

## DETECCIÓN, MODELACIÓN Y MONITOREO DEL SARGAZO: PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN DEL GRUPO DE ESTUDIO DEL SARGAZO DE LA UNIDAD ACADÉMICA SISAL

CHRISTIAN M. APPENDINI

El sargazo pelágico es una macroalga marina que flota y se desplaza a través de las corrientes marinas; éste ha sido observado en grandes cantidades desde el siglo XVI en el Mar de los Sargazos. En la última década, esta alga ha cobrado notoriedad por su arribazón masiva a las playas del Caribe. Estos arribazones masivos, principalmente compuestas por las especies *S. natas* y *S. fluitans*, comenzaron su proliferación en el Atlántico tropical en 2011, conformando lo que hoy se conoce como el “gran cinturón del sargazo” (Great Sargassum Belt - Wang *et al.*, 2019). La migración del sargazo a esta zona se atribuye a cambios en la Oscilación del Atlántico Norte durante el invierno de 2009-2010. En ese período, alteraciones en los vientos alisios permitieron que el sargazo saliera del Mar de los Sargazos y llegara al Atlántico tropical, donde encontró condiciones óptimas para su desarrollo (Johns *et al.*, 2020 y Oviatt *et al.*, 2019). Aunque esta zona de proliferación del sargazo beneficia la diversidad de la fauna marina, sus efectos son adversos cuando llega a las costas donde se generan zonas anóxicas que afectan negativamente los ecosistemas costeros. Adicionalmente, la descomposición del sargazo en las playas conlleva una serie de efectos negativos en el medio ambiente, la economía y la salud humana (Devault *et al.*, 2021).

La extensa acumulación de sargazo a lo largo de la costa implica un problema socioambiental significativo, en particular, en las playas de uso turístico; es ahí donde se buscan hoy en día estrategias de manejo, como las barreras antisargazo, concebidas con un diseño similar al empleado para controlar derrames de petróleo. Estas barreras tienen, no obstante, una efectividad limitada en casos de acumulación elevada y no resuelven el problema de la formación de zonas anóxicas. De ahí que otra solución que se ha propuesto es la de recolectar el sargazo a cierta distancia de la costa, para lo cual, se requiere determinar la ubicación óptima de la macroalga. Lamentablemente, las actuales metodologías de detección remota y pronóstico de sargazo no permiten tomar decisiones rápidas

sobre la recolección de sargazo en alta mar, hasta el momento, no se ha implementado su recolección.

En respuesta a este desafío, en el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros de la Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la UNAM en Yucatán, hemos creado el Grupo de Estudio del Sargazo (GES). Nuestro objetivo es determinar de manera precisa el movimiento del sargazo en el océano hasta su arribo a las playas. Entre las actividades de investigación que desarrollan los integrantes del GES se encuentran: la detección y monitoreo satelital, la modelación física del transporte del sargazo, la modelación numérica del transporte del sargazo, el monitoreo de arribazones en las playas mediante cámaras fijas y el seguimiento del sargazo a través de la participación de la ciencia ciudadana. A continuación, se presenta un breve resumen de estas áreas de investigación.

Para la detección y seguimiento satelital del sargazo existen varios algoritmos que son utilizados (Cuevas *et al.*, 2018; Hu, 2009; Wang y Hu, 2016). No obstante, en el GES estamos optimizando algoritmos de detección de sargazo por medio de visión computacional y la incorporación de distintos sensores para obtener la distribución del sargazo a diferentes escalas espaciales. Este trabajo lo desarrolla la Dra. Abigail Uribe Martínez bajo el proyecto posdoctoral CONAHCYT titulado *Patrones espaciotemporales de distribución, acumulación y transporte del sargazo pelágico en el Caribe mexicano utilizando técnicas de aprendizaje computacional*.

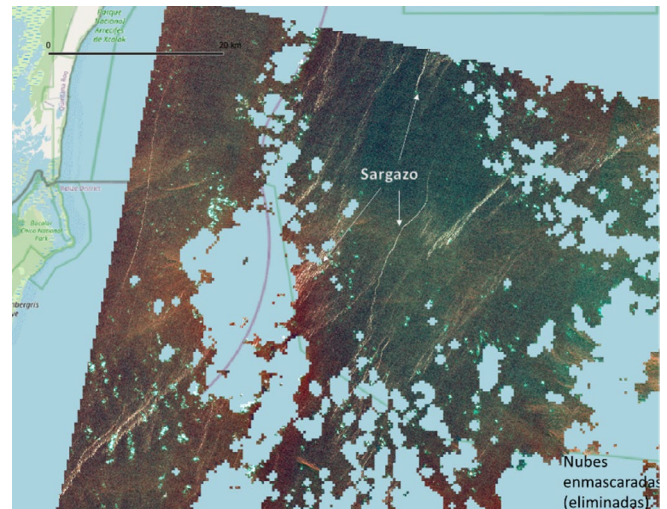


Figura 1. Índice múltiple de sargazo que suministra información cualitativa sobre la probabilidad de que cada píxel represente sargazo (Elaboró: Abigail Uribe Martínez)

Contar con información precisa sobre la ubicación del sargazo en altamar posibilita alimentar modelos numéricos que simulan su transporte impulsado por las corrientes. No obstante, el viento y la deriva de Stokes constituyen elementos importantes a considerar en estos modelos, dado que estos factores tienen la capacidad de desplazar el sargazo hacia nuevas rutas que no serían alcanzadas únicamente por la acción de las corrientes (Allende-Arandía *et al.*, 2023; Putman *et al.*, 2018). En la mayoría de los estudios, se sugiere utilizar un porcentaje entre 1 y 3% de los vientos como un factor que afecta el transporte del sargazo. Esto se debe a que una parte de esta alga se sitúa en la superficie y su desplazamiento se ve directamente influenciado por los vientos y por la deriva de Stokes del oleaje. Sin embargo, no hay trabajos publicados de modelación física que respalden estos porcentajes. De ahí que, bajo la iniciativa de colaboración de la Universidad de Illinois y la UNAM se obtuvieron los fondos para el proyecto titulado *Towards a holistic assessment of marine debris monitoring, detection and removal: the case of sargassum rafts from laboratory to field scales* liderado por los Doctores Bernardo Figueroa Espinoza (UNAM) y Rafael Tinoco (UIUC). Su objetivo principal ha sido determinar tanto el efecto del viento como la deriva de Stokes sobre el transporte de sargazo por medio de mediciones directas en una canal de olas y viento para incorporar estos resultados en los modelos numéricos.

En lo que respecta al empleo de modelos numéricos, hemos implementado modelos lagrangianos para trazar las rutas principales de transporte desde el Atlántico tropical hasta el Golfo de México, así como para identificar las barreras naturales al transporte (Allende-Arandía *et al.*, 2023). Como continuación a estos modelos lagrangianos, hemos trabajado en establecer correlaciones entre distintos índices climáticos y la predominancia de las diversas rutas de transporte. Este enfoque tiene como objetivo contribuir a la elaboración de pronósticos estacionales de sargazo. Estos pronósticos servirán para la implementación de medidas preventivas con meses de anticipación, de manera similar a los pronósticos que se realizan para las temporadas de huracanes, anticipando el número de sistemas nombrados que se pueden esperar en la próxima temporada. Asimismo, estamos en las fases iniciales de implementación de un modelo costero, con el propósito de obtener pronósticos más precisos sobre los arribazones a las playas. Este modelo se plantea como una mejora respecto a los pronósticos actuales, que se basan en modelos hidrodinámicos globales como son el HYCOM y Mercator. Estos avances han sido posibles gracias al financiamiento de la DGAPA a través de los proyectos PAPIIT TA100420 *Caracterización de patrones de transporte en el Mar Caribe e IA101122 Estudio de variabilidad de las corrientes desde el Atlántico Tropical hasta la Corriente de Lazo con aplicaciones a los arribazones de sargazo.*

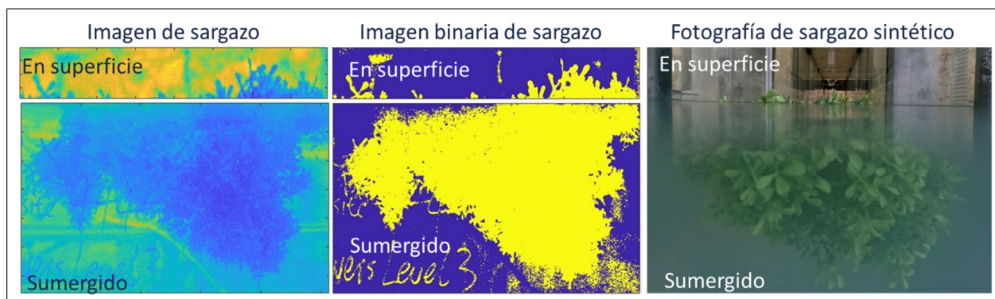


Figura 2. Representación visual del sargazo real mostrando la parte sumergida y la parte en superficie, en comparación con el sargazo sintético empleado en los ensayos físicos

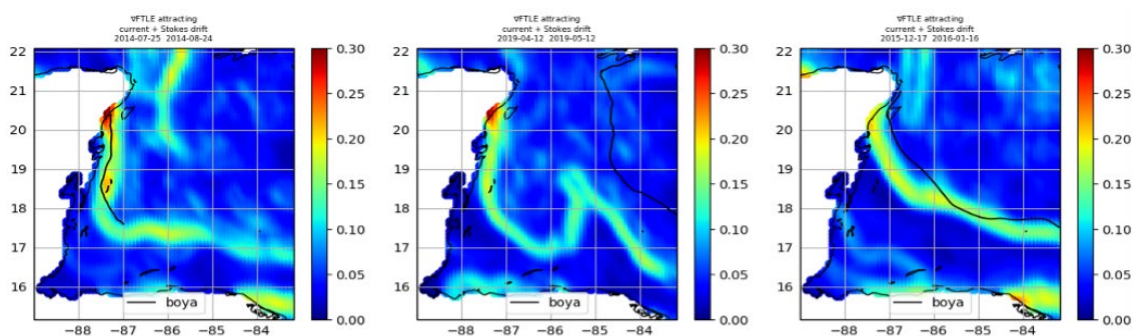


Figura 3. Gradiente del exponente de Lyapunov en tiempo finito (FTLE) atrayente considerando corrientes y deriva de Stokes. Estas estructuras indican las rutas de transporte entre el Mar Caribe y las costas de Quintana Roo (Elaboró: Ricardo Quintana Barranco)

En cuanto al monitoreo a través de cámaras fijas, hemos registrado los arribazones de sargazo en Puerto Morelos desde 2015, lo que nos permitió establecer un modelo conceptual para comprender los arribazones de sargazo y su remoción natural en la laguna arrecifal (Rutten *et al.*, 2021). Asimismo, hemos desarrollado algoritmos para rastrear las manchas de sargazo en el mar (Lopez Portillo *et al.*, 2022). Recientemente, hemos creado cámaras de bajo costo y estamos colaborando para instalarlas en distintas ubicaciones de la costa de Quintana Roo, incluyendo Xcalak, Akumal, Cozumel y Puerto Morelos. Además de establecer modelos conceptuales para las diversas áreas de instalación, la información recabada por estas cámaras no sólo servirá para validar nuestros sistemas de pronóstico de arribazones de sargazo, también, contribuirá a la calibración de los modelos de transporte durante su operación en modo pronóstico.

Es importante señalar que la instalación de cámaras fijas implica la necesidad de infraestructura. Por esta razón, hemos iniciado una propuesta para implementar estaciones de monitoreo ciudadano basadas en la aplicación CoastSnap (Harley y Kinsela, 2022). Esta aplicación posibilita que la comunidad capture fotografías de la playa, facilitando el análisis de los cambios en la línea de costa. El mismo sistema puede ser empleado para el monitoreo del sargazo, mediante el desarrollo de algoritmos similares a los de CoastSnap, pero con el propósito de corregir las imágenes y generar información objetiva sobre los arribazones de sargazo. Recientemente, hemos instalado una estación en Puerto Morelos bajo el proyecto con la Universidad de Illinois y otra

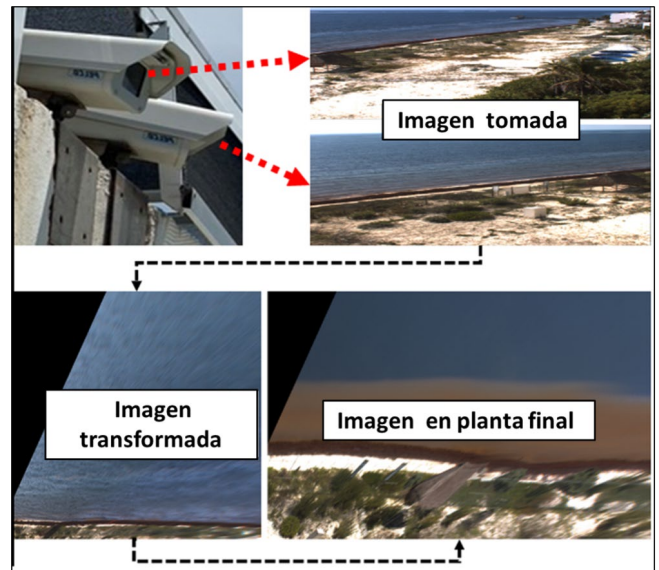


Figura 4. Diagrama del monitoreo con cámaras fijas y transformación de imágenes

en Xcalak en colaboración con la Universidad de Southampton bajo el proyecto SARTRAC, con apoyo de la Dra. Laura Carrillo del ECOSUR de Quintana Roo. Asimismo, tenemos planes de instalar otras estaciones de monitoreo ciudadano en otras localidades con el apoyo del proyecto SARTECH de la Dra. Victoria Domínguez y del proyecto PAPIIT IT101024 *Monitoreo ciudadano para el desarrollo de un sistema de alerta*



Figura 5. Estación de CoastSnap de Ciencia Ciudadana en el muelle de la UNAM en Puerto Morelos, Quintana Roo

*temprana de sargazo*. Estas estaciones permitirán generar más información para la validación de los pronósticos de arribazones de sargazo desde el océano.

A través de estos esfuerzos, el Grupo de Estudio del Sargazo (GES) busca desarrollar un sistema de alerta temprana que permita realizar una detección precisa del sargazo en el océano, modelar su transporte a las costas del Caribe Mexicano y validar estos modelos para mejorar, de manera continua, los pronósticos. El propósito fundamental de este sistema de alerta es facilitar la toma de medidas preventivas. No obstante, la información generada por estos trabajos también brinda la oportunidad de tomar medidas proactivas en la planificación en torno a los arribazones de sargazo. Esto se traduce en la capacidad de mitigar posibles efectos adversos, reforzando así, la preparación y respuesta frente a la presencia del sargazo en las costas.

## Referencias

1. Allende-Arandía, Ma. Eugenia; Duran, Rodrigo; Sanvicente-Añorve, Laura y Appendini, Christian M. (2023). Lagrangian Characterization of Surface Transport From the Equatorial Atlantic to the Caribbean Sea Using Climatological Lagrangian Coherent Structures and Self-Organizing Maps. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(7). <https://doi.org/10.1029/2023JC019894>.
2. Cuevas, Eduardo; Uribe-Martínez, Abigail y Liceaga-Correa, María de los Ángeles (2018). A satellite remote-sensing multi-index approach to discriminate pelagic Sargassum in the waters of the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), 3608–3627. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1447162>.
3. Devault, Damien A.; Modestin, Emma; Cottureau, Victoire; Vedie, Fabien; Stiger-Pouvreau, Valérie; Pierre, Ronan; Coynel, Alexandra y Doliq, Franck (2021). The silent spring of Sargassum. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 15580–15583. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-12216-7>.
4. Harley, Mitchell D. y Kinsela, Michael A. (2022). CoastSnap: A global citizen science program to monitor changing coastlines. *Continental Shelf Research*, 245, 104796. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104796>.
5. Hu, Chuanmin (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2118–2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>.
6. Johns, Elizabeth M.; Lumpkin, Rick; Putman, Nathan F.; Smith, Ryan H.; Muller-Karger, Frank E.; T. Rueda-Roa, Digna; Hu, Chuanmin; Wang, Mengqiu; Brooks, Maureen T.; Gramer, Lewis J. y Werner, Francisco E. (2020). The establishment of a pelagic Sargassum population in the tropical Atlantic: Biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*, 182(September 2019), 102269. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269>.
7. López Portillo, José Antonio; Casasola, Iván; Escalante-Ramírez, Boris; Olveres Montiel, Jimena; Arriaga, Jaime y Appendini, Christian (2022). Sargassum detection and path estimation using neural networks. In Peter Schelkens & Tomasz Kozacki (Eds.), *Optics, Photonics and Digital Technologies for Imaging Applications VII* (p. 35). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2621537>.
8. Oviatt, Candace A.; Huizenga, Kristin; Rogers, Caroline S. y Miller, W. Jeff. (2019). What nutrient sources support anomalous growth and the recent sargassum mass stranding on Caribbean beaches? A review. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 517–525. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.049>.
9. Putman, Nathan F.; Goni, Gustavo J.; Gramer, Lewis J.; Hu, Chuanmin; Johns, Elizabeth M.; Trinanes, Joaquin y Wang, Mengqiu (2018). Simulating transport pathways of pelagic Sargassum from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*, 165(June), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.06.009>.
10. Rutten, Jantien; Arriaga, Jaime; Montoya, Leonardo D.; Mariño-Tapia, Ismael J.; Escalante-Mancera, Edgar; Mendoza, E. Tonatiuh; Van Tussenbroek, Brigitta I. y Appendini, Christian M. (2021). Beaching and Natural Removal Dynamics of Pelagic Sargassum in a Fringing-Reef Lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(11), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2021JC017636>.
11. Wang, Mengqiu y Hu, Chuanmin (2016). Mapping and quantifying Sargassum distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 183, 350–367. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.019>.
12. Wang, Mengqiu; Hu, Chuanmin; Barnes, Brian B.; Mitchum, Gary; Lapointe, Brian y Montoya, Joseph P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 364(6448), 83–87. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAW7912>.