

6. Indicadores de arribazón de sargazo por medio del uso de drones



OSCAR FRAUSTO MARTÍNEZ*

LINDA RACHEL MARTELL HERNÁNDEZ*

JOSÉ FRANCISCO RODRÍGUEZ CASTILLO*

SERGIO ESTEBAN DE LEÓN LÓPEZ*

JONATHAN ALFREDO SOLÍS SÁNCHEZ**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.319.06>

Resumen

La función de los ecosistemas presenta clara tendencia de incertidumbre ante el impacto del cambio del clima. Una de estas evidencias es la producción de algas, en específico de algas pelágicas de sargazo en el Caribe y que, en la actualidad, se reconoce como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico. Si bien la identificación de las zonas de crecimiento y génesis es importante, para el caso de las costas del Caribe Mexicano lo imperante se focaliza en el arribazón de las masas y su acumulación a lo largo de los ecosistemas costeros. Uno de los retos principales del arribazón de sargazo se centra en la determinación de éste, lo cual se ha derivado en modelos gruesos a nivel regional (por la fuente y escala de resolución) y que, en este estudio,

* Doctor en Análisis e Investigación Espacial. Profesor-investigador de la División de Desarrollo Sustentable de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6610-5193> ; Scopus ID: 23985600200

** Doctoranda en Desarrollo Sostenible por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7194-2570>

*** Maestro en Ciencias Marinas y Costeras. Investigador asociado del Laboratorio de Observación e Investigación Espacial de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3573-0591>

**** Maestro en Planeación. Investigador de la Facultad de Planeación Urbana, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9445-0701>

***** Licenciado en Manejo de Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1720-7792>

a través de la implementación de drones, se detalla la escala y los procesos de gestión en la costa. Para ello, se desarrollaron vuelos de cohorte en el año 2019 en tres playas de la costa oriental de isla Cozumel, cuyo fin fue estimar los arribazones y, a partir de ello, determinar indicadores para desarrollar una prospectiva de gestión local del sargazo en un contexto de incertidumbre ante el cambio climático, centrados en el cálculo de biomasa, recolecta de sargazo y tipo de balsas de sargazo.

Palabras clave: *gestión, sargazo pelágico, islas, métricas, cuantificación.*

Antecedentes

El aumento del arribo de grandes cantidades de algas en la zona costera es reconocido como un problema de gestión a nivel mundial (Smetacek y Zingone, 2013; Joniver et al., 2021). Los primeros reportes de proliferación y arribazón de sargazo se registraron en 1981, en las playas de Bermudas. Desde 2011 han recalado en las costas del Caribe, de manera inesperada y abrupta, algas de tipo *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, y es un fenómeno recurrente y cada vez con mayor intensidad (Arita et al., 2023); estos arribazones atípicos de sargazo y su acumulación en las playas se reportaron primeramente en las costas de África occidental (Addico y de Graft-Johnson, 2016). Su transporte se asocia a la circulación oceánica y vinculada al Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, con una variabilidad interanual entre primavera y verano (Wang y Hu, 2017).

Según Marsh et al. (2023), los impactos del cambio climático, principalmente el aumento de temperatura, puede ser la causa de una extraordinaria proliferación de especies pelágicas de sargazo en el Atlántico tropical desde 2011, siendo su nivel récord en el verano de 2022. Así, el arribazón de sargazo trae como consecuencia la modificación de las condiciones de la zona próxima a la playa, en los estuarios y en los sistemas de playa-duna a lo largo de la costa y genera la eutroficación, el cambio de las condiciones del agua de mar (reducción de luz, oxígeno y pH) (van Tussenbroek et al., 2017) y la muerte de especies marinas demersales y crustáceos, principalmente (Rodríguez-Martínez et al., 2019).

Ante este escenario, la importancia de los estudios sobre sargazo va en aumento, de unos cuantos, en 2011, a más de 250 en 2022; el 70 % de estos estudios se concentran en el análisis y caracterización natural del sargazo, y 30 % en estudios aplicados vinculados con salud humana, valorización económica y gestión del problema (Arita et al., 2023). En este último tipo de estudios, Sanseverino et al. (2016), destacan el impacto a cuatro sectores socioeconómicos principales: (a) salud humana, (b) pesquerías comerciales, (c) turismo/recreación, y (d) la gestión/monitoreo de los arribazones.

En el caso particular del Caribe mexicano, se reconoce que las capacidades económicas y operativas del gobierno en sus tres niveles, así como de las empresas dedicadas a los servicios turísticos que han sido excedidas por la problemática del arribazón de sargazo, y se ha actuado de manera reactiva, dejando de lado la gestión sostenible de la biomasa arribada a las playas, por lo que los resultados han sido efímeros impactando económica social y ambientalmente a la región (Fraga y Robledo, 2022).

Además, las investigaciones han girado en torno de dos necesidades: conocer biológicamente a la especie y reconocimiento de los impactos sociales, ambientales y económicos que trae consigo este fenómeno (Van Tussenbroek, 2017; Rodríguez-Martínez y Van Tussenbroek, 2017). Conjuntamente, se estableció en el año 2019, la “Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico en México” que coordinó el Conacyt (2019), en el cual se establecieron nueve líneas estratégicas (colección, recolección y disposición; normatividad, comunicación y educación, monitoreo, modelación y alerta temprana; origen e importancia ecológica; impactos socioeconómicos y ambientales; aprovechamiento y usos; cooperación internacional y restauración), donde el monitoreo, la modelación y la alerta temprana son fundamentales.

Para el monitoreo y modelación del sargazo a través de sensores remotos, al inicio se orientó a la identificación de clorofila, seguido del reconocimiento de distribución y abundancia en el océano; además de destacar las grandes limitantes del uso de estas técnicas (periodicidad de captura, resolución, nubosidad, intensidad de luz, profundidad del agua, turbidez, área de análisis, entre otras) (Lazcano-Hernández et al., 2023), y el estudio para el análisis de sargazo en la playa–costa y a nivel local es reciente

(Rodríguez-Martínez, 2022). Aunado a lo anterior, para la toma de decisiones se hace necesario evitar la redundancia, para con ello generar indicadores base que permitan tener información certera para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas (Shuai Zhang et al., 2022; de la Barreda-Bautista et al., 2023).

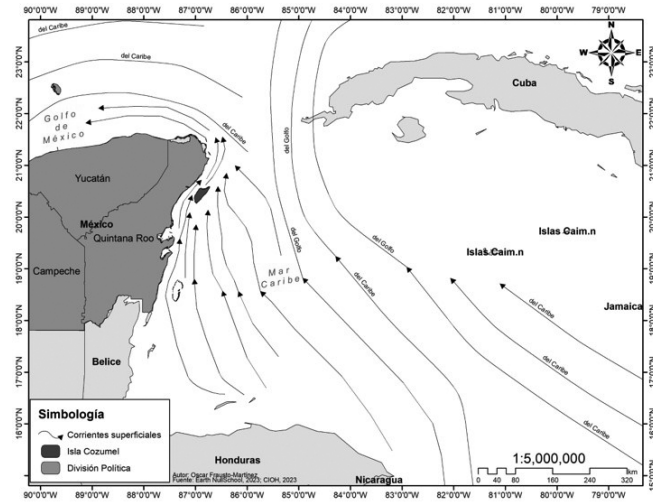
Lo anterior ha generado preguntas básicas: ¿Cuál es la extensión y cobertura del sargazo a lo largo de las costas y playas? ¿Cuál es el volumen de sargazo en el mar? ¿Cuánta es la cantidad de biomasa que arriba a la playa? ¿Qué tipos de parches son comunes del arribazón? Las respuestas a estos cuestionamientos ayudaran a mejorar los pronósticos y modelos de manejo del arribazón del sargazo pelágico a nivel local, por lo que este trabajo tiene por objetivo definir indicadores para la gestión del arribazón del sargazo usando drones (vehículos aéreos no tripulados-VANT).

Materiales y métodos

Área de estudio

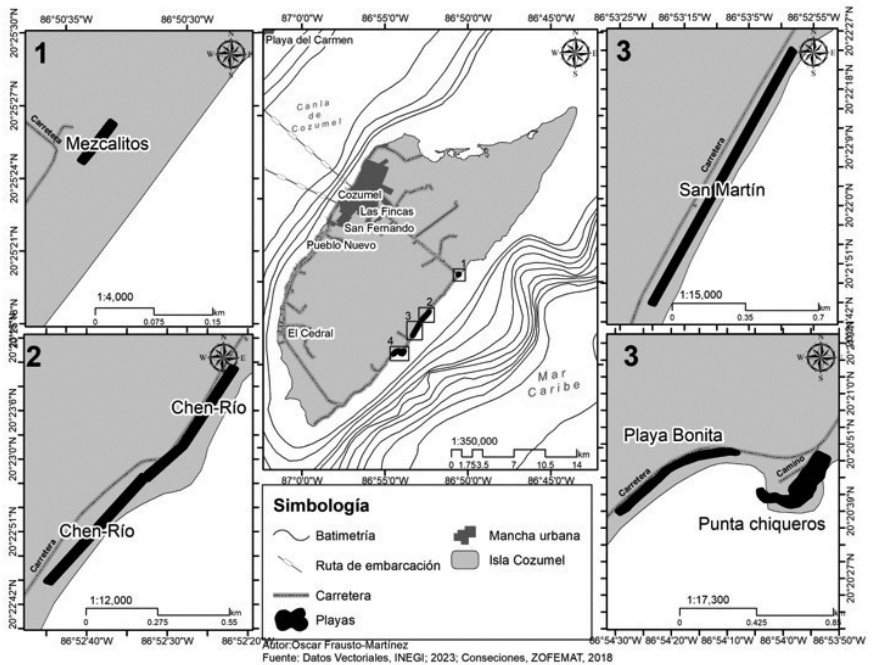
La isla de Cozumel se ubica en el noroeste de la península de Yucatán, a 16 km del sector continental, es parte de los sistemas insulares del Caribe mexicano. Se localiza a 20° 28' N, 86° 55' W (figura 6.1). El clima es cálido y húmedo con abundantes lluvias en verano. La temperatura media anual es de 25.5°C y las precipitaciones alcanzan los 1.504 mm al año. Los ciclones tienen un efecto importante, aumentando la cantidad de precipitaciones en verano (Orellana et al., 2007). Las corrientes marinas en el mar caribe de México se originan en las Antillas rumbo Cozumel, donde se bifurcan hacia el norte y sur, donde hay acarreo de materiales transportados (Sandoval, 2007) y donde las velocidades son discontinuas, paralelas a la línea de costa con corrientes de deriva (Chávez et al., 2003; Alcérreca-Huerta et al., 2019). Estas corrientes tienen gran influencia en el transporte y deposición de sargazo (Zhang et al., 2024). Los sitios de muestreo se distribuyen en el sector oriental de la isla de Cozumel: (a) Mezcalitos (b) Playa Chen Río y (c) Playa Bonita (figura 6.2).

Figura 6.1. Isla Cozumel, contexto en el Caribe y corrientes marinas



Fuente: elaboración propia.

Figura 6.2. Isla Cozumel, contexto en el Caribe y corrientes marinas

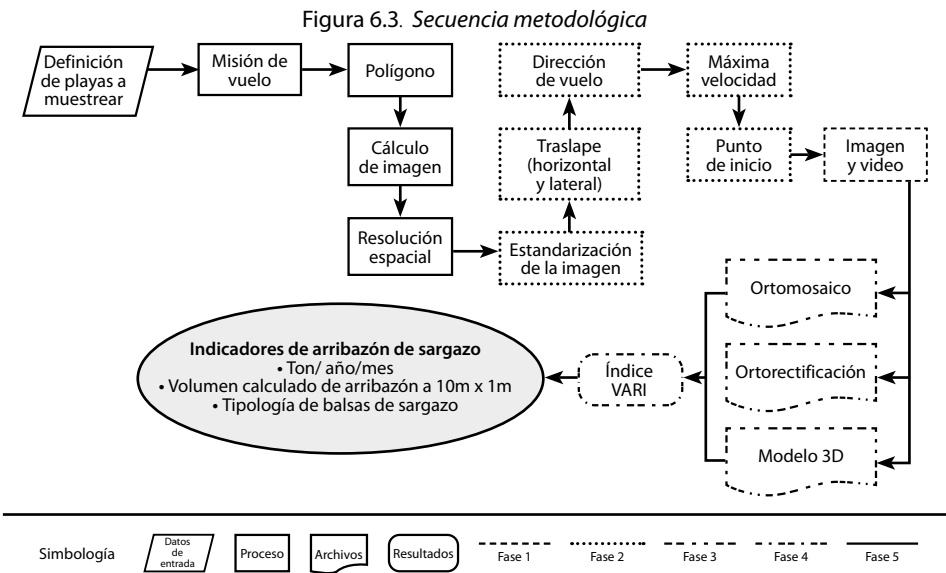


Fuente: elaboración propia.

Materiales y métodos

Se establecieron cinco fases para el análisis metodológico (figura 6.3):

Definición de vuelos y área de cobertura espacial y temporal. Consiste en el reconocimiento de la misión de vuelo del polígono de las cuatro playas a estudiar, donde se incluye el cálculo de la imagen y la resolución espacial; el vuelo se realizó a 150 m de altura, con un pixel promedio de 5.9 cm; la fecha de vuelo fue el 26 de mayo de 2019. Para el procesamiento de datos se utilizó el software OpenDroneMaps (2020).



Fuente: elaboración propia.

Estandarización de la imagen. Se estableció un traslape horizontal y lateral del 60 % con una dirección automática del plan de vuelo, cuya máxima velocidad se estableció en función de los vientos locales en 15 m/s y se utilizó el software DroneDeploy para la estandarización. Imagen y video. Se obtuvieron imágenes RGB con resolución espacial de hasta 4 cm por píxel, con dimensiones 4854 x 3648, con resolución horizontal y vertical de 72 ppp, con una profundidad de bits de 24; estas imágenes y videos se lograron para la fecha de vuelo en las tres

playas analizadas. En la tabla 6.1 se muestran las características de las imágenes y longitud analizada.

Tabla 6.1. *Características de las imágenes del DRONE*

Playa	# imágenes	Longitud m	cm/pixel	Error cuadrático m
Mezcalitos	33	629	3	0.6
Chen Río	33	443	4.1	3.2
Bonita	16	451	8.1	1.3

Fuente: elaboración propia.

Índice VARI. Las imágenes capturadas y los modelos ortorectificados obtenidos, se convierten en los insumos fundamentales para el análisis y la cuantificación de los arribazones de sargazo. Existen índices que trabajan sobre los valores digitales de píxel nativos de las bandas roja, verde y azul (RGB), para generar un índice de vegetación alternativo al NDVI. Por lo anterior se determinó hacer uso del Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), ya que este índice está diseñado para resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos, situación que se presenta en el monitoreo con drones a baja altitud (Martell-Hernández, 2021). El rango de valores que se obtienen con este índice puede contener números positivos y negativos, con los valores negativos se identifica la presencia de sargazo y la paleta de color que se emplea es un color análogo al NDVI. La fórmula de tratamiento espacial del índice VARI es:

$$\text{VARI green} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE})$$

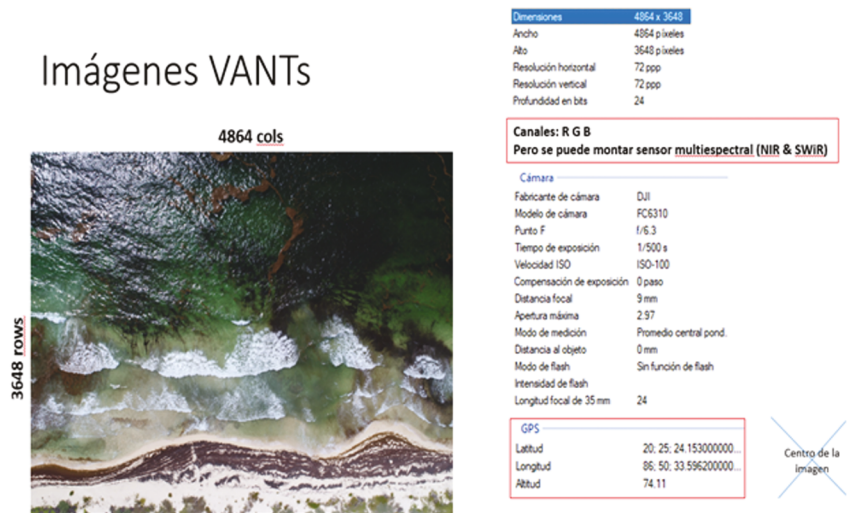
Indicadores de arribazón de sargazo. Para poder hacer comparables los resultados obtenidos en cada playa, es necesario tener una unidad de medida uniforme, por ello se eligió una distancia de diez metros lineales por un metro de anchura; de esta manera, las medidas son estandarizadas para cada uno de los sitios de medición, permitiendo estimar las variaciones de los volúmenes entre playas y entre las imágenes de distintas épocas en cada una. Para ello, los indicadores seleccionados son:

- Volumen de sargazo en playas. Modelado en función de una longitud de 10 m por 1.0 m para cada playa.
- Arribazón anual de sargazo. Reportado por la Zofemat-Local
- Tipología de las cinco clases de balsas de sargazo, con base en Ody et al. (2019): (a) aislado y disperso, (b) hileras flotantes, (c) hileras flotantes con parches pequeños (parques menores a 10 m de diámetro), (d) hileras flotantes con dominio de parches grandes (de más de 10 m de diámetro) y (e) parches grandes semicirculares (superan los 100 m de dimensión).

Resultados

Se procesaron 146 imágenes con una resolución de entre 3.0 y 8.1 cm/pixel, con promedio de 5.96 cm/pixel, con una longitud total de playa analizada de 5,123 m, y un error cuadrático promedio total es de 1.68 cm (figura 6.4).

Figura 6.4. Ejemplo de imagen obtenida para el procesamiento de datos



Fuente: elaboración propia.

Las playas analizadas son de tipo bajas arenosas (Mezcalitos y Playa Bonita) (figura 6.5) y de tipo abrasivas con plataformas de erosión (Chen Río).

Figura 6.5. *Ejemplo de las playas estudiadas*



Mezcalitos



Chen río



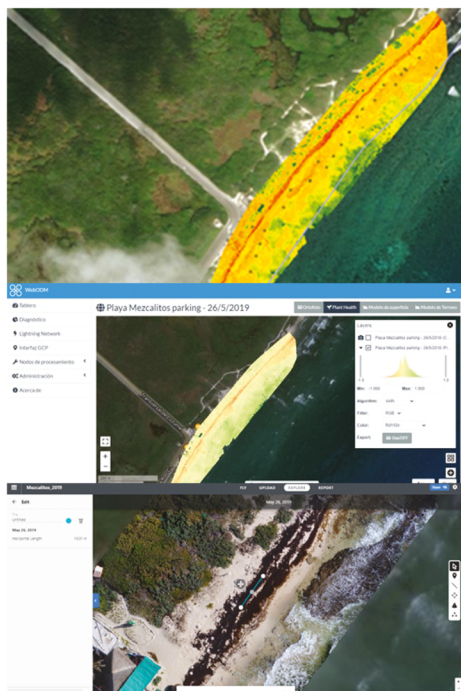
Playa Bonita

Fuente: elaboración propia.

- Índice VARI

Tradicionalmente se usa el índice de algas flotantes (Floating Algae Index, FAI, por sus siglas en inglés) propuesto por Hu (2009) y Hu et al. (2015), el cual resulta de la diferencia entre la reflectancia a 859 nm («borde rojo» de la vegetación) y una línea de base lineal entre la banda roja (645 nm) y la banda infrarroja de onda corta (1240 o 1640 nm). Para este estudio se usó el Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), con el fin de resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos, situación que se presenta en el monitoreo con drones a baja altitud. Los valores que se obtienen con este índice son positivos y negativos, en los valores negativos se identifica la presencia de sargazo y la paleta de color que se emplea es un color análogo al Índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI, por sus siglas en inglés. La figura 6.6 muestra el modelo de DRONE de playa Mezcalitos del 2021.

Figura 6.6. Reconocimiento del índice VARI, diferenciación de Sargazo y determinación de volumen y biomasa en playa Mezcalitos en 2019



Índice VARI

Diferenciación de Sargazo

Determinación de volumen y biomasa

Fuente: elaboración propia.

- Indicadores de volumen y biomasa

El cálculo de volumen se realizó para el año 2019 por medio de las calculadoras de modelado, en función de una longitud de 10 m por 1.0 m para cada playa (tabla 6.2).

Tabla 6.2. *Cálculo de volumen y biomasa para el año 2019*

Playa	Área m2	Volumen m3	Biomasa m3/m
Mezcalitos	10.20	0.43	0.042
Chen Río	10	0.56	0.056
Bonita	10	0.80	0.77

Fuente: elaboración propia con datos de vuelo de Drone.

- Arribazón de sargazo en la isla de Cozumel

El seguimiento al monitoreo de colecta de sargazo en la isla de Cozumel se inició en octubre del 2018, con un seguimiento para los años 2019, 2020 y hasta octubre 2021 (tabla 6.3).

Tabla 6.3. *Recolecta de sargazo toneladas en la isla de Cozumel*

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2018										37.07	73.1	46.1
2019	80.81	72.34	82.97	55.47	93.54	163.17	198.01	124	139	77	9.5	18.35
2020	13.1	74.65	114.21	3.1	62.18	132.11	219.45	143.89	159.99	15.75	56.99	64.71
2021	95.04	142.67	254	437.62	534.57	410.77	443.57	220.94				

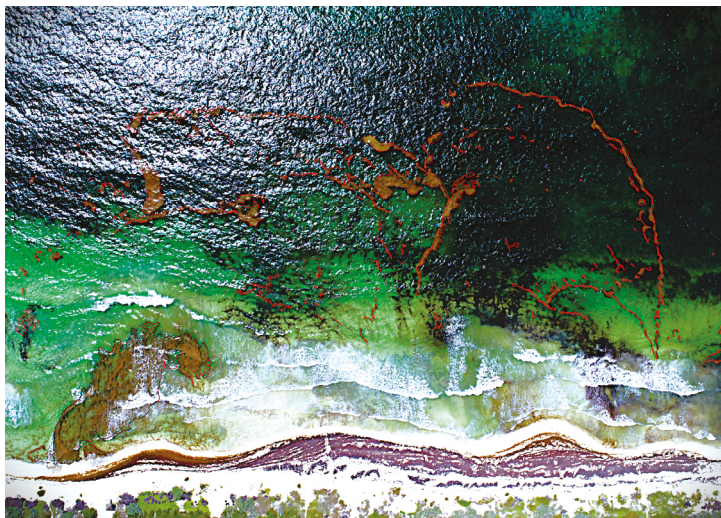
Fuente: información proporcionada por la oficina de Zofemat-Cozumel.

- Tipo de balsas de sargazo

Se distinguieron las siguientes balsas de sargazo para las tres playas, se reconoce la dirección de la corriente y la distribución de las balsas con respecto a la costa:

Para la playa Mezcalitos predominan balsas aisladas y dispersas, con hileras flotantes de hasta 3 km y ancho de 1 a 1.5m (figura 6.7).

Figura 6.7. *Balsas de sargazo en playa Mezcalitos. Mayo de 2019*



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, para la playa Chen río se identifican hileras flotantes con dominio de parches grandes de entre 1 m y 10 m de diámetro (figura 6.8).

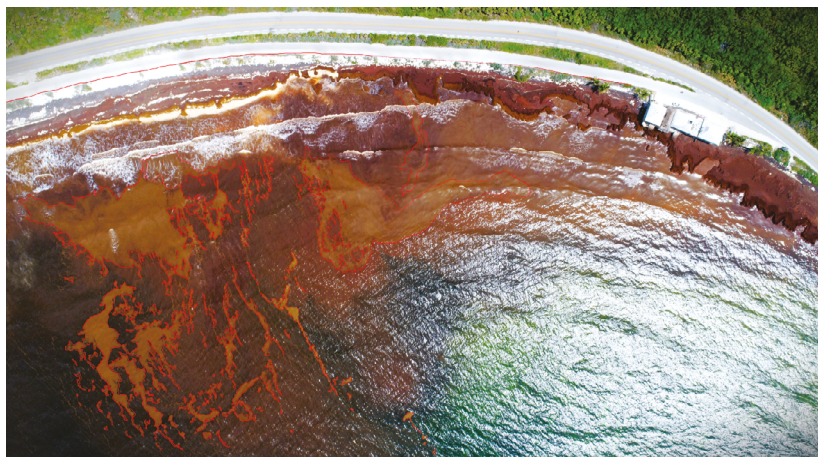
Figura 6.8. *Balsas de sargazo en playa Chen río. Mayo de 2019*



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para Playa Bonita se identifican parches grandes, semicirculares que superan los 100 m de dimensión. Además de hileras flotantes de hasta 1 km de longitud y 3 m de ancho (figura 6.9). Esta playa es la más afectada, anualmente, por arribazones masivos desde el inicio de los arribazones en 2011.

Figura 6.9. *Balsas de sargazo en playa Bonita. Mayo de 2019*



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Las grandes tendencias de incertidumbre de los ecosistemas ante el impacto del cambio del clima muestran la necesidad de contar con monitoreos y procesos de seguimiento estandarizados y de alta confianza. El principal problema radica en los niveles de redundancia de datos para la toma de decisiones; para ello, coincidimos con Shuai Zhang et al. (2022) en el diseño y creación de indicadores base que permitan tener información certera para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas fundamentado en las necesidades de los usuarios. En este estudio se proponen los siguientes:

- a) Estandarizar los procesos de captura de imágenes, desde la planificación del vuelo, la imagen y el video, que permita una

- restitución fotogramétrica de apoyo y que fundamente levantamientos posteriores del mismo sitio para generar bases de datos comparables en tiempo y en espacio. Esto permite, de acuerdo con Lazcano-Hernández et al. (2023), subsanar las grandes limitantes del uso de técnicas de percepción remota (periodicidad de captura, resolución, nubosidad, intensidad de luz, profundidad del agua, turbidez, área de análisis, entre otras).
- b) Uso del índice VARI como alternativa de uso en la estimación del arribazón de sargazo. El índice de algas flotantes (FAI) es el más usado teniendo en cuenta la reflectancia, sin embargo, al no contar con imágenes periódicas, sensores espectrales se recurre al Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), con el fin de resaltar la vegetación en la parte visible del espectro con baja sensibilidad a los efectos atmosféricos para vuelos de baja altura, donde los valores negativos del índice son congruentes con la identificación del sargazo arribado en la costa y, con el fin de representarlo cartográficamente, se emplea la paleta del NDVI. Lo anterior coincide con las recomendaciones de Hu et al. (2015), Chávez et al. (2020) y Rodríguez-Martínez (2022) para estudios a escala detallada.
 - c) Si bien existen algoritmos que permiten el cálculo de la biomasa a través de la percepción remota, las externalidades representan una limitante fundamental en el uso de imágenes de satélite (Uribe-Martínez et al., 2022; Lazcano-Hernández et al., 2023), por lo que el uso de Drones permite mejorar los monitoreos de periodicidad de captura de información, resolución y calidad de la imagen, minimizar la influencia de la nubosidad, reducir la influencia de la intensidad de luz, reconocer la influencia de la profundidad del agua en la diferenciación del sargazo, diferenciar áreas de turbidez y afinar las áreas de análisis, lo que reduce las limitantes de la percepción remota en el análisis del sargazo (Rodríguez-Martínez, 2022; Lazcano-Hernández et al., 2023).
 - d) El arribazón de sargazo en la isla de Cozumel es un caso singular a lo largo de la costa Caribe de México. Lo anterior debido a que este proceso se da en la costa oriental, la cual se caracteriza por sistemas naturales con bajo impacto. La colecta de sargazo en la isla de

Cozumel entre 2018 y 2021 muestra una tendencia heterogénea, con altos niveles de variabilidad en la acumulación costera. En el mes de mayo de 2021 se registró una colecta de 534.57 toneladas en la costa oriental, superando el acumulado anual de los años anteriores. El mes de julio se identifica como el de mayor concentración para los tres años de monitoreo.

- e) Los tipos de arribazones de sargazo representan un reto en el diseño de las estrategias para la contención. Las tipologías se han orientado a describir las Balsas de sargazo en mar abierto (Ody et al., 2019). En este estudio se reconocieron los siguientes tipos: (a) balsas aisladas y dispersas, (b) hileras flotantes con parches y (c) parches grandes semicirculares.

Conclusiones

La definición de indicadores para la gestión del arribazón del sargazo usando drones fue el reto fundamental de este trabajo, el cual parte de las grandes tendencias de incertidumbre de los ecosistemas ante el impacto del cambio del clima y se fundamenta en la necesidad de contar con monitoreos y procesos de seguimiento estandarizados y de alta confianza. Para ello, el uso de estos sistemas de indicadores reconoce los procesos de presión (arribazón de sargazo), estado (cálculo de cantidad de biomasa, tipología de balsas) y respuesta (proceso sistematizado para el monitoreo de arribazón de sargazo y colecta de sargazo).

Estos indicadores se fundamentan en el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) para la gestión de los ecosistemas y se orientan en la toma de decisiones informadas. El sistema se integra de cinco indicadores de fácil entendimiento y que pueden ser implementados a bajo costo y a una escala detallada.

El uso de vehículos aéreos no tripulados-VANT (Drones) es una alternativa económica y de acción local para el monitoreo de sargazo, con lo cual se contribuye a reducir las tendencias de incertidumbre que representa un fenómeno con pocos datos a escala detallada. En conjunto, con el uso de índices y datos de colecta, así como con tipologías de las balsas de sargazo

se pueden proponer alternativas para el manejo integrado de los arribazones en áreas de mayor complejidad.

Finalmente, generar indicadores base permite tener información cierta para la estimación espacial del arribazón de sargazo a nivel de playas y las costas, sin embargo, continúa siendo un reto debido a la ausencia de casos de estudio para una escala de interpretación y análisis a detalle.

Referencias

- Addico, G. N. D., y de Graft-Johnson, K. A. A. (2016). Preliminary Investigation into the Chemical Composition of the Invasive Brown Seaweed *Sargassum* along the West Coast of Ghana. *AJB*, 15, 2184–2191. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.15177>
- Alcérreca-Huerta, J. C., Encarnacion, J. I., Ordoñez-Sánchez, S., Callejas-Jiménez, M., Gallegos Díez Barroso, G., Allmark, M., Mariño-Tapia, I., Silva Casarín, R., O'Doherty, T., Johnstone, C. et al. (2019). Energy Yield Assessment from Ocean Currents in the Insular Shelf of Cozumel Island. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7, 147. <https://doi.org/10.3390/jmse7050147>
- Arita, J. T., Iporac, L. A. R., Bally, N. K., Fujii, M. T. y Collado-Vides, L. (2023) Integrative Literature Analysis of Holopelagic *Sargassum* (Sargasso) in the Western Atlantic (2011–2022): *Status, Trends, and Gaps. Phycology*, 3, 447–458. <https://doi.org/10.3390/phy-cology3040030>
- Chávez, G., Candela, J. y Ochoa, J. (2003). Subinertial flows and transport in Cozumel Channel. *Journal of geophysical research*, 108. <https://doi.org/10.1029/2002jc001456>
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., Van Tussenbroek, B. I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., Monroy-Velázquez, L. V., Leal-Bautista, R. et al. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12, 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.. (2019). Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México: CONACYT https://conahcyt.mx/sargazo/images/Agenda/2020/Agenda_Conacyt_Sargazo-2020_.pdf
- De la Barrera-Bautista, B., Metcalfe, S. E., Smith, G., Sjögersten, S., Boyd, D. S., Cerdeira-Estrada, S., López-Ramírez, P., Magaldi, A., Ressler, R., Perera-Valderrama, S., Caballero-Aragón, H., Siordia, O. S., Couldridge, J., Gray, P., Silva, R., Van Tussenbroek, B. I., Escalante-Mancera, E., y Foody, G. (2023). Monitoring holopelagic *Sargassum* spp. along the Mexican Caribbean coast: understanding and addressing user requirements for satellite remote sensing. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1166000. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1166000>

- Fraga, J., y Robledo, D. (2022). Covid-19 and Sargassum blooms: impacts and social issues in a mass tourism destination (Mexican Caribbean). *Maritime Studies*, 21, 159-171. <https://doi.org/10.1007/s40152-022-00267-0>
- Hu, C. (2009). A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sens. Environ.*, 113, 2118–2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>
- Hu, C., Feng, L., Hardy, R. F., y Hochberg, E. J. (2015). Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic sargassum macroalgae. *Remote Sens. Environ.*, 167, 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.022>
- Joniver, C. F. H., Photiades, A., Moore, P. J., Winters, A. L., Woolmer, A., y Adams, J. M. M. (2021). The Global Problem of Nuisance Macroalgal Blooms and Pathways to Its Use in the Circular Economy. *Algal Res.*, 58, 102407. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102407>
- Lazcano-Hernández, H. E., Arellano-Verdejo, J., y Rodríguez-Martínez, R. E. (2023). Algorithms applied for monitoring pelagic Sargassum. *Front. Mar. Sci.*, 10, 1216426. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1216426>
- Marsh, R., Skliris, N., Tompkins, E. L., Dash, J., Dominguez-Almela, V., ... Tonon, T. (2023). Climate-sargassum interactions across scales in the tropical Atlantic. *PLOS Clim*, 2(7), e0000253. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000253>
- Martell-Hernández, L. R. (2021). *Implementación de VANTs para cuantificar los arribazones de sargazo en Isla Cozumel, Quintana Roo-México, 2019-2021* [Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. México].
- Ody, A., Thibaut, T., Berline, L., Changeux, T., Andre, J-M., Chevalier, C. et al. (2019). From In Situ to satellite observations of pelagic Sargassum distribution and aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean. *PLoS ONE*, 14(9), e0222584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222584>
- OpenDroneMap (2020). Authors ODM – A command line toolkit to generate maps, point clouds, 3D models and DEMs from drone, balloon or kite images. OpenDroneMap/ODM GitHub Page 2020; <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>
- Orellana, R., Nava, F., y Espadas, C. (2007). El clima de Cozumel y la Riviera Maya. En O. Mejía (Ed.). *Biodiversidad Acuática de la isla de Cozumel*. UQROO – Plaza y Valdés, México, pp. 23-32.
- Rodríguez-Martínez, R. E., y Van Tussenbroek, B. I. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa. *Floreceiminetos Algaes Nocivos En México*, (December 2016), 438. <https://www.researchgate.net/publication/317222216>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordan-Dahlgren, E., y Hu, C. (2022). Spatio-temporal variability of pelagic sargassum landings on the northern mexican caribbean. *Remote Sens. Applications: Soc. Environ.*, 27, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>
- Sandoval, V. (2007). Dinámica de corrientes costeras. En O. Mejía (Ed.). *Biodiversidad Acuática de la isla de Cozumel*. UQROO-Plaza y Valdés, México. 43 - 47.
- Sanseverino, I., Conduto, D., Pozzoli, L., Dobricic, S., y Lettieri, T. (2016). Algal bloom and its economic impact. *European Union*, <https://doi.org/10.2788/660478>

- Shuai, Z., Hu, H., Barnes, B. B. y Harrison, T. N. (2022). Monitoring Sargassum Inundation on Beaches and Nearshore Waters Using PlanetScope/Dove Observations, IEEE. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3148684>
- Smetacek, V., y Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478), 84-88. <https://doi.org/10.1038/nature12860>
- Uribe-Martínez, A., Berriel-Bueno, D., Chavez, V., Cuevas, E., Almeida, K. L., Fontes, J. V. H., Van Tussenbroek, B. I., Mariño-Tapia, I., Liceaga-Correa, M. A., Ojeda, E., Castañeda-Ramírez, D. G., y Silva, R. (2022). Multiscale distribution patterns of pelagic rafts of sargasso (*Sargassum* spp.) in the Mexican Caribbean (2014–2020). *Front. Mar. Sci.*, 9, 920339. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920339>
- Van Tussenbroek, B. I., Hernández-Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., y Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Mar. Pollut. Bull.*, 122, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Wang, M., y Hu, C. (2017). Predicting sargassum blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations. *Geophysical Res. Lett.*, 44(7), 3265-3273. <https://doi.org/10.1002/2017GL072932>
- Zhang Y., Hu C., McGillicuddy, D. J., Barnes, B. B., Liu Y., Kourafalou, V. H., Zhang, S., y Hernandez, F. J. (2024). Pelagic sargassum in the Gulf of Mexico driven by ocean currents and eddies. *Harmful Algae*, 133, 102566. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102566>