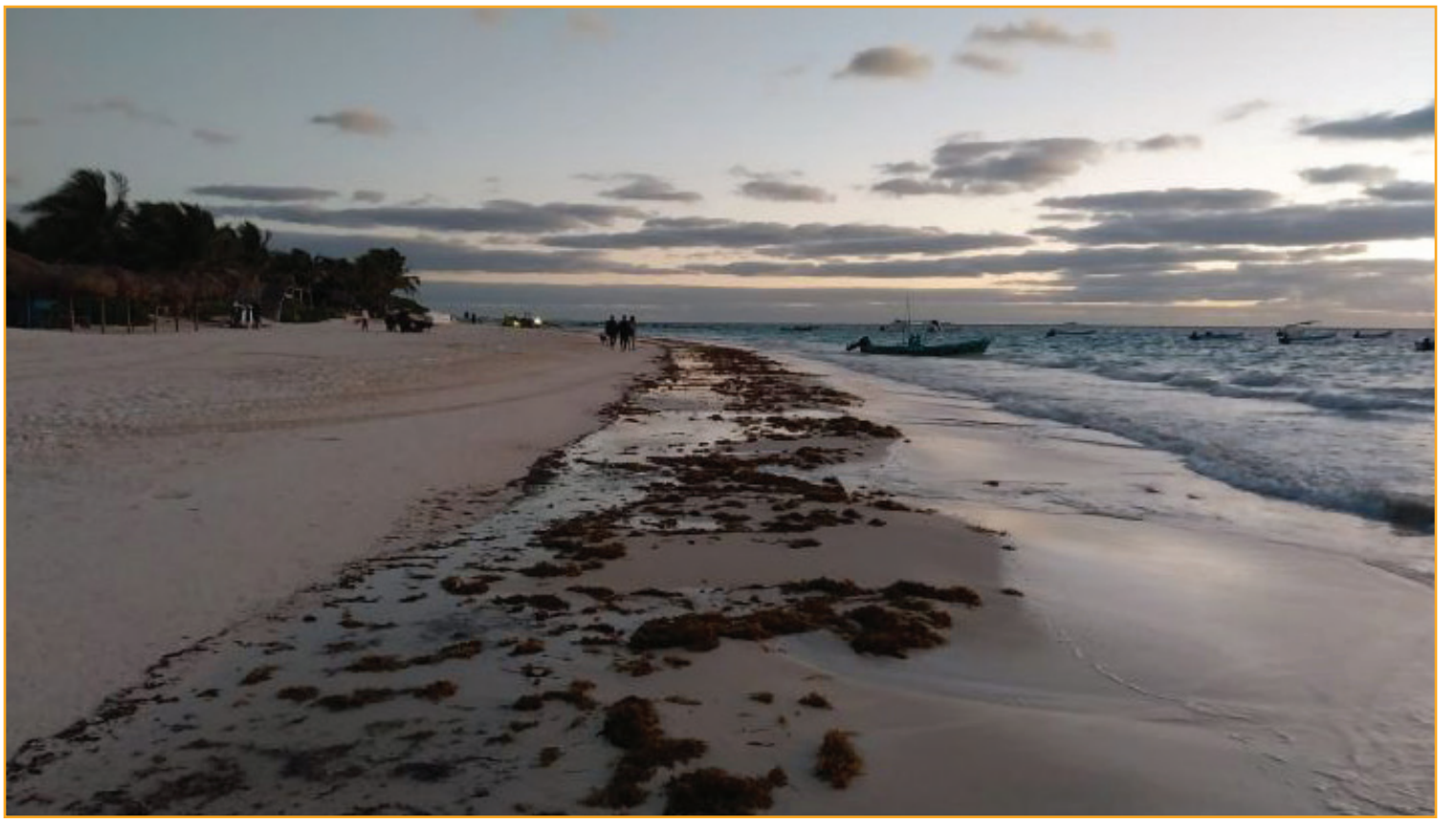


***Foto: Miguel Améndola/*La Jornada Maya**

Entender el origen, la dinámica e impactos del sargazo pelágico requiere atención interdisciplinaria con perspectivas metodológicas distintas. Esbozamos una visión estratégica de ensamble de capacidades tecnológicas, partiendo de bases técnicas y científicas comunes de la percepción remota, con una visión complementaria entre los esfuerzos de detección de sargazo desde una variedad de plataformas de observación que se manejan en este grupo de investigación.

Iniciamos enfatizando la enorme relevancia que el desarrollo tecnológico en teledetección (o percepción remota), utilizando plataformas satelitales y aéreas (p. ej. aviones o drones), ha tenido para el conocimiento de las ciencias marinas, permitiéndonos obtener datos sobre numerosos procesos físicos y biológicos que ocurren en el océano.

En el desarrollo tecnológico encontramos a las tecnologías de la información geográfica (TIG), "aquellas disciplinas que permiten generar, procesar o representar información geográfica, entre las que podemos contar los sistemas de posicionamiento satelital, sistemas de información geográfica y la percepción remota", que junto con la informática, la microelectrónica y las telecomunicaciones, juegan un papel fundamental en el avance del conocimiento científico.

Estas tecnologías son grandes aliadas para la comprensión y atención de problemas complejos que ocurren en grandes extensiones geográficas, de particular relevancia para zonas de difícil acceso, como es el caso de la detección de sargazo pelágico en aguas abiertas y su acumulación en grandes extensiones sobre la costa.

La percepción remota se basa en la forma en que los objetos reflejan la energía lumínica solar plasmada en imágenes adquiridas en múltiples longitudes de onda lumínica (desde el espectro visible: azul, verde, rojo; hasta longitudes imperceptibles por el ojo humano como el infrarrojo y la temperatura).

Estas imágenes son captadas por sensores instalados en vehículos aéreos tripulados o no tripulados y plataformas satelitales.

A partir de las resoluciones espacial y temporal de las imágenes utilizadas en la detección de sargazo podemos saber cuál es el tamaño mínimo de la balsa de sargazo que se puede detectar y cuál es la frecuencia con la que se puede observar una región de interés.

Además de las imágenes satelitales de acceso abierto, las más utilizadas para la detección del sargazo, como se explica en otras contribuciones de este número, existen opciones derivadas de sensores satelitales comerciales que proporcionan datos con resoluciones de menos de un metro de píxel y que pueden adquirir datos todos los días de la misma región.

Estas imágenes tienen un costo aproximado de 35 dólares por kilómetro cuadrado, lo que implica al menos tres millones de pesos diarios para cubrir los más de 500 kilómetros de costa del Caribe mexicano hasta 10 kilómetros mar adentro, haciendo muy difícil su financiamiento para un monitoreo de largo plazo.

Aun con todo el conjunto de posibilidades satelitales, la obstrucción por nubes, la resolución espacial o la revisita aislada, limitan el monitoreo del sargazo para generar información robusta para la toma de decisiones.

Estas limitaciones pueden subsanarse en buena medida incluyendo la adquisición de datos con sensores instalados en otras plataformas como los vehículos aéreos no tripulados (VANT, comúnmente conocidos como drones), que enriquece las detecciones de sargazo proporcionando imágenes con resoluciones espaciales muy finas y temporalidad ajustada a las necesidades inmediatas para el manejo, conservación y restauración de ecosistemas costeros y marinos.

En la última década, las tecnologías asociadas al uso y operación de VANT tuvieron un desarrollo vertiginoso, revolucionando la aplicación de la percepción remota a escala local, permitiendo resolucio-

Trabajamos en construir un ensamble que tiene como ejes rectores: monitorear la cobertura de sargazo en aguas adyacentes y en la vecindad de la costa y proporcionar ubicaciones iniciales de las balsas de sargazo para modelos de pronóstico y alerta temprana de arribazones a la costa.

nes espaciales de centímetros, con alcance y autonomías (tiempo que el vehículo puede volar y adquirir datos) cada vez mayores.

Existe una gran variedad de clasificados según las características de la plataforma en sí, como lo son multirrotor (cuadricópteros, hexacópteros, etc.), de ala fija; según su peso (siete clases distintas), híbridos (despegue y aterrizaje vertical, VTOL, por sus siglas en inglés). Aunque existen versiones muy sencillas de utilizar, la operación óptima de VANT requiere conocimiento técnico y capacitación formal; además de un entrenamiento especializado para el análisis y procesamiento de las imágenes y la generación de productos cartográficos realmente útiles.

Una de las aplicaciones más novedosas es la integración de VANT de largo alcance con la capacidad de transmitir video de alta resolución en tiempo real, para la identificación visual de balsas de sargazo hasta 20 kilómetros mar adentro, junto con su posición geográfica, para apoyar las labores de planeación y recolecta en agua.

A diferencia de las detecciones satelitales, las imágenes adquiridas por VANT no son obstruidas por la nubosidad, aunque tienen la limitante de que solo se pueden obtener si las condiciones meteorológicas lo permiten.

Los VANT equipados con sensores RGB, multiespectrales y térmicos, especialmente de largo alcance, en conjunto con imágenes satelitales de diferentes características espaciales y temporales gestan un ensamble multi-plataforma de observación de sargazo que aprovecha las ventajas de cada técnica, a la vez que se solventan sus principales debilidades.

Imagen de whatsap de septiembre de 2022

Especialistas en percepción remota, en un esfuerzo multi-institucional, trabajamos en construir este ensamble que tiene como ejes rectores: *1)* monitorear la cobertura de sargazo en aguas adyacentes y en la vecindad de la costa y *2)* proporcionar ubicaciones iniciales de las balsas de sargazo para modelos de pronóstico y alerta temprana de arribazones a la costa.

En conclusión, este ensamble es estratégico para el sistema de monitoreo y alerta temprana, la planeación estratégica y operativa, y la intercalibración de productos satelitales.

Continuamos implementando esfuerzos multi-institucionales desde la disciplina de las TIG para construir un andamiaje conceptual sólido que integre las capacidades y visiones de las instituciones participantes, a la vez que ensambla los distintos productos, resoluciones y plataformas disponibles, teniendo como eje rector el "monitoreo, modelación y alerta temprana" del sargazo.

Esta línea de acción es pilar en la "Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México" liderada por el Conacyt.

Las autopistas del sargazo en el Caribe mexicano

Eduardo Cuevas
Conacytxp-Cinvestav/UABC
Xavier Flores Vidal
Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC
Abigail Uribe Martínez
Instituto de Ingeniería, UNAM, unidad Sisal/CIGoM
Correo-e: amir.cuevas@gmail.com

Uno de los mayores vacíos en el conocimiento sobre la dinámica espaciotemporal del sargazo pelágico son sus rutas de movimiento a escala local, así como sus agregaciones, tanto de ingreso y salida del Caribe mexicano. Caracterizar y estudiar dichas rutas, ayudará a comprender mejor su dinámica y determinar probabilística ente las zonas de arribo a la costa.

Las imágenes satelitales nos han permitido entender que la cantidad de sargazo pelágico que arriba a la costa de Quintana Roo es mínima en comparación con la cantidad detectada en aguas abiertas, a más de 50 kilómetros de la costa, y que podría considerarse como disponible en el océano.

Para la planeación, previsión y operaciones de atención a las contingencias por arribazones de sargazo, es crucial conocer las rutas usuales de movimiento de las balsas de sargazo en el Caribe mexicano, el tiempo que les toma ir de la zona oceánica a la línea de costa, los valores umbral de distancia para que bajo condiciones de corrientes, viento y oleaje particulares impacten la costa, así como también las condiciones fisicoquímicas del agua en las que se mueve el sargazo, entre otras numerosas incógnitas.

Las balsas de sargazo son una matriz intrincada formada por la agregación del alga, formándose mantos de forma variada dependientes de las condiciones de oleaje, viento y corrientes superficiales. Las extensiones de las balsas pueden alcanzar decenas de kilómetros.

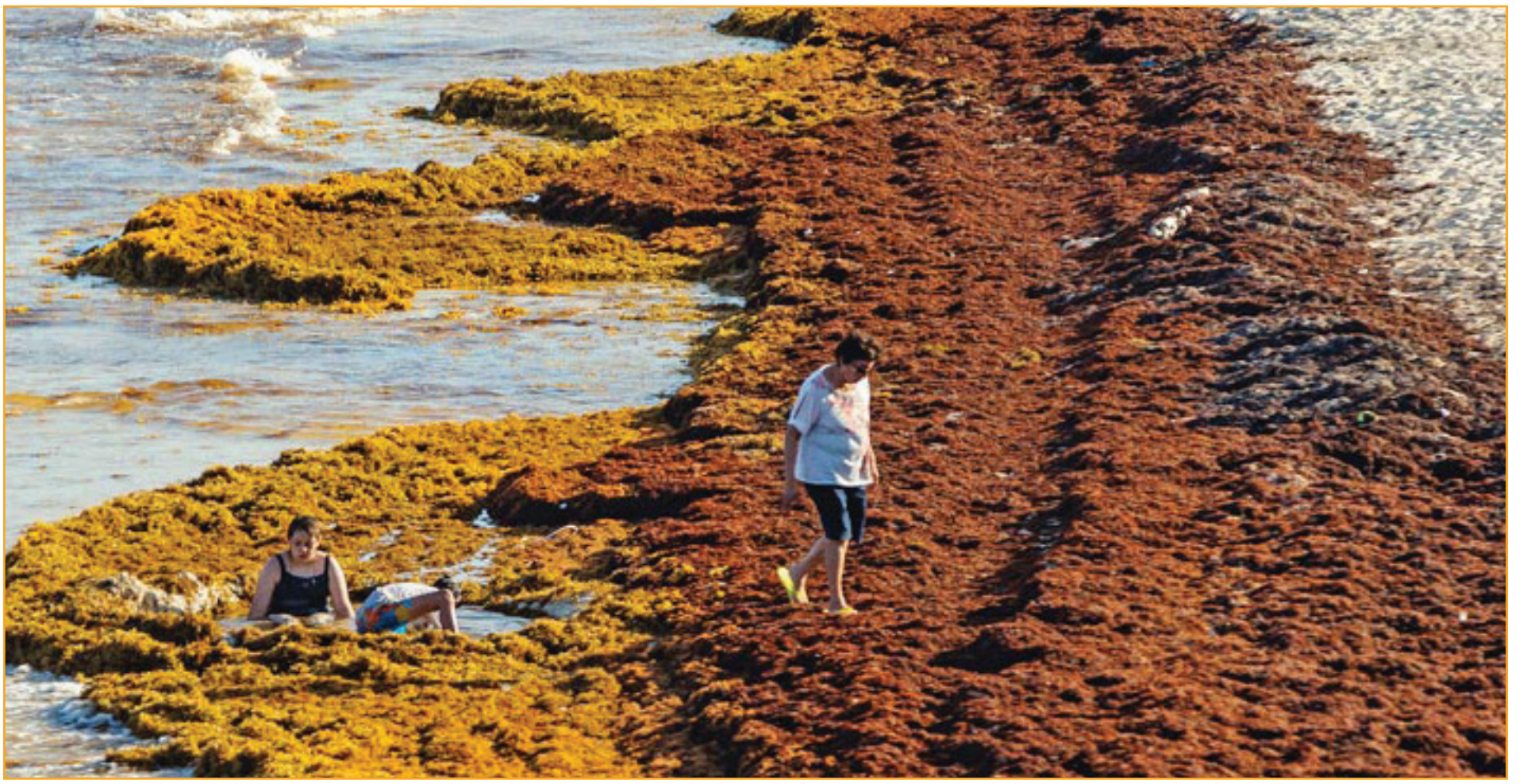
Foto: **Gaceta UNAM**

Estas condiciones de forma y su agregación/disgregación provocan una dinámica particular de la forma en que se mueven con grandes retos para la modelación numérica de su traslado.

El estudio mediante mediciones directas del movimiento de objetos a la deriva en la superficie oceánica, aunque no tengan las condiciones de forma y estructura idénticas a las del sargazo, brinda un conocimiento estratégico para el avance de las herramientas de monitoreo y alerta temprana del arribo de sargazo.

En el marco de un proyecto de investigación de Ciencia de Frontera financiado por el Conacyt, se aliaron la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Programa de Investigadoras e Investigadores por México del Conacyt, El Colegio de la Frontera Sur y la Universidad Autónoma del Carmen, para el despliegue y rastreo satelital de 14 boyas denominadas Derivadores Oceanográficos Remoto In Situ (DORIS), en estrecha coordinación y cooperación con la Secretaría de Marina Armada de México (Semar).

Estas boyas o derivadores son un desarrollo tecnológico del Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCo, https://oorco.ens.uabc.mx/) del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de



En 2019 y 2020, con el apoyo y en coordinación de la Semar, se desplegaron 14 boyas DORIS desde el sur de Quintana Roo, en sitios localizados en el canal entre banco Chinchorro y el continente, y al oriente de este banco.

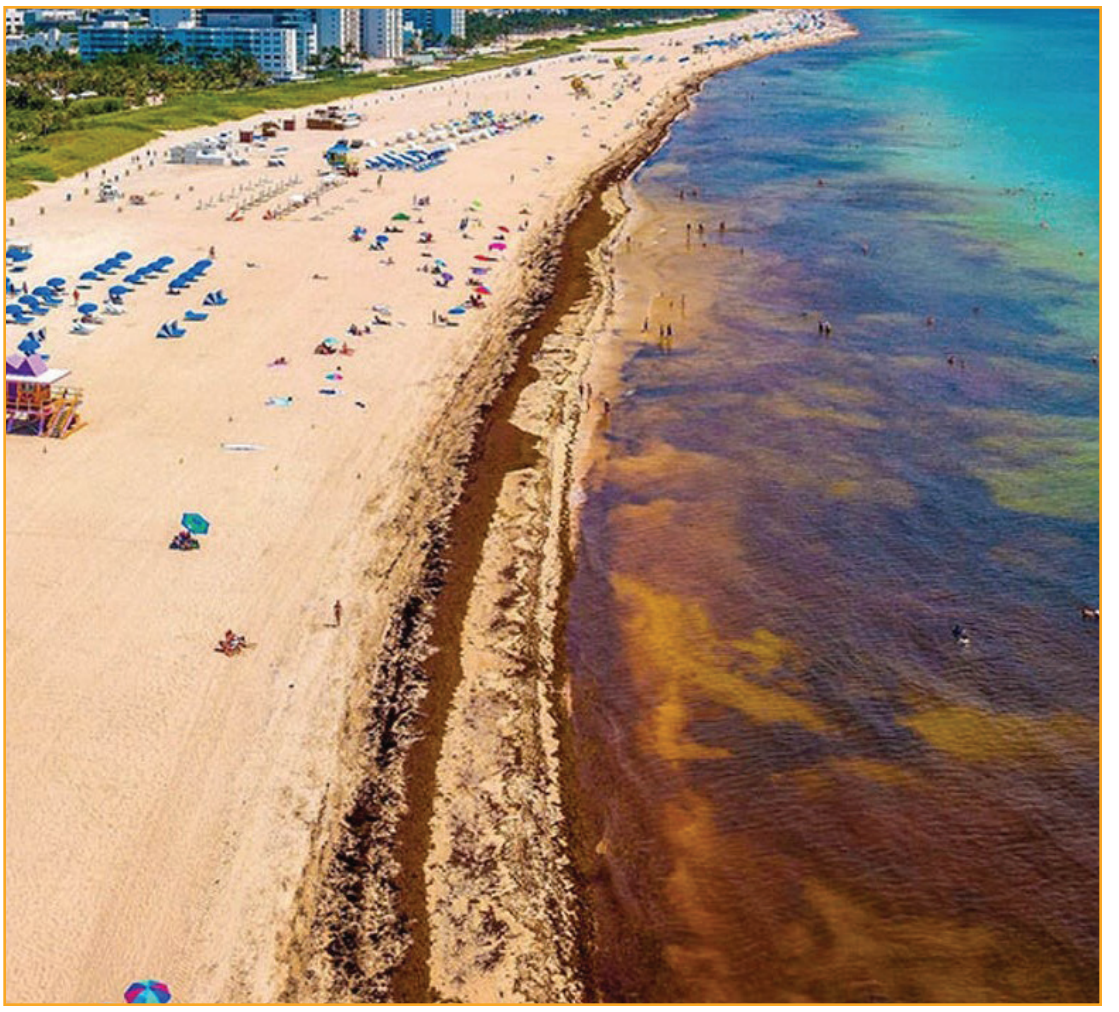


Foto: Xataka, 2019

la UABC, en el marco del proyecto del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

Las DORIS toman mediciones autónomas y las transmiten al usuario en tiempo cuasi real, *i.e.* unos cuantos minutos después de haber realizado la medición *in situ*. DORIS utiliza un microcontrolador con capacidad para medir hasta seis variables elegidas por el usuario, pueden ser: posición geográfica (para estimar trayectorias de deriva), temperatura, oxígeno, pH, conductividad o fluorescencia.

El microcontrolador de DORIS cuenta con telemetría inteligente que le permite elegir, en función de su posición geográfica, si realizará sus transmisiones vía satélite Iridium o vía GPRS local (telefonía celular), minimizando los costos de operación. Gracias a sus componentes resistentes al agua salada y fotoceldas que recargan sus baterías diariamente, este instrumento oceánico cuenta con autonomía sustentable para realizar misiones de varios meses.

La boya DORIS está atada a un arrastre o *drag* garantizando que el movimiento sea influenciado directamente por las corrientes marinas superficiales. Si bien la forma en que se mueven estas boyas pudiera no ser exactamente idéntica a la manera en que se mueve el sargazo que lo hace como un tapete o balsa en la superficie, los forzamientos que influencian el movimiento de ambos objetos son los mismos, por lo que esta es una opción viable para una estimación realista de los patrones de movimiento del sargazo en su travesía por el Caribe mexicano.

En 2019 y 2020, con el apoyo y en coordinación de la Semar, se desplegaron 14 boyas DORIS desde el sur de Quintana Roo, en sitios localizados en el canal entre banco Chinchorro y el continente, y al oriente de este banco. Estas ubicaciones se eligieron para tener información del movimiento de las boyas a lo largo de toda la costa del Caribe mexicano.

Se observó que la distancia umbral a la línea de costa para que alguna de estas boyas terminara encallando fue muy estrecha, menos de 5 kilómetros. Suponemos que el resto de las boyas fueron impulsadas por la Corriente de Yucatán, una corriente determinante en la región y que influye sobre procesos biológicos y físicos en la región como es la surgencia al norte de Quintana Roo con la que se asocia una de las mayores agregaciones de tiburones ballena en el mundo.

Foto: Semaqroo.gob.mx

Estas boyas aportaron datos de patrones de movimiento en temporada de verano, cuando los vientos dominantes en la región son del este-noreste, en temporada de ciclones tropicales. A la vez es la temporada en la que mayor cantidad de sargazo arriba en las costas de Quintana Roo.

Los datos colectados describen de manera general algunas de las corrientes marinas superficiales dominantes en la región. Estas corrientes son las vías de traslado del sargazo pelágico en el Caribe mexicano, tanto para atravesarlo e ingresar al Golfo de México y la Corriente de Lazo, como para entramparse en las corrientes costeras que provocan su recale. También son útiles para la validación de mediciones con otros instrumentos de medición oceanográfica como los radares de alta frecuencia, así como para la validación y calibración de modelos numéricos de movimiento del sargazo en la región.

Actualmente trabajamos en modelos modificados de DORIS para tener una forma similar a los tapetes que forma el sargazo y representar mejor su movimiento. También es necesario incrementar el número de estas unidades rastreadas con el fin de contar una representatividad temporal de la dinámica de las corrientes en la región.

Nuestra iniciativa impulsa y fortalece la soberanía tecnológica del país pues son dispositivos de medición fabricados en instituciones educativas y científicas mexicanas.