Artículo

Revista Ciencia y Naturaleza

Detectores microscópicos: Lo que el ADN de los nemátodos revela ante la llegada del sargazo

Ciencia al Instante

El sargazo es una macroalga que flota en la superficie del océano y ha llegado masivamente a las playas del Caribe mexicano como el problema ambiental más evidente derivado del cambio climático. La descomposición del sargazo libera gases como ácido sulfhídrico que desencadenan procesos alterando profundamente los ecosistemas costeros, causando condiciones de hipoxia que provocan mortandad en peces y crustáceos. Investigadores utilizaron ADN ambiental (eDNA) de nemátodos marinos microscópicos mediante secuenciación masiva del ADN, revelando que cuando el sargazo estuvo presente, el número de especies se redujo aproximadamente en un 50%.

Artículo

Detectores microscópicos: Lo que el ADN de los nemátodos revela ante la llegada del sargazo

El exceso de sargazo revela la fragilidad de los ecosistemas costeros frente al cambio climático

Cómo citar este artículo: Martínez-Arce A, Cohuo-Durán S, Carrera-Parra LF.2026. Detectores microscópicos: Lo que el ADN de los nemátodos revela ante la llegada del sargazo. Revista Ciencia y Naturaleza (1234).

De lo invisible a lo evidente

La llegada del sargazo a las playas del Caribe mexicano ha sido el problema ambiental más evidente derivado del cambio climático. Su llegada pone en evidencia el desequilibrio que está ocurriendo en el océano. Acompáñanos a descubrir qué ocurre con su llegada, mediante el análisis del material genético obtenido de los sedimentos, en los primeros centímetros bajo la superficie de la arena, donde habitan diminutos organismos llamados nemátodos marinos que pueden decirnos mucho sobre la salud del ecosistema.

Las balsas viajeras que afectan al turismo y a los ecosistemas costeros

El sargazo es una macroalga de color marrón, con hojas anchas y tallos cortos, que posee pequeñas vesículas llenas de aire; estas estructuras le permiten flotar y vivir en la superficie del océano, por lo que se le conoce como alga **holopelágica** (ver cuadro de conceptos).

Además, el sargazo tiene una gran capacidad de reproducción, ya que puede generar nuevos individuos a partir de una sola célula, un fragmento o un tejido de la planta madre. En condiciones favorables, su **biomasa** puede duplicarse en menos de 18 días, alcanzando volúmenes de millones de toneladas.

"Necesito del mar porque me enseña: no sé si aprendo música o conciencia."
Pablo Neruda

Un ecosistema que salió de su equilibrio natural y cambió de región

Durante décadas, el sargazo se concentró principalmente en el Mar de los Sargazos, un ecosistema natural flotante ubicado en el Atlántico Norte, entre la costa este de Estados Unidos y las islas Canarias. Esta región se mantiene y delimita por la acción de cuatro grandes corrientes marinas: la Corriente del Golfo al oeste, la Corriente del Atlántico Norte al norte, la Corriente de las Islas Canarias al este y la Corriente Ecuatorial del Atlántico Norte al sur. Sin embargo, entre 2009 y 2010, como consecuencia de anomalías asociadas al cambio climático, se generaron cambios en estas corrientes y en los patrones de viento.

Durante este periodo ocurrieron eventos de vientos extraordinariamente fuertes que provocaron que una porción del sargazo flotante del Mar de los Sargazos quedara a la deriva y llegara flotando a la región del Atlántico ecuatorial. En el año 2011 fue detectado y desde entonces el sargazo se ha establecido en esta nueva región donde crece de manera acelerada y produce enormes cantidades de biomasa.

Este sistema, ahora conocido como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, se ha convertido en el ecosistema interconectado más grande del planeta (Figura 1). Aunque gran parte del alga permanece en el mar abierto, una gran fracción es transportada por corrientes marinas y vientos dominantes hacia las costas del Caribe y el Golfo de México. . Cuando estas grandes masas de algas llegan al **litoral** y se acumulan en las playas, se producen las llamadas arribazones masivas de sargazo.

Las arribazones masivas de sargazo están conformadas por dos especies *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Figura 2). La observación de imágenes satelitales en la región del Atlántico ecuatorial evidenció la detección de una enorme franja que se extendía a lo largo del océano (Figura 1). Esta franja, extendida desde Brasil pasando por países como Trinidad y Tobago, Haití, Jamaica, y Honduras, hasta llegar al Caribe mexicano fue identificada posteriormente y descubrieron que se trataba de grandes cantidades de algas flotando (sargazo).

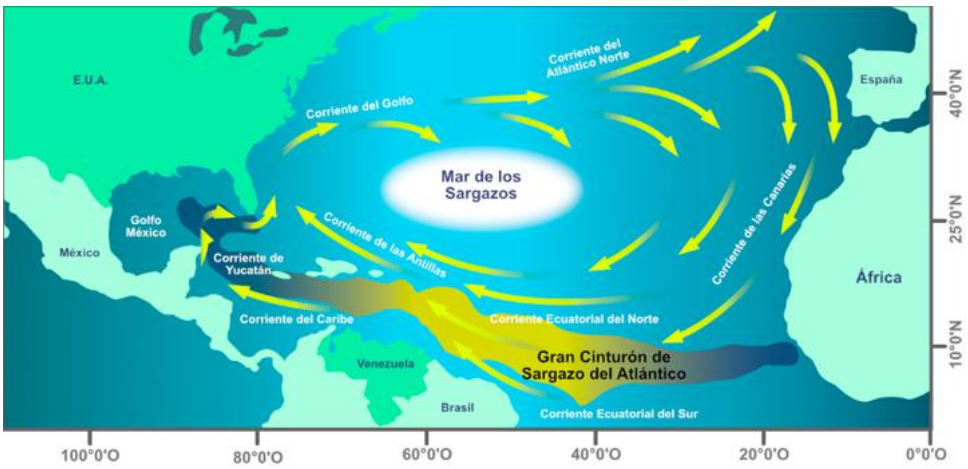


Figura 1. Localización del Mar de los Sargazos y el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico; Corrientes marinas involucradas en el transporte del alga.

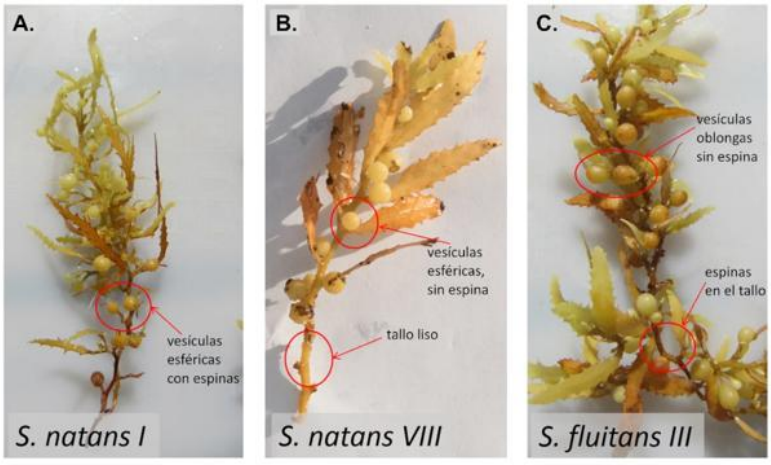
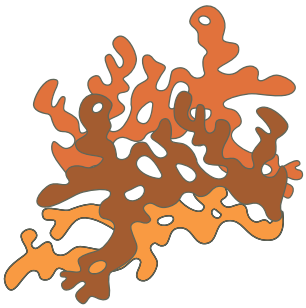


Figura 2. Especies de sargazo detectadas en el Caribe mexicano. A) *Sargassum natans* (I y VIII) y B-C) *Sargassum fluitans* (III).

El sargazo en exceso altera el oxígeno, la luz y la vida marina

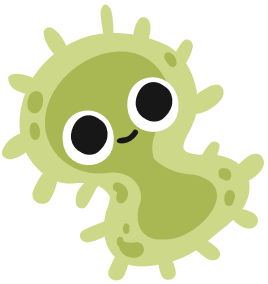
Como todo ser vivo, el sargazo requiere nutrientes para crecer; en su hábitat natural (Mar de los Sargazos) estos nutrientes son limitados por lo que mantienen la biomasa de sargazo relativamente estable, con cantidades de entre 7 y 10 toneladas; pero, cuando existen nutrientes en exceso su crecimiento se duplica.



Los dos nutrientes principales que el sargazo requiere son el nitrógeno (N) y el fósforo (P). Una investigación reciente de científicos de diferentes partes del mundo, han señalado que en el Atlántico ecuatorial (entre Brasil y África) ocurre una disponibilidad elevada de fósforo.

Esto se debe a procesos de afloramientos, mediante los cuales el fósforo presente en aguas profundas es transportado hacia la superficie y ahí provee de mayores concentraciones. Sumado a esto, el sargazo tiene asociaciones con cianobacterias epífitas, estás son bacterias que viven sobre su superficie y se benefician de él. Entre estás se encuentra, Dichothrix fucicola, una cianobacteria capaz de capturar nitrógeno del aire y transformarlo en amonio (NH_3), una forma química que el sargazo puede utilizar directamente para producir proteínas y crecer.

Aunque aún faltan estudios, derivado de lo anterior se sospecha que el sargazo podría intercambiar fósforo con estas bacterias a cambio de nitrógeno. Este posible intercambio permitiría al sargazo aprovechar ambos nutrientes en grandes cantidades, favoreciendo un crecimiento acelerado y una reproducción masiva que genera miles de toneladas de sargazo.



El sedimento costero guarda las primeras señales del disturbio

Al llegar a la playa en cantidades excesivas, las algas quedan varadas en la zona costera y, con el paso del tiempo comienzan a descomponerse. Durante este proceso se liberan gases como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el metano, responsable del olor desagradable durante la descomposición. La liberación de estos gases en concentraciones elevadas puede representar un riesgo a la salud humana.

En el ambiente, la descomposición del sargazo desencadena una serie de procesos que alteran profundamente los ecosistemas costeros. La formación de H_2S implica una alta demanda de oxígeno, y a ello se suma la proliferación de bacterias encargadas de degradar la gran cantidad de materia orgánica acumulada.

Ambos procesos consumen grandes volúmenes de oxígeno, lo que puede provocar condiciones de **hipoxia** o incluso **anoxia**, dejando sin oxígeno a otros organismos. La falta de oxígeno provoca mortandad en diversas especies, entre ellas peces y crustáceos. Además, la acumulación excesiva de sargazo incrementa la turbidez del agua, dificultando el nado de larvas de corales y afectando el establecimiento de nuevas colonias coralinas. La disminución del paso de luz a través de la columna de agua afecta también a los pastos marinos, que pueden presentar una disminución en su cobertura y crecimiento. A largo plazo, estos cambios contribuyen a procesos de erosión en las playas. Otros organismos, como poliquetos y erizos de mar, se ven afectados, principalmente por la disponibilidad de alimento, lo que provoca cambios en su dieta y como consecuencia desequilibrio en la **cadena trófica**.

Pequeños gusanos que sostienen el funcionamiento de los sedimentos

A 12 años de la llegada masiva de sargazo a las playas del Caribe mexicano, aún hacen falta estudios para conocer cómo estos cambios afectan a otras faunas y hábitats, por ejemplo, la fauna que habita en los sedimentos costeros. Estos sedimentos reciben directamente los desechos generados durante la descomposición del sargazo y albergan organismos que viven toda su vida entre los granos de arena.

Entre estos organismos, se encuentran los nemátodos marinos, gusanos diminutos que miden en su mayoría entre 0.5 - 2.0 mm. A pesar de su pequeño tamaño, son el grupo más abundante de la fauna de tamaño medio entre la micro y la macrofauna. Al vivir en los espacios entre los granos de arena, sus movimientos permiten la oxigenación y la actividad microbiana. Se alimentan principalmente de bacterias, microalgas, detritus (desechos orgánicos), incluso de otros nemátodos, y esto permite transformar la materia orgánica (alimento) en nutrientes. Además, los nemátodos transfieren energía a organismos mayores (macrofauna) al servir de alimento para peces juveniles y pequeños crustáceos (Figura 3).

Detectores invisibles: Los nemátodos marinos

Además de las características antes mencionadas, los nemátodos marinos son considerados bioindicadores; es decir, nos ayudan a evaluar la salud del ambiente. Al conocer cómo cambian las especies de nemátodos ante una alteración, podemos detectar si algunas aparecen, desaparecen, disminuyen en abundancia o se vuelven dominantes.

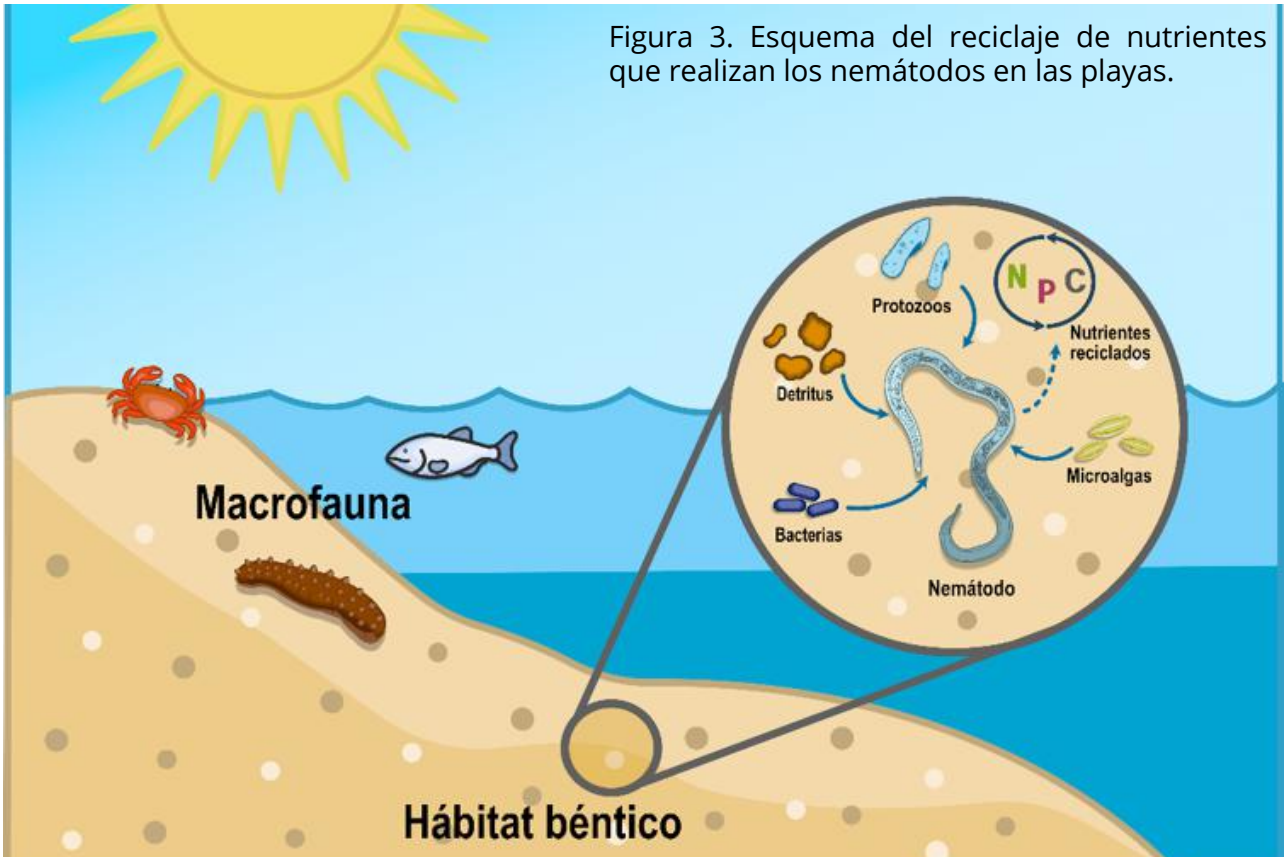


Figura 3. Esquema del reciclaje de nutrientes que realizan los nemátodos en las playas.

Estos cambios funcionan como señales de que algo está afectando el ecosistema donde habitan. Por ejemplo, en ambientes con altos niveles de contaminación, sólo sobreviven las especies más resistentes, mientras que la diversidad disminuye. En contaste, en lugares con buenas condiciones ambientales es común encontrar una mayor variedad de especies de nemátodos. Derivado de lo anterior, nuestra investigación se enfocó en seguir la pista de estos cambios utilizando una herramienta innovadora: el análisis de **ADN ambiental,** conocido como **eDNA**. A través del eDNA presente en los sedimentos, fue posible detectar que nemátodos están presentes y cómo responden ante la presencia del sargazo.

El material genético permite detectar vida incluso cuando no la vemos

Tal vez te estés preguntando ¿cómo logramos detectar vida entre los granos de arena? Bueno, verás, hay técnicas para observar organismos bajo el microscopio. Sin embargo, actualmente esto también se logra a partir del material genético, para ello muy cerca de la orilla donde el sargazo se acumula, enterramos un tubo de PVC hasta unos 10 centímetros de profundidad, justo donde viven los nemátodos y otros organismos como copépodos, poliquetos, ácaros, incluso los llamados ositos de agua (tardígrados).

El sedimento extraído se mezcló con agua de mar y se pasó por un tamiz, algo así como un colador muy fino, para retener tanto organismos como restos de tejidos y células que se encontraba entre los granos de arena. Todo lo anterior contiene material genético, mismo que fue procesado en un laboratorio para obtener ADN específico y de alta calidad. Posteriormente fue analizado mediante una técnica conocida como secuenciación masiva del ADN (*Next Generation Sequencing*).

Esta técnica nos permitió detectar millones de fragmentos de ADN de organismos tan pequeños que no podemos ver a simple vista e incluso detectar organismos que en el momento de la toma de muestra no estaban presentes pero que en algún momento estuvieron y dejaron su pista genética. En nuestro estudio, los nemátodos marinos estuvieron representados por un millón de fragmentos de ADN. Estos fragmentos corresponden a **genes** que funcionan como huellas dactilares, es decir, tienen un patrón único que corresponde a un género o especie de nemátodo, permitiendo identificar quienes están presentes en cada sitio.

Para saber a qué especies pertenecían, los comparamos con una enorme base de datos internacional llamada SILVA, una especie de biblioteca genética que reúne millones de secuencias de ADN de organismos de todo el mundo. Actualmente, la base de datos SILVA incluye información genética de cerca de medio millón de especies. Y aquí viene algo importante: nuestro estudio aportará nuevas secuencias de aproximadamente 300 especies de nemátodos que viven en los sedimentos del Caribe mexicano, ayudando a ampliar el conocimiento sobre su biodiversidad casi invisible.

Cambios en su diversidad revelan cambios en la salud del ecosistema

Para conocer que cambios ocurren en las comunidades de nemátodos ante la llegada del sargazo diseñamos un estudio que comparó distintos momentos a lo largo del tiempo, con y sin presencia de sargazo. Durante 2023 elegimos los meses de julio y agosto, cuando la llegada de esta alga fue más intensa, y para tener un punto de comparación, también tomamos muestras en septiembre y octubre de ese mismo año, así como en febrero de 2024, en estos últimos meses el sargazo apareció en cantidades mucho menores o estuvo ausente. A lo largo de estos meses recolectamos muestras de sedimento en cuatro playas del estado de Quintana Roo.

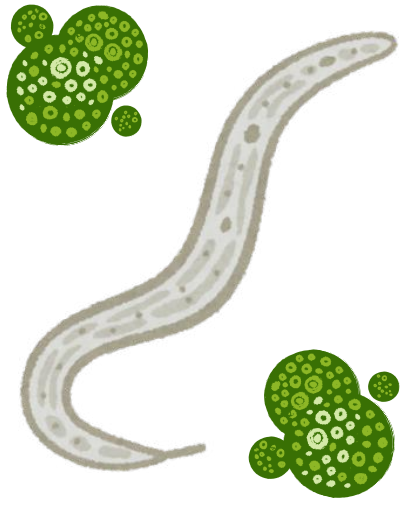
Dos de estas playas se encuentran en el norte: Cabo Catoche y Puerto Morelos y las otras dos el sur, Punta Herrero y Xahuayxol. La primera es una de las pocas playas del Caribe mexicano que prácticamente no ha sido afectada por las grandes arribazones de sargazo.

Por eso la usamos como una referencia para saber cómo se comporta un ecosistema béntico cuando el disturbio no está presente. Como cada playa es distinta, aquí decidimos asignarles nombres simbólicos para entender mejor lo que estaba ocurriendo en cada una. Así, Cabo Catoche es “La Sobreviviente”; Punta Herrero “La Dinámica”; Puerto Morelos “La que recibe ayuda”; y Xahuayxol “La Protegida”.

Cada playa cuenta una historia distinta escrita en el ADN de sus sedimentos

Una vez que identificamos a las especies presentes en cada playa, llegamos a lo interesante: **¿qué nos indicaron realmente los nemátodos?** Bien, para saber esto realizamos análisis computacionales al millón de fragmentos de ADN detectados en cada playa, esto permitió comparar cuántas y cuáles especies aparecían o desaparecían cuando había grandes cantidades de sargazo y cuando este no estaba presente.

Ahora te contaremos que ocurrió en cada playa, empecemos con “La Sobreviviente”. Detectamos alrededor de 200 especies de nemátodos, y como lo sospechamos, el número de organismos y especies se mantuvo bastante estable durante los cinco meses analizados. Hubo pequeñas variaciones, sí, pero estas se explican por procesos naturales del ambiente. En otras palabras, cuando no hay sargazo, la comunidad de nemátodos parece mantenerse sin cambios drásticos.



Continuemos con “La Dinámica”, aquí encontramos algo que no esperábamos, en esta playa detectamos 254 especies, el número más alto de todas las localidades, incluso que, en “La Sobreviviente”; además detectamos la mayor cantidad de especies únicas. Sin embargo, cuando el sargazo estuvo presente, el número de especies se redujo aproximadamente en un 50% (Figura 4). Una buena noticia es que esta playa se encuentra en una zona con oleaje fuerte y corrientes activas, lo que ayuda a dispersar el sargazo rápidamente y permite que el ecosistema se recupere con mayor rapidez una vez que el alga se retira.

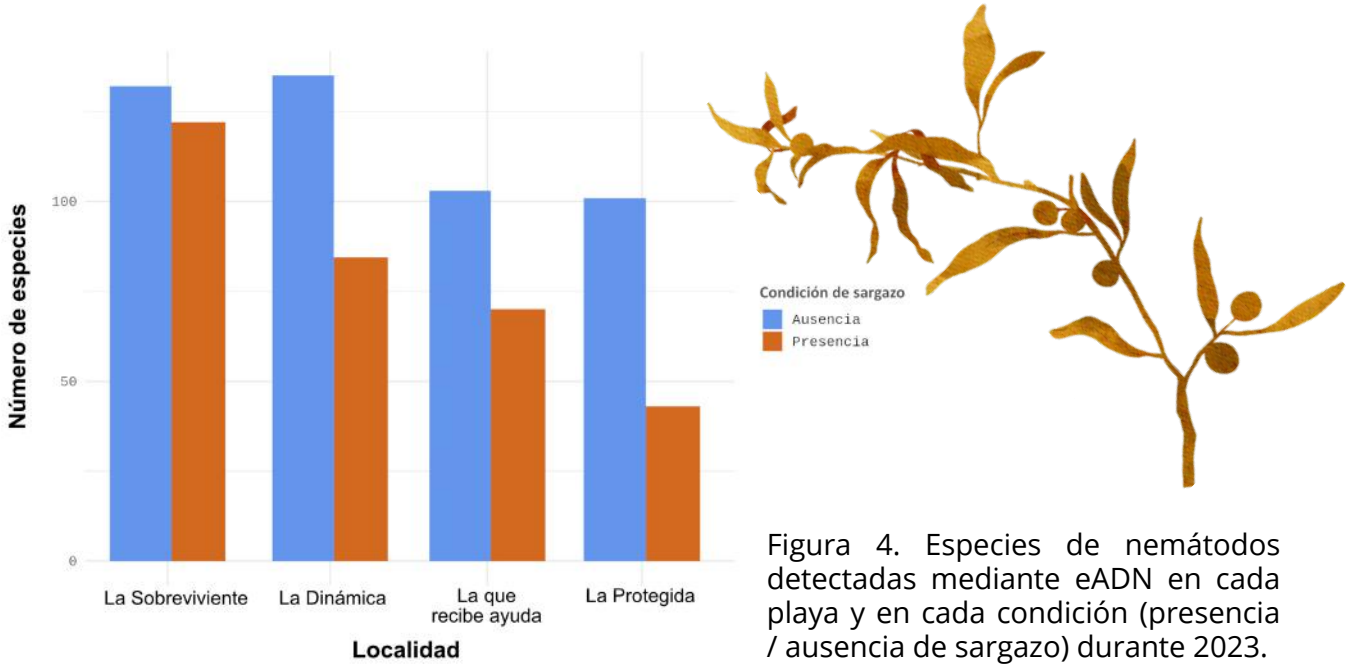
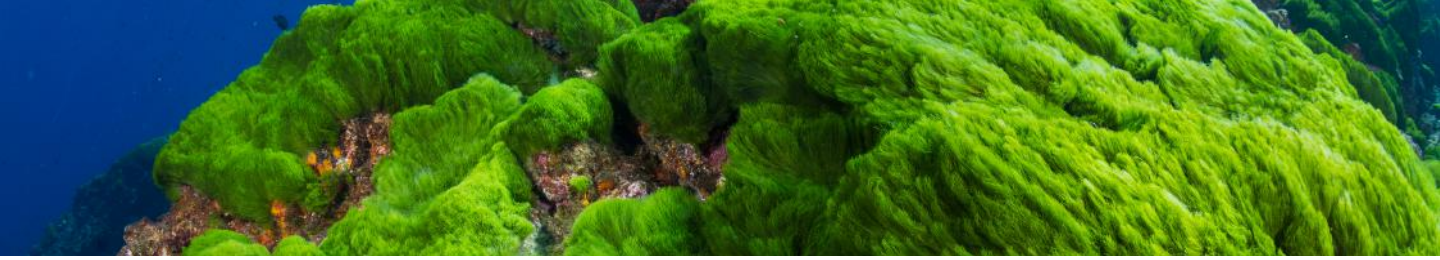


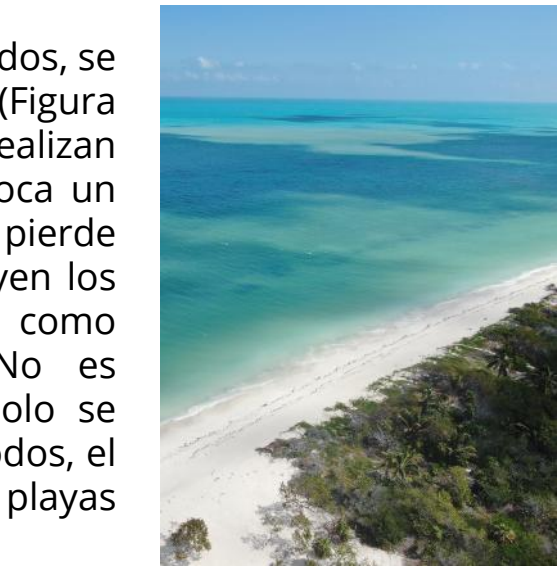
Figura 4. Especies de nemátodos detectadas mediante eADN en cada playa y en cada condición (presencia / ausencia de sargazo) durante 2023.

En “La que recibe ayuda” detectamos 173 especies de nemátodos, pero el número disminuyó aún más durante los meses con mayor presencia de sargazo. De las tres playas afectadas, esta fue la que recibió la mayor cantidad de alga: tan solo en julio, en el sitio donde se tomó la muestra, se acumularon 1,220 m² de sargazo, lo equivalente a una piscina olímpica llena.



Aunque esta playa recibió la mayor cantidad de sargazo, aquí ocurre algo importante: se realizan labores de limpieza para retirarlo, debido a que se detectó un número de especies no tan bajo, podemos inferir que esta actividad ayuda a mitigar parcialmente los efectos del sargazo en el ecosistema. Finalmente, “La Protegida”, esta playa es el caso más preocupante. Se localiza dentro de una laguna arrecifal somera, un ambiente poco profundo que se forma entre la costa y la barrera arrecifal. Al estar protegida por el arrecife, las corrientes son débiles y el oleaje llega con poca fuerza. ¿El resultado? Cuando el sargazo entra a la laguna, prácticamente no tiene forma de salir.

Permanece varado durante largos periodos, se acumula y comienza a descomponerse (Figura 5). Además, en esta playa no se realizan actividades de limpieza. Todo esto provoca un deterioro progresivo del ambiente: se pierde calidad y variedad de alimento, disminuyen los refugios y los espacios habitables, y como consecuencia, se pierden especies. No es casualidad que con nuestros análisis solo se hayan detectado 144 especies de nemátodos, el número más bajo de las cuatro playas estudiadas (Figura 4).

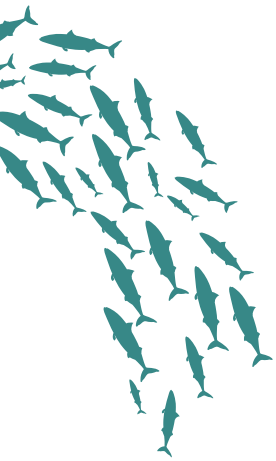


Además, durante los meses con mayor acumulación de sargazo en descomposición, cuando el sedimento se llena de materia orgánica y bacterias, detectamos un aumento en nemátodos de los géneros *Pellioditis* y *Protorhabditis*. ¿La razón? Estos diminutos gusanos se alimentan principalmente de bacterias y cuando hay mayor disponibilidad, ellos encuentran un auténtico banquete.

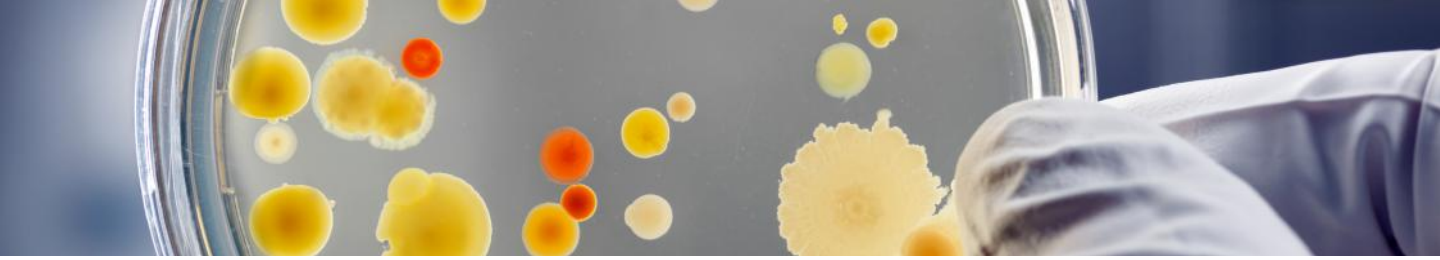
También se detectó con mayor frecuencia el género *Dipollaimelloides*. Estos nemátodos tienen una habilidad especial, pueden sobrevivir en ambientes con muy poco oxígeno y ajustar su dieta a lo que esté disponible, por eso se les considera organismos **oportunistas**.

Figura 5. Afectación de sargazo en la playa de Xahuayxol.

No todo fueron presencias, algunas ausencias fueron igual de reveladoras. En los sedimentos afectados dejaron de ser detectados géneros como Mesodorylaimus y Pontonema. Estos nemátodos son depredadores, para alimentarse cazan otros microorganismos e incluso a otros nemátodos. Sin embargo, para hacerlo necesitan oxígeno, al igual que sus presas. Cuando el oxígeno escasea y el alimento desaparece, estos depredadores no logran sobrevivir.



Como podrás ver, el ecosistema marino depende de cada organismo, incluso de los microscópicos como los nemátodos. Los cambios en sus comunidades no son menores, afectan procesos fundamentales como el reciclaje de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica, la transferencia de energía hacia organismos más grandes y el control natural de poblaciones microbianas. En conjunto, dichos cambios alteran el funcionamiento completo del ecosistema, investigarlos no solo nos ayuda a entender lo que está ocurriendo hoy, sino también a prevenir problemas mayores en el futuro.



Conceptos

ADN: Siglas del Ácido Desoxirribonucleico. Es la molécula que transporta información genética para el desarrollo y el funcionamiento de un organismo.

ADN ambiental: Se refiere al material genético de múltiples especies que han transitado o habitan en el ambiente, por ejemplo, en una muestra de suelo, o de agua, e incluso en el estómago de un organismo. Es una herramienta no invasiva que permite analizar varias especies simultáneamente a partir de una misma muestra.

Anoxia: Ausencia total de oxígeno.

Biomasa: Materia orgánica de origen vegetal o animal que puede utilizarse como fuente de energía.

Cadena trófica: Son las relaciones de consumo de los organismos, implica el transporte de energía y nutrientes de un organismo a otro a través de la alimentación.

eDNA: siglas en ingles de “environmental DNA”.

Genes: Segmentos de ADN que contienen información específica.

Hipoxia: Bajo nivel de oxígeno.

Holopelágica: Que pasa su todo su ciclo de vida flotando en el océano abierto.

Oportunistas: especies capaces de aprovechar condiciones ambientales de estrés para proliferar.

Litoral: Franja de transición entre la tierra firme y el mar.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México, número de proyecto 22806.25-p. A la Dra. Francesca Leasi (Universidad de Tennessee) por su contribución en parte del financiamiento de la presente investigación. El CVU 212500 agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por la beca otorgada.

Para Consulta

- Allouche M, Nasri A, Harrath AH, *et al.* 2021. Experimental selection of Marylynnia puncticaudata (Cyatholaimidae, Nematoda) and effects of organic enrichment. Environmental Science and Pollution Research 28(6): 6866-6876. [Link]

- Jung J, Duprey, NN, Foreman, AD, *et al.* 2025. Equatorial upwelling of phosphorus drives Atlantic N_2 fixation and Sargassum blooms. Nature Geoscience 18: 1259-1265. [Link]

- Leasi, F, Álvaro, NV, Andrade, LF, *et al.* 2026. High meiofaunal diversity in the Azores revealed through DNA metabarcoding. Marine Biodiversity 56(6) [Link]

- Mohammad DA, Al-Farga A, Sami M. 2024. Experimental study of organic enrichment on meiofaunal diversity. Scientific Reports 14(1): 10681. [Link]

- Pérez-Posada I, Cabanillas-Terán N, Carrera-Parra LF, *et al.* 2025. Trophic ecology of Caribbean polychaetes: responses to environmental changes driven by massive Sargassum arrivals. Food Webs 44: e00411 [Link]

Crédito de imágenes en orden de aparición:Getty Images Pro, Tatyana Yagudina, Karacis Studio, oksanavectorart, Getty Images, Pexels, Sketchify Education, valeryhadeev, irasutoya, Getty Images Signature, sketchify Lana Molly Resources, pixabay, Canva Creative Studio, ckstockphoto, mairui, smartstartst. Crédito de figuras: Las Figura 1 [Link], 2 [Link], 3 , 4 y 5 (Autor LFCP) corregidas y editadas por los autores. Los autores confirmaron que ningún párrafo del manuscrito ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con esta herramienta.

Dr. David A. Paz García
Editor en Jefe Revista CyN
Primer Congreso Mexicano de Evolución

Diseño de publicación: Sofia Paz

Arely Martínez Arce

Académico en El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal. Área de interés ecología molecular de invertebrados marinos, con énfasis en comprender su diversidad, relaciones evolutivas y funciones ecológicas dentro de los ecosistemas marinos. En particular, me intereso en el estudio y documentación de la diversidad genética de nemátodos marinos de vida libre.

contacto: marce@ecosur.mx

Sergio Cohuo Durán

Académico en Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chetumal. Investigador especialista en aguas continentales y marinas costeras, en aspectos de biodiversidad, hidrología y técnicas de teledetección satelital. Región de trabajo, sureste de México en la Península de Yucatán y norte de Guatemala y Belice.

contacto: sergio.cd@chetumal.tecnm.mx

Luis Fernando Carrera Parra

Investigador Titular B en El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal. Responsable del Grupo Académico Estructura y Función del Bentos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel II. Línea de investigación Sistemática y Ecología de Invertebrados Marinos.

contacto: lcarrera@ecosur.mx