

INVASAR

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de
especies exóticas invasoras asociadas al sargazo pelágico en zonas marino-costeras
del Caribe mexicano

INFORME FINAL

mayo de 2022



Al servicio
de las personas
y las naciones



Este informe se realizó con fondos del Proyecto GEF-Invasoras 00089333 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEL”, en estrecha coordinación entre la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y con financiamiento del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés), a través del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Las opiniones, análisis y recomendaciones de política incluidas en este informe no reflejan necesariamente el punto de vista del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, como tampoco de su junta ejecutiva ni de sus estados miembros.

Citar como: PNUD México (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2022. Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo pelágico en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR). Reporte final del proyecto WG014 entregado a la CONABIO y al PNUD en el marco del Proyecto GEF 00089333 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEL”, Van Tussenbroek, B. I., Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., Suescún-Bolívar, Thomé, P. E., Cerqueda-García, D., García-Maldonado, J.Q, Martínez-López, I.G., Gómez Reali, M.A., Escalante Mancera J. E., López Portillo J.A., Vera Vázquez E., Barba Santos, M.G. (UNAM-ICML). CDMX, México. 157pp.

Fotografías cortesía de: Van Tussenbroek, B. I., Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., Suescún-Bolívar, Gómez Reali, M.A., Escalante Mancera J. E., López Portillo J.A.

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas
invasoras asociadas al sargazo pelágico en zonas marino-costeras del Caribe mexicano
(InvaSAR)

Introducción General

Van Tussenbroek, B. I., Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., Suescún-Bolívar,
Thomé, P. E., Cerqueda-García, D., García-Maldonado, J.Q, Martínez-López, I.G., Gómez
Realí, M.A., Escalante Mancera J. E., López Portillo J.A., Vera Vázquez E.,
Barba Santos, M.G.

Existen aproximadamente 9600 especies de macroalgas en el ambiente marino; de estos ≈ 1800 son algas verdes (Chlorophyta), ≈ 6200 algas rojas (Rhodophyta), y ≈ 1800 algas pardas (Phaeophyceae). De este gran grupo diverso de macroalgas, solamente dos especies, perteneciendo al grupo de las algas pardas, habitan de manera permanentemente en la superficie del mar: *Sargassum fluitans* y *S. natans*, también conocido como sargazo (Godínez-Ortega *et al.*, 2021). Desde tiempos históricos, el sargazo se ha concentrado en el Mar de los Sargazos en el Atlántico Norte subtropical (Godínez-Ortega *et al.*, 2021). En el Mar de los Sargazos, estas algas pardas son consideradas como fundadoras de un ecosistema biodiverso y valioso (Trott *et al.*, 2010), brindando refugio a invertebrados (Abé *et al.*, 2013; Coston-Clements *et al.*, 1991; Dooley 1972), peces (Casazza y Ross, 2008; Coston-Clements *et al.*, 1991; Dooley, 1972; Wells y Rooker, 2004), tortugas (Witherington *et al.*, 2012) y aves marinas (Haney, 1986). Por el color de café claro del sargazo, y por sustentar una gran biodiversidad, las concentraciones pelágicas de estas algas en la superficie del océano son conocidas como Mareas Doradas (Smetacek y Zingone, 2013).

Sin embargo, desde 2011, se ha formado una nueva zona de concentración de sargazo en el Océano Atlántico Norte tropical, nombrado “El Gran Cinturón Atlántico del Sargazo” (The Great Atlantic Sargassum Belt, Fig. 1) por Wang y colaboradores (2019). Desde entonces, las costas de países de África y el Caribe han recibido, de manera recurrente, recales masivos del sargazo. Desde finales de 2014, cantidades inusuales empezaron a llegar a las costas del Caribe mexicano, resultando en acumulaciones de miles de toneladas de masas algales en las playas y otras costas, que han afectado a la industria turística y en especial al turismo de playa que es la principal fuente de ingreso del Caribe mexicano (Chávez *et al.*, 2020). La descomposición de la biomasa recalada de sargazo, deriva en un cambio en la calidad del agua por sus lixiviados y materia orgánica particulada, que causa un cambio de su color azul turquesa a marrón, generando las llamadas Mareas Marrones de Sargazo (Van Tussenbroek *et al.*, 2017). Estas mareas marrones han provocadas zonas muertas cercanas a las playas (Fig. 2), y sus efectos sobre el equilibrio de los ecosistemas del sistema arrecifal más allá de las zonas cercanas a las costas, aún se deben establecer.

El sargazo a la deriva en la superficie del océano, no solo sirve como hábitat, sino también como vehículo de dispersión para muchos organismos. Estos sistemas a la deriva, impulsados por corrientes superficiales, oleaje y vientos permiten que los organismos asociados puedan colonizar nuevos hábitats (Thiel y Gutow, 2005), y así ampliar sus rangos de distribución si allí logran sobrevivir y reproducir (Herborg *et al.*, 2007). De esta forma, el sargazo puede ser un agente de dispersión e introducción de especies no-nativas a las costas del Caribe mexicano. Las especies no-nativas (también conocidas como especies exóticas o introducidas) son aquellas introducidas en un ecosistema fuera de su área de distribución habitual. Las especies no-nativas no son necesariamente invasivas; solamente si las especies no-nativas poseen atributos que les permitan desplazar a especies nativas son consideradas como invasoras (Verbrugge *et al.*, 2016). Las especies invasoras podrán afectar la

biodiversidad, alterar los ciclos biogeoquímicos y cambiar la distribución de los niveles tróficos (Wallentinus y Nyberg, 2007). La detección oportuna de especies no-nativas, potencialmente invasoras permitirá actuar durante el inicio de la fase de establecimiento y proceder para su erradicación, o mitigación de su impacto.

Bajo este panorama, este proyecto desarrolló y ejecutó un protocolo para el estudio de la flora y fauna asociada a los mantos de sargazo, los movimientos de los mantos de sargazo cuando se acercan hacia la costa, así como el monitoreo de la calidad de agua en zonas afectadas por las mareas marrones de sargazo. El área de estudio fue el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) en el norte del Caribe mexicano (Fig. 3). En los siguientes capítulos se detallan los resultados de este proyecto, que fueron recopilados según los protocolos previamente elaborados (Van Tussenbroek *et al.*, 2021), y se anexan los bases con los datos recopilados en este estudio.

El trabajo en equipo de manera transversal involucrando especialistas de diferentes disciplinas permitió un estudio completo de sargazo mismo (composición de *Sargassum* spp. en los mantos), su comunidad (macro fauna, epifauna, epiflora, microbioma, y peces), su dinámica (estudio de la deriva de los mantos), y su impacto (calidad de agua) de manera más eficaz, si se hubieron estudiados estos aspectos de manera independiente. Las conclusiones principales de este estudio fueron:

1. La composición de los mantos de sargazo que llegaron a PNAPM en 2020 y 2021 fueron dominados por *S. fluitans* morfotipo III.
2. La fauna móvil asociada a los mantos de sargazo es abundante y diverso, con una dominancia de pocas especies. Se registraron cambios en la composición específica y densidad de fauna móvil a través del tiempo (2020-2021), pero no a través del espacio (i.e. zona de muestreo: arrecife frontal y posterior).

3. Los epibiontes (epifauana y algas epifitas) sobre sargazo mostraron una baja diversidad específica, con cobertura y densidad variable a través del tiempo.
4. Sargazo tiene un microbioma distinto al agua del mar con una dominancia de *Vibro* spp., y los arribazones de sargazo influyen en la comunidad de bacterioplancton del agua del mar.
5. Dispositivos remotos de video (RUVs) son adecuados para identificar la ictiofauna asociada al sargazo de manera no invasiva. Se registró una baja riqueza específica con dominancia de especies de la familia Carnagidae; especialmente *Caranx ruber*. Los mantos de sargazo tenían una ictiofauna más abundante en la zona del arrecife frontal que posterior.
6. Las boyas a la deriva son adecuadas para fijar cámaras y así crear RUVs, además de determinar los movimientos de mantos de sargazo al acercarse a la costa. La influencia del viento sobre el desplazamiento de sargazo es notoria con vientos mayores de 5 m s^{-1} ; con velocidades menores, la deriva de los mantos es determinado por corrientes.
7. Durante los periodos de afluencias de sargazo, las aguas cercanas a la costa registraron una disminución de oxígeno disuelto, y un incremento en turbidez y K_d (coeficiente de extinción de luz). Es necesario continuar con los monitoreos para evaluar el posible impacto de los arribazones de sargazo sobre la calidad de agua en zonas alejadas de la costa.
8. Considerando la alta variabilidad de biota asociada a los mantos de sargazo, dependiendo del evento (tiempo), se recomienda realizar varios muestreos a lo largo de una temporada de afluencia, para obtener una caracterización representativa.
9. En sistemas arrecifales, tales como el de PNAPM, la zona idónea para colectar la biota asociada al sargazo para su caracterización, es el arrecife frontal, antes de que el sargazo haya atravesado la cresta del arrecife. Esta aplica en especial a la ictiofauna.

10. El único grupo de biota asociada al sargazo con especies de nuevo registro fue la fauna móvil. Las 14 especies de nuevo registro de fauna móvil, poseen un alto riesgo de invasión, por lo que es urgente estudiar estas especies de manera inmediata.

REFERENCIAS

- Abé H, Komatsu T, Kokubu Y, Natheer A, Rothausler EA, Shishido H, Yoshizawa S, Ajisaka T (2013) Invertebrate fauna associated with floating *Sargassum horneri* (Fucales: Sargassaceae) in the East China Sea. *Species Diversity* 18: 75–85
- Blazewicz-Paszkowycz M, Bamber R, Anderson G (2012) Diversity of Tanaidacea (Crustacea: Peracarida) in the World's Oceans – How Far Have We Come? *PLoS ONE* 7(4): e33068
- Casazza T, Ross SW (2008) Fishes associated with pelagic *Sargassum* and open water lacking *Sargassum* in the Gulf Stream off North Carolina. *Fishery Bulletin* 106: 348-363
- Chávez V, Uribe-Martínez A, Cuevas E, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Francisco V, Estévez M, Celis LB, Monroy-Velázquez LV, Leal-Bautista R, Álvarez-Filip L, García-Sánchez M, Masia L, Silva R (2020) Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities, *Water* 12: 2908
- CONABIO (2015) Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México. México DF
- Coston-Clements L, Settle LR, Hoss DE, Cross FA (1991) Utilization of the *Sargassum* habitat by marine invertebrates and vertebrates. A review. NOAA Technical Memorandum. NMFS SEFSC 296. 30 pp
- Dooley JK (1972) Fishes associated with the pelagic *Sargassum* complex, with a discussion of the *Sargassum* community. *Marine Science* 16: 1-32
- García-Sánchez M, Graham C, Vera E, Escalante-Mancera E, Álvarez-Filip L, van Tussenbroek BI (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany* 167: 103275

- Godínez-Ortega JL, Cuatlán-Cortés JV, López-Bautista JM, van Tussenbroek BI (2021) A Natural history of floating *Sargassum* species (Sargasso) from Mexico. In Natural History and Ecology of Mexico and Central America (p. 35). London, UK: IntechOpen:59-94
- Gower J, Young E, King S (2013) Satellite images suggest a new *Sargassum* source region in 2011. Remote Sensing Letters, 4: 764-773
- Haney JC (1986) Seabird Patchiness in Tropical Oceanic Waters: The Influence of *Sargassum* “Reefs” The Auk 103: 141-151
- Herborg LM, Jerde CL, Lodge DM, Rui GM, MacIsaac HJ (2007) Predicting invasion risk using measures of introduction effort and environmental niche models. Ecological Applications 17: 663–674
- Johns EM, Lumpkin R, Putman NF, Smith RH, Muller-Karger FE, Rueda-Roa DT, Werner FE (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: 102269
- Martin-Smith KM (1994) The role of epifaunal crustaceans on *Sargassum* spp. at Magnetic Island, Great Barrier Reef, Australia. PhD thesis, James Cook University.
- Parr A (1939) Quantitative observations on the pelagic *Sargassum* vegetation of the western North Atlantic with preliminary discussion of morphology and relationships. Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection 7: Art. 7.
- Resiere D, Valentino R, Nevière R, Banydeen R, Gueye P, Florentin J, Mehdaoui H (2018) *Sargassum* seaweed on Caribbean islands: an international public health concern. The Lancet 392: 2691
- Rutten J, Arriaga JA, Montoya LD, Mariño-Tapia IJ, Escalante-Mancera E, Mendoza ET, van Tussenbroek BI, Appendini CM (2021) Beaching and Natural Removal Dynamics of

- Pelagic *Sargassum* in a Fringing-Reef Lagoon. Journal of Geophysical Research: Oceans: e2021JC017636
- Schell JM, Goodwin DS, Siuda AN (2015) Recent *Sargassum* inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. Oceanography 28: 8-11
- Smetacek V, Zingone A (2013) Green and golden seaweed tides on the rise. Nature 504: 84-88
- Thiel M, Gutow L (2005) The ecology of rafting in the marine environment. II. The rafting organisms and community. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review 43: 279–418
- Thiel M, Haye PA (2006) The ecology of rafting in the marine environment. III. Biogeographical and evolutionary consequences. Oceanography and Marine Biology 44: 323–429
- Trott TM, McKenna SA, Pitt JM, Hemphill A, Ming FW, Rouja P, Gjerde KM, Causey B, Earle SA (2010) Efforts to enhance protection of the Sargasso Sea. Proceedings of the 63rd Gulf and Caribbean Fisheries Institute. Nov 1–5, San Juan, Puerto Rico, pp 282–286
- Van Tussenbroek BI, Arana HAH, Rodríguez-Martínez RE, Espinoza-Avalos J, Canizales-Flores HM, González-Godoy CE, Barba-Santos MG, Vega-Zepeda A, Collado-Vides L (2017) Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. Marine Pollution Bulletin 122: 272-281
- Van Tussenbroek, Van Tussenbroek, B. I., Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., Thomé, P. E., Suescún-Bolívar, Barba Santos, M.G., L.P., Gómez Realí, M.A., Escalante Mancera J. E. (2021) INVASAR- Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo

pelágico en zonas marino-costeras del Caribe mexicano. PROTOCOLOS entregados a CONABIO en octubre de 2021.

- Verbrugge LN, Leuven R S, Zwart HA (2016) Metaphors in invasion biology: implications for risk assessment and management of non-native species. *Ethics, Policy & Environment* 19: 273-284
- Wallentinus I, Nyberg CD (2007) Introduced marine organisms as habitat modifiers. *Marine Pollution Bulletin* 55: 323-332
- Wang M, Hu C, Barnes BB, Mitchum G, Lapointe B, Montoya JP (2019) The great Atlantic Sargassum belt. *Science* 365: 83-87
- Wells DRJ, Rooker IR (2004) Spatial and temporal patterns of habitat use by fishes associated with *Sargassum* mats in the northwestern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* 74: 81-99
- Witherington B, Hiram S, Hardy R (2012) Young sea turtles of the pelagic *Sargassum*-dominated drift community: habitat use, population density, and threats. *Marine Ecology Progress Series* 463: 1-22.
- Yeatman HC (1962) The problem of dispersal of marine littoral copepods in the Atlantic Ocean, including some redescrptions of species. *Crustaceana* 4: 253–272

F

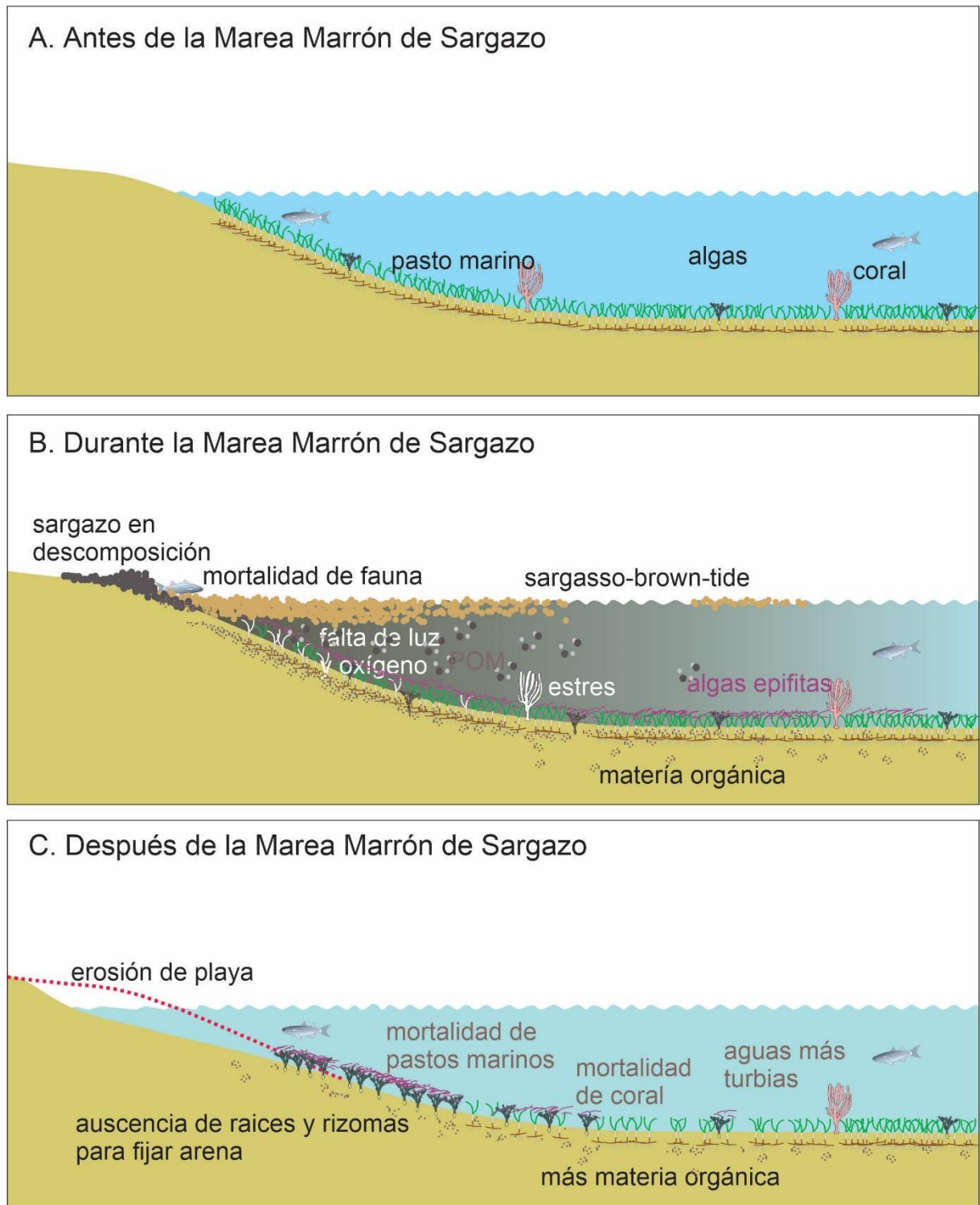


Fig. 2. Diagrama del impacto de Marea Marrón de Sargazo en las costas del Caribe mexicano (modificado de Van Tussenbroek *et al.*, 2017).

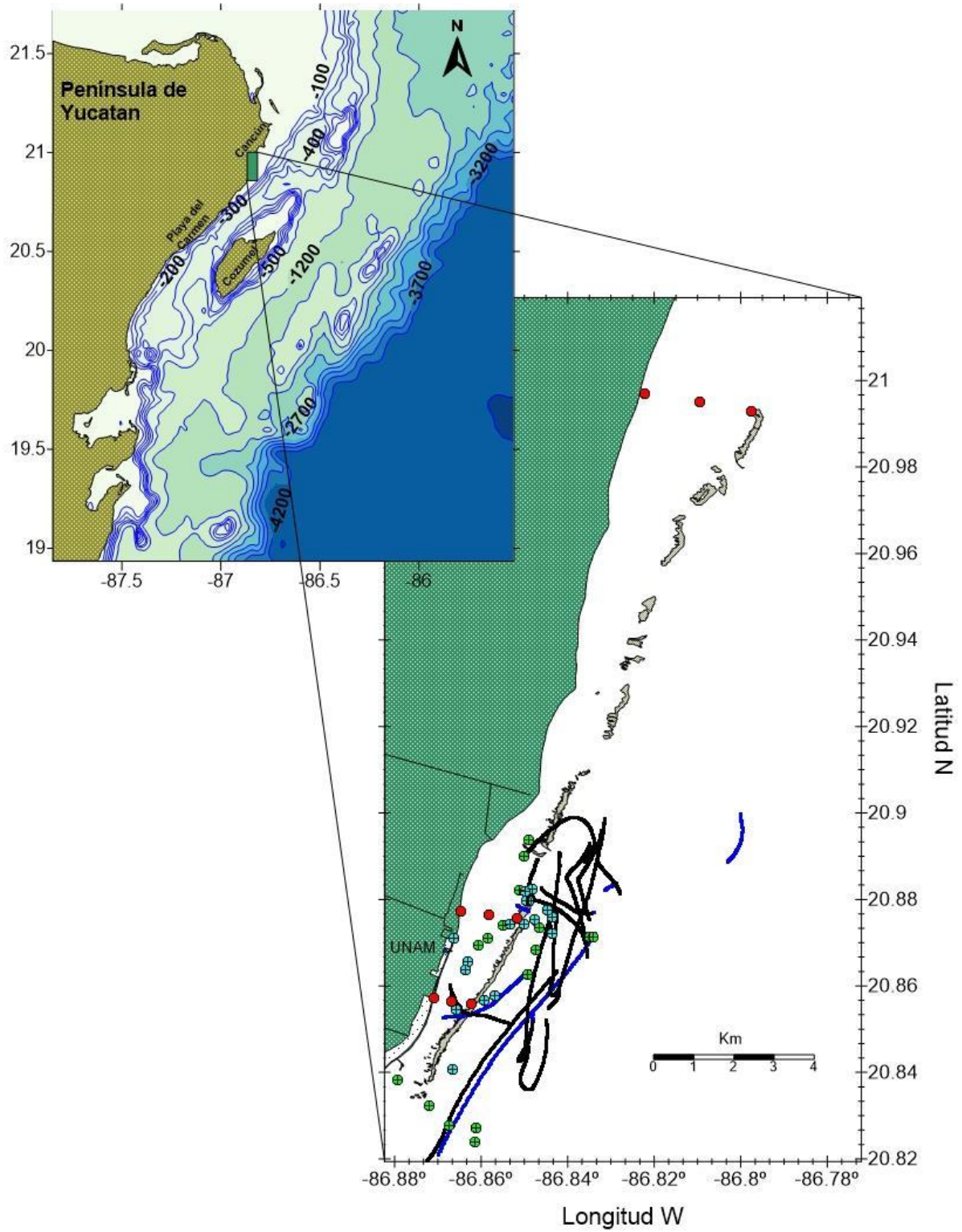


Fig. 3. Mapa de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), indicando todos los puntos de muestreo en este estudio.

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 1

Fauna móvil

Monroy Velázquez, L.V., van Tussenbroek, B. I.

Resumen

Se analizó la composición de la fauna móvil asociada a especies pelágicas de *Sargassum* (sargazo) a lo largo de siete muestreos, con un único muestreo en 2020 (junio) y seis muestreos entre abril y julio de 2021 en la costa del Caribe mexicano. Por muestreo, se realizaron colectas en seis mantos de sargazo en dos zonas (arrecife frontal y posterior) del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos con una red de cuchara de 0.25m² y luz de malla de 500µ. Las tres especies/morfotipos de *Sargassum* variaban en abundancia relativa a lo largo del periodo, con dominancia de *S. fluitans* III en casi todos los muestreos, con un peso relativo entre el 68.2% y el 82.7%. *S. natans* VIII dominó únicamente en un muestreo de abril de 2021, ocupando 78% del peso total de las muestras; mientras que *S. natans* I nunca dominó los mantos algales, con un peso relativo entre 1.4 y 28.2%. El filo más diverso de la fauna móvil fue Arthropoda, siendo el subfilo Crustacea el más diverso. En las 42 muestras en total, cuatro especies representaron de forma conjunta el 85.8% de la abundancia total: los crustáceos *Latreutes fucorum* y *Carpas minutus* y el gusano poliqueto *Platynereis dumerilii* presentaron los Índices de Valor de Importancia de 80.5, 50.7 y 29.4, respectivamente. Se registran por primera vez en el Caribe mexicano a las especies *Carpas minutus*, *Zeuxo exsargasso*, *Corambe oscura*, *Doto pygmaea*, *Spurilla sargassicola*, *Acerotisa notulata*, *Chatziplana grubei*, y *Heterochaerus sargassi*; estas ocho especies se suman a los seis nuevos registros asociados a los mantos pelágicos en la misma área de estudio en trabajos anteriores recientes. Todas estas especies de nuevo registro tiene alto riesgo de invasión, debido a una elevada probabilidad de introducción por los arribazones periódicos de sargazo, combinado con una falta de conocimiento de su capacidad de establecimiento, y de su impacto sobre el ecosistema y biodiversidad.

I. INTRODUCCIÓN

En el mar abierto, sargazo constituye un hábitat estructuralmente complejo y dinámico, que sostiene un diverso ensamble de fauna móvil, que proporciona refugio, sitio de crianza y alimentación para peces (Dooley, 1972; Wells y Rooker, 2004) e invertebrados (Coston-Clements *et al.* 1991). Sin embargo, esta fauna, al mismo tiempo, podrá ser una amenaza potencial para los ecosistemas costeros donde recale el sargazo, ya que los mantos pelágicos se trasladan a través de diferentes regiones geográficas de la costa de África occidental, cruzando el Atlántico tropical, pasando a través del Caribe, posiblemente el Golfo de México y terminando en el Mar de los Sargazos en el Atlántico oeste subtropical. De esta forma los mantos pueden ser vector de introducción de especies no nativas (Franks *et al.* 2016). La llegada de un ensamble de fauna asociada a los mantos flotantes de sargazo aumenta la probabilidad de que algunas de las especies eventualmente puedan establecerse y tener una reproducción exitosa, estableciendo una población en su nuevo hábitat (Thiel y Gutow, 2005). Un estudio anterior de fauna móvil de sargazo en el mismo sistema arrecifal durante otoño 2018, mostró variaciones considerables entre muestreos en abundancia y composición de la comunidad de fauna móvil, con seis nuevos registros para el Caribe mexicano (Monroy-Velázquez *et al.* 2019; de los siete registros reportados en este estudio se debe eliminar el pez *Stephanolepis hispidus*, indicado como nuevo registro erróneamente). Debido a la relevancia que tiene el sargazo como vehículo para la introducción de especies no nativas y a la escasez de estudios en Caribe mexicano que documenten la presencia de fauna móvil no nativa, el presente informe describe las comunidades asociadas al sargazo con énfasis especial a las especies que no fueron registradas anteriormente en el Caribe mexicano.

Objetivos

- Identificar la macrofauna móvil asociada a mantos de sargazo colectados en dos zonas durante seis periodos de muestro dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) en el Caribe mexicano.
- Determinar los diferentes índices propuestos en el protocolo
- Evaluar posibles variaciones espaciales (zona frontal y del arrecife posterior), y temporales en la composición y abundancia de macrofauna.

Hipótesis

- Se revelarán especies de nuevo registro asociadas a los mantos de sargazo
- La macrofauna asociada al sargazo muestra variaciones espaciales y temporales en su composición

II. METODOS

II.1 Trabajo en el mar

Se realizaron colectas en dos sitios siendo arrecife frontal (F) a una distancia entre 2.5 a 4.1 km de la costa, y arrecife posterior (P) entre 0.1 y 2.0 km de la costa en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM, Fig. 1). Con una embarcación menor se localizaron tres mantos de sargazo en cada zona, con una distancia mayor a 100m entre ellos. Se registraron las coordenadas GPS del manto de sargazo, la fecha y hora, las condiciones meteorológicas, el tamaño estimado del manto; además de algunas características del manto tales como el tipo de aglomeración (hilera, grupos pequeños, o parche grande) su densidad (manto denso y continuo y grueso cuando menos en el centro, o disperso cuando a veces la superficie del mar dentro el manto es visible), y el estado de sargazo (fresco o parcialmente en descomposición). Utilizando una red de inmersión de $\approx .25\text{m}^2$ de abertura de boca y luz de malla de 500 μm . El contenido de la red se depositó inmediatamente en bolsas de polietileno rotuladas previamente llenadas con agua del mar para evitar la desecación de la muestra. Las muestras se transportaron al laboratorio en una hielera para su procesamiento. Los muestreos se llevaron a cabo el 30 de junio de 2020 (2020-1), y en 2021 se realizaron el 21 de abril (2021-1), 18 de mayo (2021-2), 01 de junio (2021-3), 11 de junio (2021-4), 24 de junio (2021-5) y 02 de julio (2021-6).

II.2 Trabajo de laboratorio

Para extraer la fauna móvil, se colocaron las muestras en palanganas con agua dulce que se sacudieron de forma vigorosa para desprender la fauna móvil retenida entre las frondas de sargazo. El contenido de la palangana se decantó a través de una malla de 0.5 mm, y los organismos retenidos se transfirieron a frascos de vidrio con etanol al 70%, previamente rotulados. Adicionalmente se inspeccionó de forma cuidadosa el sargazo para recuperar algún organismo retenido en sus frondas (p.ej., en el caso de los poliquetos). Con un microscopio estereoscópico, se identificó la macrofauna móvil empleando claves especializadas: para moluscos la de Castillo-Rodríguez (2014), para poliquetos la de De León-González *et al.* (2009), para crustáceos decápodos las de Chace (1972) y Williams (1984), para anfípodos la de Winfield *et al.* (2007), para isópodos la de Kensley y Schotte (1989) y para peces la de Froese y Pauliy (2011), y cuantificada. Para cada muestra, se determinó el peso húmedo de todos organismos por taxón, empleando una báscula analítica digital de precisión 0.0001 g Ohaus Explorer.

Posteriormente, las frondas de sargazo en cada muestra se dejaron escurrir y se separaron por especie y morfotipo. Se colocaron sobre papel absorbente para eliminar el exceso de humedad, y se pesaron en una balanza de precisión de 0.1g Ohaus Scout Pro.

II.3 Análisis de datos

Se calcularon lo siguientes índices:

II.3.1 Sargazo (por muestreo)

1. La superficie estimada de los mantos (promedio, indicando N y SE)
2. El peso relativo (% del peso total) de cada especie/morfotipos de sargazo (promedio, indicando N y SE)

II.3.2. Fauna Móvil

Por muestreo:

1. Número de especies/taxones (S): sumando las especies/taxones en todas las muestras
2. Número de registros nuevos; i.e., especies/taxones de nuevo registro para la localidad (o su área biogeográfica)

Por taxón:

3. Frecuencia (F): Número de muestras en que se registró la especie o taxón
4. Densidad (D): Número de organismos por kg húmedo de sargaso (promedio y SE) por especie (taxón)
5. Biomasa (B): Peso húmedo (o volumen) por kg húmedo de sargaso (promedio y SE) por especie (taxón)
6. Dominancia (Dom): Peso húmedo (o volumen) por kg húmedo de sargaso, SOLO considerando las muestras en las cuales la especie/taxón está presente
7. Índice de Valor de Importancia (IVI) por especie (o taxón):

$$IVI = \text{Densidad Relativa} + \text{Frecuencia Relativa} + \text{Dominancia Relativa}$$

La Frecuencia Relativa, Densidad Relativa y Dominancia Relativa (en porcentajes) se calcula dividiendo el valor de este variable para la especie (o taxón) por la suma de valores de este variable de todas las especies/taxones, multiplicando por 100:

$$\text{i.e., Frecuencia Relativa} = [F \text{ de Taxón A} / \text{Suma de F de taxones A a X}] * 100.$$

El valor máximo de cada variable relativo es igual a 100. Por lo tanto, el valor máximo de IVI, o la suma de IVI de todos los taxones en una muestra, es igual a 300.

II.3.3. Análisis estadísticos

Se verificó por posibles diferencias en densidad de la fauna móvil entre las dos zonas y los muestreos (en diferentes tiempos) mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Así

también se realizó una clasificación de los ensambles (utilizando una matriz de disimilitud de Bray-Curtis) en función del muestreo, con las siete especies más comunes. Todos los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2020, Versión 1.3.1093) utilizando los siguientes paquetes: ggplot2 (Wickham 2009), plyr (Wickham, 2014), gplots (Warnes *et al.* 2009), vegan (Oksanen *et al.* (2017), R ColorBrewer (Neuwirth, 2011) y ggpubr (Kassambara y Kassambara, 2020).

III. RESULTADOS

III.1 Especies y morfotipos de *Sargassum*

Entre junio de 2020 y julio de 2021, se colectaron un total de 42 muestras en siete muestreos (N=6 por muestreo). La superficie promedio estimada de los mantos fue 16.5m² (entre 1.7 y 32.5m², Tabla 1). Del total de las muestras, *Sargassum fluitans* III fue la especie dominante (69.5%), seguida por *S. natans* I (20.4%). *S. natans* VIII presentó el más bajo peso relativo (10.1%; Tabla 1, Fig. 2), aunque en el muestreo 2021-1 fue dominante con un peso relativo de 78.2%.

III.2 Fauna móvil

III.2.1. Riqueza específica y abundancia

Se registró un total de 16,442 individuos, distribuidos en 35 taxones en nueve filos (Fig. 3). De estos, se identificaron 16,256 organismos a nivel especie, 10 a género y 176 a niveles superiores (Anexo 1). Únicamente los filos Nematoda (gusanos redondos) y Nemertea (gusanos cintiformes) no se identificaron a nivel más bajo. Los nemátodos son organismos muy pequeños y no fue posible la disección de estructuras como partes bucales, etc. necesaria para su identificación. Los nemertinos son muy frágiles, y tienden a fragmentarse una vez

fijados, lo que dificulta su identificación. El filo mejor representado fue Arthropoda por su número de taxones (17), con una densidad media de 59.9 ind./kg de sargazo, mientras que el filo Annelida, con tres taxones, registró una densidad media de 74 ind./kg de sargazo. Además de la fauna típica del sargazo, se registraron algunas especies pelágicas como el cnidario sifonóforo (familia Diphyidae) y el insecto *Halobates micans*. También se observaron algunas larvas de mosquitos quironómidos y un adulto del género *Sciara* (Diptera). Respecto a los peces (filo Chordata), se identificaron tres especies, *Histrio histrio*, *Stephanolepis hispidus* y *Abudefdux saxatilis*, este último habitante del arrecife coralino, todos en fase juvenil.

La riqueza específica entre las zonas Frontal y Posterior fue similar, registrando 27 y 31 taxones, respectivamente. La densidad de la fauna fue generalmente similar entre las zonas de muestreo, aunque se registraron diferencias significativas entre Frontal y Posterior en la densidad de *Latreutes fucorum* (Tabla 4). Se registraron diferencias significativas entre muestreos en densidad (Fig. 3, Tabla 1 y 4), con el muestreo 2021-2 registrando la densidad más elevada por tener una elevada densidad de *Carpas minutus* (Fig. 6).

La clasificación de los ensambles aplicada a todos los taxones, y en la Figura 4 se presenta los ensambles con las 7 especies más comunes, separando el muestreo 2021-2 de los demás (Fig. 4); en este muestreo cuando se registró una densidad alta de *C. minutus*.

III.2.2. Especies dominantes

Los índices por taxón (de los siete muestreos en conjunto) se presentan en Tabla 3. De los 35 taxones, tres especies fueron dominantes: el isópodo *Carpas minutus*, contribuyó con el 48.6%, con una abundancia media de 236.8 ind./kg, el camarón del sargazo *Latreutes fucorum* con abundancia media de 132.5 ind./kg de sargazo, y el anélido *Platynereis dumerilii* una abundancia media de 116.1 ind./kg. Estas tres especies contribuyeron con el 85.8% del total

de individuos y además registraron Índices de Valores de Importancia (IVI) más altos (entre 29.4 y 80.5, Tabla 3). Especies menos abundantes, pero más grandes tales como el pez *Stephanolepis hispidus* y el cangrejo *Portunus sayi*, también alcanzaron valores de IVI considerables, de 23.3 y 18.7 respectivamente (Tabla 3).

III.2.3. Nuevos registros

A la fecha se tiene un total de 14 nuevos registros dentro del PNAPM asociados a sargazo. En el estudio de Monroy Velázquez *et al.* (2019) reportaron por primera vez a los crustáceos *Sunamphitoe pelagica*, *Idotea metallica*, a los moluscos *Litiopa melanostoma* y *Scyllaea pelágica*, al gusano plano *Gnesioceros sargassicola* y a los peces *Syngnathus pelagicus*. En este estudio, erróneamente se reportó a *Stephanolepis hispidus*, como primer registro; sin embargo, esta especie ya estaba reportada bajo la sinonimia de *Monacanthus hispidus* (INE, 2000). Para el presente estudio, se reportan por primera vez a *Carpas minutus*, *Zeuxo exsargasso* (Arthropoda), *Doto pygmaea*, *Corambe oscura*, *Spurilla sargassicola* (Mollusca), *Acerotisa notulata*, *Chatziplana grubei* (Platyhelminthes) y *Heterochaerus sargassissi* (Xenacoelomorpha) (Anexo 2). De estas, *C. minutus* alcanzó densidades considerables (media de 236.8 ind./kg húmedo de sargazo), mientras las otras tuvieron densidades más bajas con medias entre 1.4 y 15.1 ind./kg (Anexo 1). Todas estas especies son de alto riesgo de invasión; principalmente porque su introducción por los mantos de sargazo es recurrente, y porque se desconoce su impacto al ecosistema y a la biodiversidad (Anexo 3).

IV. DISCUSIÓN

El sargazo colectado dentro del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos (PNAPM), a lo largo de siete muestreos (efectuados entre junio de 2020 y julio de 2021), generalmente estuvo dominado por *Sargassum fluitans* III (67.3%), acompañado por *S. natans* I (21.1%), y *S. natans* VIII (11%); excepto en el muestreo 2021-1 (abril), cuando *S. natans* VI fue la especie dominante. Hasta la fecha, no se entiende las causas de los cambios proporcionales en las especies y morfotipos de sargazo, pero otros autores también habían registrado una general de dominancia de *S. natans* VIII en los primeros arribazones del año (García Sánchez *et al.*, 2019).

Hay cierta controversia si especies de fauna móvil están asociadas típicamente una especie/morfotipo de sargazo en particular. De acuerdo con Martin *et al.* (2021), *S. fluitans* III sostuvo un ensamble más diverso y abundante que *S. natans* I y *S. natans* VIII; por ejemplo, registraron mayores abundancias del molusco *Litiopa melanostoma* y del anfípodo *Sunamphitoe pelagica* en *S. fluitans* III. Estos autores también reportaron al nudibranquio *Doto pygmaea* únicamente en *S. natans* I. Sin embargo, Stoner y Greening (1984) encontraron que las especies de sargazo tuvieron poca influencia en los ensambles de macrofauna, excepto en el caso de *L. melanostoma* que fue significativamente más abundante en *S. natans* I, que contrasta con los hallazgos de Martin *et al.* (2020). En el presente estudio, la composición específica de la macrofauna móvil en los mantos dominados por *Sargassum natans* VIII (muestreo 2020-1) fue muy similar a aquella colectada en mantos con dominancia de *S. fluitans* III.

La mayor parte de las especies asociadas al sargazo imitan el color marrón dorado de su hábitat como una estrategia para evitar la depredación (Hacker y Madin, 1991; ver también Anexo 2). Por ejemplo, el camuflaje de *Latreutes fucorum* y *Leander tenuicornis* les confiere cierta protección ante sus principales depredadores; no obstante, constituyen una importante

fuelle de alimento para más de 100 especies de peces asociados al sargazo (Dooley, 1972; Coston-Clements *et al.* 1991). La macrofauna móvil asociada a sargazo estuvo representada por 35 taxa, distribuidos en nueve filos, similar a la registrada por Monroy-Velázquez, *et al.* (2019) en la misma área de estudio, (33 taxa). Las especies de macrofauna móvil que se registraron en Puerto Morelos son habitantes comunes del sargazo (Butler, 1983; Stoner y Greening, 1984; Monroy-Velázquez *et al.* 2019; Martin, 2021). Los individuos pertenecientes a *Platynereis dumerilii* se encontraron en fases juveniles (de nado libre). *Latreutes fucorum* es una especie adaptada a ambientes de vegetación sumergida, donde son extremadamente abundantes (Briones-Fourzán *et al.* 2020). Otros crustáceos, como *Leander tenuicornis* y *Portunus sayi* son también residentes comunes del sargazo, y al igual que *L. fucorum*, son especies generalistas ya que se pueden encontrar en más de un hábitat (Leber, 1985). Además, se observaron algunos invertebrados generalistas (ocurren también en hábitats de vegetación sumergida) tales los crustáceos *Hyallo* sp (Amphipoda) y *Periclimenaeus* sp (Decapoda). Se registraron también organismos pelágicos como *Halobates micans* (Insecta) y un miembro de la familia Diphyidae (Cnidaria), que probablemente quedaron retenidos entre los mantos de sargazo durante su transporte oceánico a la zona costera. Asimismo, se registraron pocos individuos de Chordata (peces). El pez del sargazo (*Histrio histrio*) y el pez lija *Stephanolepis hispidus* se encuentran comúnmente asociados al sargazo. El pez sargento rayado (*Abudefduf saxatilis*) en su fase adulta se encuentra en arrecifes coralinos.

Los filos Annelida y Arthropoda exhibieron las mayores densidades en todos los muestreos, con dominancia incidental de Mollusca en el muestreo 2020-1. Tres especies fueron dominantes en todos los muestreos: *Carpas minutus*, *Latreutes fucorum* y *Platynereis dumerilii*. El molusco *Litiopa melanostoma* fue dominante únicamente en el muestreo 2020-1. *Carpas minutus* exhibió fluctuaciones en sus valores de densidad media, y las altas densidades exhibidas por este crustáceo pueden indicar periodos de intensa reproducción y

reclutamiento, un rasgo común en los peracáridos (Cardoso y Veloso, 1996; Gamito y Marques, 2003). *Latreutes fucorum*, la especie más abundante y dominante, tuvo una densidad menor en la zona Posterior, lo cual posiblemente se puede atribuir a una fragmentación de los mantos de sargazo a causa del viento y el oleaje, conforme se acercan a la costa. El sargazo como hábitat es único, en el sentido de que el tamaño de los mantos y la complejidad estructural cambian debido a factores ambientales (vientos, corrientes) conforme éstos se hacen más pequeños a medida que se acercan a las zonas costeras, lo que obliga a los invertebrados móviles a abandonar a los mantos e ir en búsqueda de otros hábitats disponibles o perecer. Sin embargo, no encontramos una disminución en densidad en los otros taxones de fauna móvil. Un filo con baja densidad de organismos fue Chordata, con tres especies en fase juvenil; sin embargo, el Índice de Valor de Importancia es moderada o alta por tratarse de especies incidentales de tamaño más grande. La especie *Stephanolepis hispidus* se registró cinco veces., pero tiene una alta IVI por su dominancia (Tabla 3). Estos peces tienen una asociación transitoria con el sargazo, ya que las fases adultas son bénticas y análisis de contenido estomacal los refiere como organismos con una plasticidad de hábitos alimenticios, propia de oportunistas (Dubiaski-Silva y Setuko Masunari, 2008).

La composición y la densidad de la macrofauna cambió entre muestreos, consistente con lo reportado por Monroy-Velázquez et al. (2019). Las variaciones en la composición y abundancia de especies de macrofauna asociada al sargazo pueden estar relacionadas a procesos aleatorios de colonización, crecimiento y mortalidad poblacional en los mantos de sargazo en movimiento (Dooley, 1972; Conolly, 2004). Además, podrá ser moderada por la presencia de epibiontes (Stoner y Greening, 1984), que incrementan la complejidad del hábitat y proporcionan un refugio muy adecuado a organismos de pequeña talla, como anfípodos, isópodos y copépodos (Olafsson e Ingolfsson, 1998).

Monroy-Velázquez *et al.* (2019) reportaron seis nuevos registros: el isópodo *Idotea metallica*, el anfípodo *Sunamphitoe pelagica*, el platelminto *Gnesioceros sargassicola*, los moluscos *Litiopa melanostoma* y *Scyllaea pelagica* y el pez *Syngnathus pelagicus*. El presente estudio añadió ocho especies de nuevo registro para el Caribe mexicano: *Carpinus minutus*, *Zeuxo exsargasso* (Arthropoda), *Corambe oscura*, *Doto pygmaea*, *Spurilla sargassicola* (Mollusca), *Acerotisa notulata*, *Chatziplana grubei* (Platyhelminthes) y *Heterochaerus sargassissi* (Xenacoelomorpha) (Apéndices 2 y 3), resultando en un total de 14 nuevos registros para el Caribe mexicano. De acuerdo al Método de Evaluación Rápida de invasividad (MERI) todas las especies de nuevo registro poseen una categoría de riesgo alto de invasión (Anexo 3). Este alto riesgo de invasión principalmente se basa en dos ejes: 1. La alta probabilidad de su introducción porque las afluencias de sargazo son masivas y recurrentes, 2. Nuestro desconocimiento de la biología de estas especies, y por esto nuestra ignorancia respecto su potencial impacto al ecosistema y a la biodiversidad. Por ello es muy importante la documentación de especies no nativas, además de estudiar aspectos sobre su biología e interacciones ecológicas, tales como su papel en las cadenas tróficas, la selección del hábitat (Martínez-Laiz, *et al.* 2018). Se desconoce si estas especies, una vez que arriban a la zona costera tengan la capacidad de sobrevivir y colonizar otros hábitats, por lo que urgen estudios sistemáticos de fauna de bentos en sistemas costeros para detectar una posible propagación secundaria y su potencial establecimiento. Las especies potencialmente invasoras, particularmente aquellas de pequeña talla, tal como *Carpinus minutus* (que además pertenece a la familia Janiridae con especies invasoras), pueden pasar desapercibidas durante muchos años incluso aún si representan una amenaza para las especies nativas (Carlton, 2011) o hasta que el proceso de invasión se encuentra en una etapa avanzada (Marcini *et al.* 2016). Además, ciertas especies no nativas pueden permanecer durante décadas, exhibiendo bajas abundancias y repentinamente multiplicarse y ejercer un impacto negativo sobre las especies

locales. Ese lapso de tiempo es fundamental para la implementación de estrategias preventivas, esto es, desde un principio asumir que cualquier especie no nativa posee el potencial, a largo plazo, de volverse invasora (Crooks, 2005). Bajo este escenario, se recomienda monitorear todas las especies de nuevo registro.

CONCLUSIONES

La fauna móvil asociada a los mantos de sargazo es abundante y diverso, con una dominancia de pocas especies: el camarón de sargazo *Latreutes fucorum*, el poliqueto *Platynereis dumerilli*, el isópodo *Carpinus minutus*, y a veces el caracol de sargazo *Litiopa melnostoma*. Las 14 especies de nuevo registro de fauna móvil asociado al sargazo, poseen una categoría de riesgo alto de invasión, por lo que es urgente estudiar estas especies de manera inmediata.

V. REFERENCIAS

- Bauer RT (1985) Diel and seasonal variation in species composition and abundance of caridean shrimps (Crustacea, Decapoda) from seagrass meadows on the north coast of Puerto Rico. *Bulletin of Marine Science* 36: 150-162.
- Bennice CO, Brooks W (2016) Habitat Selection Among Fishes and Shrimp in the Pelagic *Sargassum* Community: The Role of Habitat Architecture. *Gulf of Mexico Science* 33: 1- 13
- Bolton DK, Clark GF, Johnston EL (2019) Novel in situ predator exclusion method reveals the relative effects of macro and mesopredators on sessile invertebrates in the field. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 513: 13–20
- Bracewell SA, Clark GF, Johnston EL (2018) Habitat complexity effects on diversity and abundance differ with latitude: an experimental study over 20 degrees. *Ecology* 99: 1964-1974
- Butler JN, Morris BF, Cadwallader J, Stoner AW (1983) Studies of *Sargassum* and the *Sargassum* community. Bermuda Biological Station, special publication no. 22.
- Cardoso RV, Veloso VG (1996) Population biology and secondary production of the sandhopper *Pseudorchestoidea brasiliensis* (Amphipoda: Talitridae) at Prainha Beach, Brazil. *Marine Ecology Progress Series* 142: 111-119
- Carlton JT (2011) The global dispersal of marine and estuarine crustaceans. in: Galil, B.S. *et al.* (Ed.) *In the wrong place - alien marine crustaceans: distribution, biology and impacts invading nature*. Springer, Dordrecht, Netherlands, p 3-23
- Castillo-Rodríguez ZG (2014) Biodiversidad de moluscos marinos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85, S1: 419-430
- Chace Jr FA (1972) The shrimps of the Smithsonian-Bredin Caribbean Expeditions with a summary of the West Indian shallow-water species (Crustacea: Decapoda: Natantia).

- Smithsonian Contribution to Zoology 98:1–179 CONABIO (2015) Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México. México DF
- Coston-Clements L, Settle LR, Hoss DE, Cross FA (1991) Utilization of the *Sargassum* habitat by marine invertebrates and vertebrates. A review. NOAA Technical Memorandum. NMFS SEFSC 296. 30 pp
- Crooks JA (2005) Lag times and exotic species: the ecology and management of biological invasions in slow-motion. *Ecoscience* 12: 316-329
- De León González JA (2002) Poliquetos litorales de la región norte y centro del estado de Veracruz. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. S035. México DF
- Dooley JK (1972) Fishes associated with the pelagic *Sargassum* complex, with a discussion of the *Sargassum* community. *Marine Science* 16: 1-32
- Dubiaski-Silva J, Masunari S (2008) Natural diet of fish and crabs associated with the phytal community of *Sargassum cymosum* C. Agardh, 1820 (Phaeophyta, Fucales) at Ponta das Garoupas, Bombinhas, Santa Catarina State Brazil, *Journal of Natural History*, 42:27-28
- Frahm JL, Brook WR (2021) The use of chemical cues by *Sargassum* shrimps *Latreutes fucorum* and *Leander tenuicornis* in establishing and maintaining a symbiosis with the host *sargassum* algae. *Diversity* 13: 305
- Franks JS, Johnson DR, Ko DS (2016) Pelagic *Sargassum* in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research* 27 (1): SC6-SC11. DO I: 10 .18785/gcr.2701.0 8
- Froese R, Pauly D (2011) Fish base. World Wide Web electronic publication. <http://www.fishbase.org>

- Gamito CS, Marques JC (2003) Spatial distribution of peracarids in the intertidal zone of the Ria Formosa (Portugal). *Crustaceana* 76: 411-431
- Golubov J, Mandujano MC, Guerrero-Eloisa S, Mendoza R, Koleff P, González AI, Barrios Y, Born-Schmidt G (2014) Análisis multicriterio para ponderar el riesgo de las especies invasoras, en R. Mendoza y P. Koleff. *Especies acuáticas invasoras en México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 123-133
- Hacker SD, Steneck RS (1990) Habitat architecture and the abundance and body-size-dependent habitat selection of a phytal amphipod. *Ecology* 71: 2269-2285
- Hacker S, Madin L (1991) Why habitat architecture and color are important to shrimps living in pelagic *Sargassum*: use of camouflage and plant-part mimicry. *Marine Ecology Progress Series* 70: 143-155
- Hobbs NV, Lazo-Wasem E, Faasse M, Cordell JR, Chapman JW, Smith CS, Prezant R, Shell R, Carlton JT (2015) Going global: the introduction of the Asian isopod *Ianiropsis serricaudis* Gurjanova (Crustacea: Peracarida) to North America and Europe. *Aquatic Invasions* 10:177-187
- INE (Instituto Nacional de Ecología y la comunidad de Puerto Morelos) (2000) Programa de manejo del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, México. SEMARNAT, México. 224pp
- Janiak, DS, Adams JN, Rubinoff B, Osman RW (2017) Predator-Prey Interactions of the Polyclad, *Euplana gracilis*, and the Amphipod, *Apocorophium lacustre*, in the Chesapeake Bay *Estuaries and Coasts* 40: 513-521
- Kassambara A, Kassambara MA (2020) Package ‘ggpubr’. *R package version 0.1*, 6.
- Kensley B, Schotte M (1989) Guide to the Marine Isopod Crustaceans of the Caribbean. Smithsonian Institution Press, Washington, DC. 308p

- Marchini A, Ferrario J, Occhipinti-Ambrogi A (2016) Confirming predictions: the invasive isopod *Ianiropsis serricaudis* Gurjanova, 1936 (Crustacea: Peracarida) is abundant in the lagoon of Venice (Italy) *Acta Adria* 57: 331-336
- McCoy E, Bell S (1991) Habitat structure: The evolution and diversification of a complex topic. London: Chapman and Hall. p 3-27
- Marchini A, Ferrario J, Occhipinti-Ambrogi A (2016) Confirming predictions: the invasive isopod *Ianiropsis serricaudis* Gurjanova, 1936 (Crustacea: Peracarida) is abundant in the lagoon of Venice (Italy). *Acta Adria* 57: 331-336
- Markham JC, Donath-Hernández FE, Villalobos-Hiriart JL, Cantú Díaz-Barriga A (1990) Notes on the shallow-water marine crustacean of the Caribbean coast of Quintana Roo, México. *Anales del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Zoología*. 61: 405–44
- Martin LM, Taylor M, Huston G, Goodwin DS, Schell JM, Siuda AN (2021) Pelagic *Sargassum* morphotypes support different rafting motile epifauna communities. *Marine Biology* 168: 115
- Martínez-Laiz G, Ros M, Guerra-García JM (2018) Marine exotic isopods from the Iberian Peninsula and nearby waters. *PeerJ* 6: e4408
- Monroy-Velázquez LV, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Aguiar T, Solís-Weiss V, Briones-Fourzán P (2019) Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon. *Journal of Environmental Management* 252: 109650
- Morris BF, Mogelberg DD (1973) Identification manual to the pelagic *Sargassum* fauna. Bermuda Biological Station Special Publications 11: 1–63
- Mukai H (1971) The phytal animals on the thalli of *Sargassum serratifolium* in the *Sargassum* region, with reference to their seasonal fluctuations. *Marine Biology* 8:170–182

- Newman L J, Cannon LR (1993) *Stylochus (Imogene) matatasi* n. sp. (Platyhelminthes, Polycladida): pest of culture clams and pearl oysters from Solomon Islands. *Hidrobiologia* 257: 185-189
- Neuwirth E (2011) R package. Version 1.0-5. <http://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer>
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlinn D, Minchin PR, O'Hara, RE, Simpson GL, Solymos P, Stevens MH, Szoecs E y Wagner H (2017) Vegan: community ecology package. <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Ortiz M, Winfield I, Cházaro Olvera S, Lozano Aburto M (2020) Distribución de los isópodos (Crustacea: Peracarida: Isopoda) del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos, Quintana Roo, México, con dos nuevos registros para el mar Caribe. *Novitates Caribaeae* 16:133–142
- Sakai AK, Allendorf FW, Holt JS, Lodge DM, Molofsky J, With KA, Weller SG (2001) The population biology of invasive species. *Annual review of ecology and systematics* 32: 305-332
- Stoner AW, Greening HS (1984) Geographic variation in the macrofaunal associates of pelagic *Sargassum* and some biogeographic implications. *Marine Ecology Progress Series* 20: 185-192
- Thiel M, Gutow L (2005) The ecology of rafting in the marine environment. II. The rafting organisms and community. *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 43: 279–418
- Van Tussenbroek BI, Monroy-Velazquez LV, Solis-Weiss V (2012) Meso-fauna foraging on seagrass pollen may serve in marine zoophilous pollination. *Marine Ecology Progress Series* 469: 1–6

Warnes GR, Bolker B, Bonebakker L, Gentleman R, Huber W, Liaw A, Lumley T, Maechler M, y Magnusson A (2009) R package. version 2.12.1. <http://CRANR-project.org/package=gplots>.

Wells RJ, Rooker JR (2004) Spatial and temporal patterns of habitat use by fishes associated with Sargassum mats in the northwestern Gulf of Mexico Bulletin of Marine Science 74: 81–99

West LE (2012) Habitat location and selection by sargassum crab *Portunis sayi*: the role of sensory cues. Master Thesis. Florida Atlantic University Boca Raton, Florida. 55 pp

Williams AB (1984) Shrimps, lobsters, and crabs of the Atlantic coast of the Eastern United States, Maine to Florida. Smithsonian Institution Press, Washington, DC. 550 pp

Winfield I, Escobar-Briones E, Álvarez F (2007) Clave para la identificación de los anfípodos bentónicos del Golfo de México y el sector norte del Mar Caribe. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM – CONABIO, México, ISBN 970-32-4345-2. 197 pp

FIGURAS

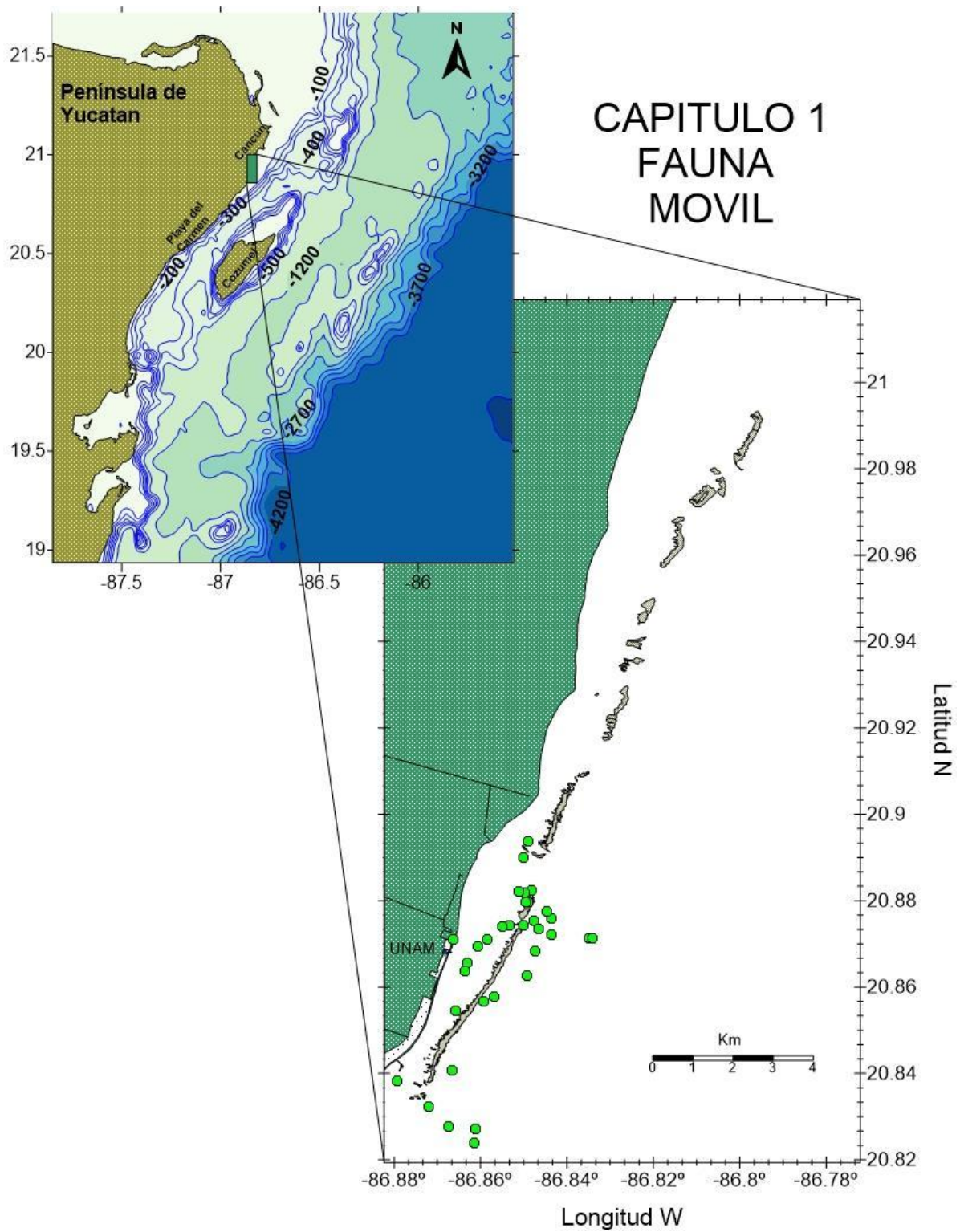


Fig. 1. Mapa de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), indicando los puntos de muestreo del estudio de la fauna móvil asociado a los mantos de sargazo.

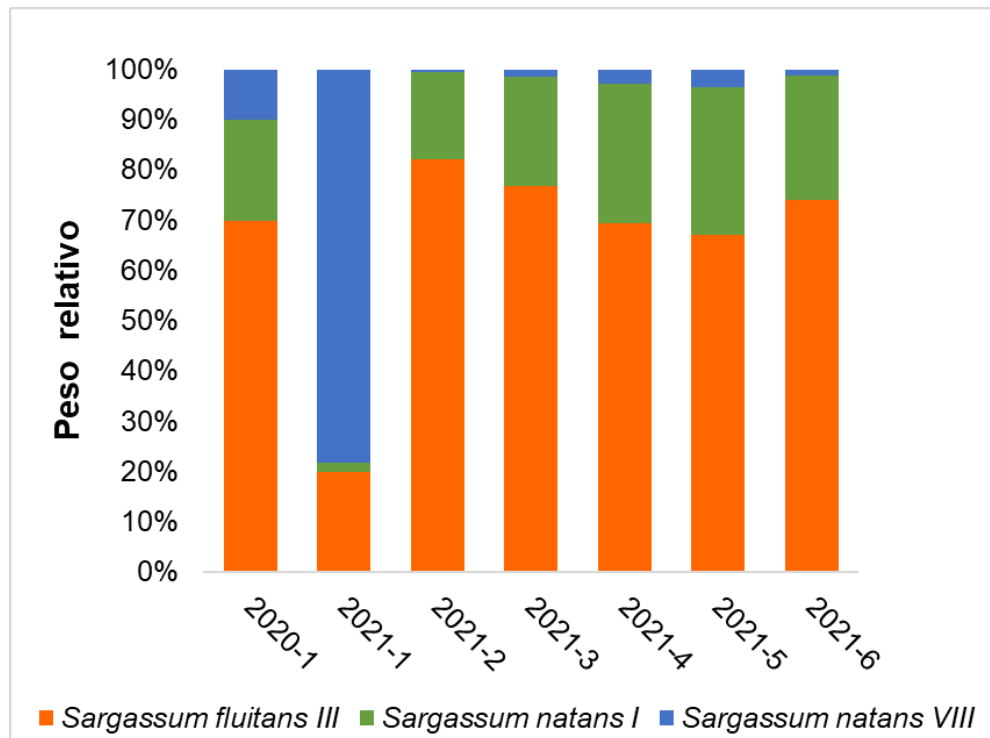


Fig. 2. Peso relativo de las especies y morfotipos de *Sargassum* por muestreo en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos.

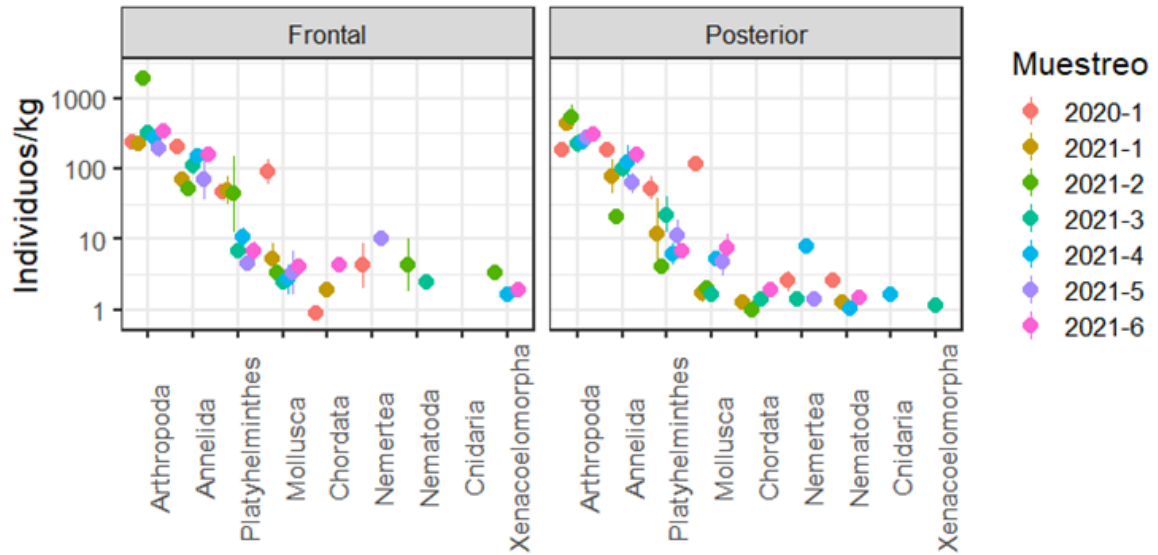


Fig. 3. Densidad media (\pm SE, N=6) de la fauna móvil (por filo) en sargazo, por zona y por muestreo.

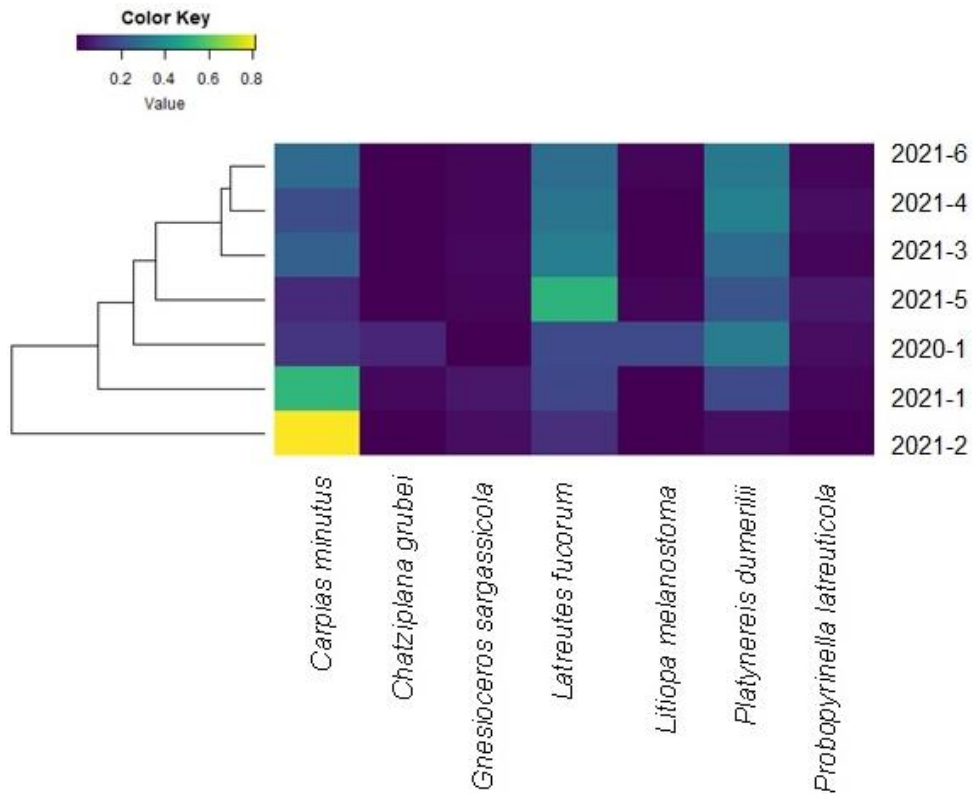


Fig. 4. Mapa de calor indicando la abundancia relativa de las especies más comunes por periodo de muestreo. La escala de color muestra los valores relativos de cada especie.

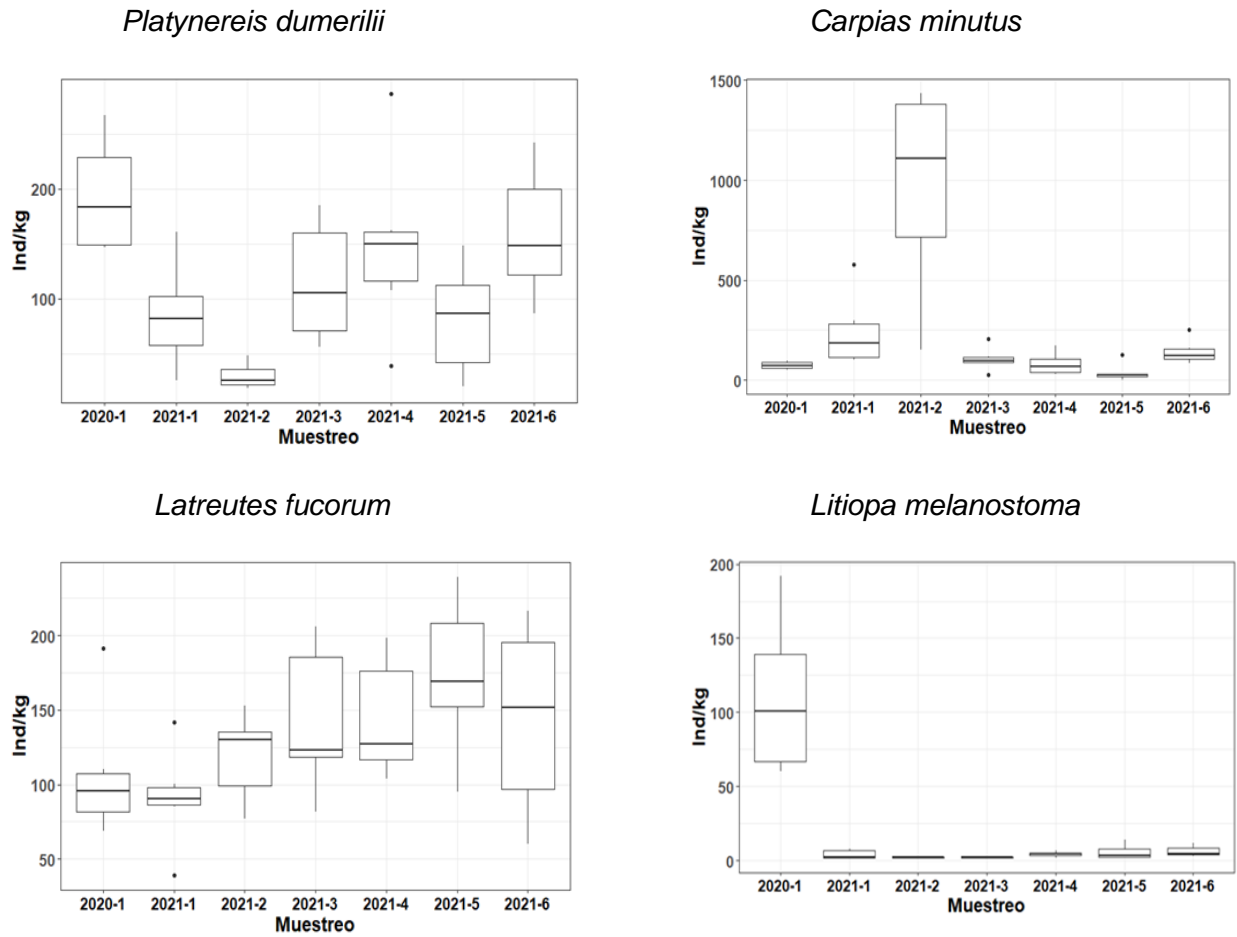


Fig. 6. Densidad de las tres especies dominantes registradas en todos los muestreos. La línea horizontal representa la mediana, la caja, los cuartiles (25% y 75%), las barras el rango de los datos y los puntos valores atípicos (outliers). Nota: Los ejes Y de las graficas no tienen la misma escala.

Tabla 1. Índices de sargazo (*Sargassum* spp.), y el peso promedio de cada muestra por muestreo.

Se presenta promedio y error estándar, N =6.

Muestreo	Tamaño del manto (m ²)	Peso Relativo			Peso de muestra (g húmedo)
		<i>S. fluitans</i> III (%)	<i>S. natans</i> I (%)	<i>S. natans</i> VIII (%)	
2020-1	N/A	83.8 (17.6)	15.6 (1.9)	0.6 (0.1)	752.8(82.1)
2021-1	5.2 (1.1)	17.8 (6.0)	1.4 (0.8)	80.7 (6.5)	545.4 (92.2)
2021-2	32.5 (2.5)	82.7 (3.2)	16.6 (3.1)	0.7 (0.1)	833.3 (134.6)
2021-3	25.0 (1.8)	76.7 (2.4)	21.8 (2.2)	1.5 (0.4)	791.8 (44.5)
2021-4	7.7 (1.8)	69.5 (1.3)	27.7 (1.2)	2.8 (0.5)	690.1 (55.7)
2021-5	27.2 (7.8)	68.8 (3.2)	28.2 (2.5)	3.0 (1.0)	712.5 (88.8)
2021-6	1.7 (0.3)	73.9 (3.8)	24.7 (3.6)	1.4 (0.5)	693.3 (46.2)

Tabla 2. Índices de fauna móvil por muestreo. En la columna de Número de registros nuevos, indica el total de nuevos registros asociados al sargazo (incluyendo los mencionados en Monroy-Velázquez et al. 2019); en los paréntesis cuadrados, se incluye el número de nuevos registros de este estudio. Además, se incluye el promedio de densidad y biomasa total (SE), N=7.

Muestreo	Número de especies	Número de registros nuevos	Densidad total	Biomasa total
	(S)	(N)	(Ind./kg húmedo sargazo)	kg húmedo/kg húmedo de sargazo
2020-1	22	14 [7]	581.8(44.6)	0.23 (0.06)
2021-1	18	14 [5]	478.2 (81.2)	0.25 (0.07)
2021-2	17	14 [6]	1437.9 (462.6)	0.29 (0.08)
2021-3	18	14 [5]	415.9 (52.8)	0.29 (0.09)
2021-4	20	14 [6]	433.1 (54.4)	0.26 (0.08)
2021-5	17	14 [5]	342.1 (59.1)	0.34 (0.11)
2021-6	21	14 [9]	504.4 (45.5)	0.28 (0.09)

Tabla 3. Índices por taxón. F: Frecuencia, D: Densidad (ind./kg húmedo sargazo), B: Biomasa (mg húmedo), Dom: Dominancia (mg húmedo), IVI: Índice de Valor de Importancia. Nota: nuevos registros en Monroy-Velázquez *et al.* (2019) indicados con *, detectados en el presente estudio **.

Taxón	F	D	B	Dom	IVI
ANNELIDA					
Annelido	0.21	0.01	1.2	60	0.3
<i>Platynereis dumerilii</i>	8.88	20.51	4927.4	6000	29.4
Syllidae	5.29	0.65	143.5	190	6.1
ARTHROPODA					
<i>Anoplodactylus petiolatus</i>	1.27	0.07	0.3	0	1.3
<i>Biancolina brassicacephala</i>	7.19	1.23	26.7	20	8.4
Calanoida	0.21	0.01	0.1	0	0.2
<i>Carpías minutus</i>**	8.88	41.81	552.3	300	50.7
<i>Deutella incerta</i>	0.42	0.02	0.0	0	0.4
Diptera	0.42	0.05	0.1	0	0.5
<i>Halobates micans</i>	0.21	0.01	5.9	210	0.4
Harpacticoida	0.63	0.07	0.1	0	0.7
<i>Hyallo sp</i>	0.85	0.03	1.6	100	0.9
<i>Latreutes fucorum</i>	8.88	23.24	74660.9	48410	80.5
<i>Leander tenuicornis</i>	7.19	0.64	8783.6	6390	14.2
<i>Perclimnæus sp</i>	0.42	0.02	14.8	390	0.8
<i>Portunus sayi</i>	7.40	0.89	15547.7	10430	18.7
<i>Probopyrinella latreuticola</i>	7.40	1.89	109.5	80	9.4
<i>Sciara sp</i>	0.21	0.01	0.1	0	0.2
<i>Sunamphitoe pelagica</i> *	4.23	0.60	182.5	290	5.1
<i>Zeuxo exsargasso</i> **	1.48	0.18	0.0	30	1.7
CHORDATA					
<i>Abudefdux saxatilis</i>	0.42	0.01	2.4	3180	3.6
<i>Histrio histrio</i>	0.42	0.01	213.6	4530	5.0
<i>Stephanolepis hispidus</i>	0.85	0.03	380.2	22450	23.3
CNIDARIA					
Diphyidae	0.21	0.01	3003.2	40	0.3
MOLLUSCA					
<i>Corambe obscura</i> **	0.21	0.01	1.0	30	0.3
<i>Doto pygmaea</i> **	0.63	0.02	1.0	70	0.7
<i>Litiopa melanostoma</i> *	6.98	3.28	5.5	450	10.7
<i>Scyllaea pelagica</i> *	0.8	0.1	3507.9	2449	3.4
<i>Spurilla sargassicola</i> **	0.2	0.0	1427.6	0	0.2
NEMATODA					
Nematoda	1.5	0.1	0.7	6	1.6
NEMERTEA					
Nemertea	2.1	0.2	1.7	120	2.3

PLATYHELMINTHES

<i>Acerotisa notulata</i> **	0.6	0.0	23.9	0.091	0.7
------------------------------	-----	-----	------	-------	-----

<i>Chatziplana grubei</i> **	5.7	1.7	9.0	0.066	7.5
------------------------------	-----	-----	-----	-------	-----

<i>Gnesioceros sargassicola</i> *	6.8	2.6	799.2	0.034	9.4
-----------------------------------	-----	-----	-------	-------	-----

XENACOELOMORPHA

<i>Heterochaerus sargassi</i> **	0.8	0.0	43.6	0.005	0.9
----------------------------------	-----	-----	------	-------	-----

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis de la abundancia (ind./kg húmedo de sargazo) de las especies más abundantes por zona y por muestreo. Grados de libertad: 1* y 6**

Especie	Zona*		Muestreo**	
	χ^2	Valor de p	χ^2	Valor de p
<i>Platynereis dumerilii</i>	0.1520	0.6966	22.286	0.0010
<i>Carpas minutus</i>	0.1330	0.7153	26.171	0.0002
<i>Latreutes fucorum</i>	4.4121	0.0356	11.262	0.0806
<i>Estos se van</i> <i>Litiopa melanostoma</i>	0.0262	0.8712	18.483	0.0262

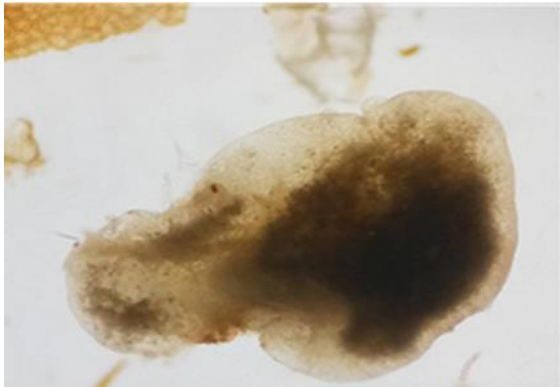
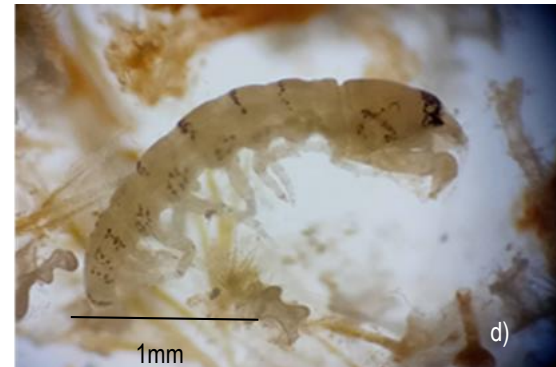
Anexo 1. Macrofauna asociada a sargazo dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos.

Los nuevos registros están señalados en negritas

No.	Taxón	2020-1	2021-1	2021-2	2021-3	2021-4	2021-5	2021-6	Total
	ANNELIDA								
1	Annelido	0	0	0	0	0	1	0	1
2	<i>Platynereis dumerilii</i>	877	280	133	550	660	320	684	3504
3	Syllidae	17	1	9	19	27	8	24	105
	ARTHROPODA								
4	<i>Anoplodactylus petiolatus</i>	0	0	1	0	4	1	4	10
5	<i>Biancolina brassicacephala</i>	5	14	15	54	46	20	51	205
6	Calanoida	0	1	0	0	0	0	0	1
7	<i>Carpías minutus</i>	338	833	3944	487	359	139	584	6684
8	<i>Deutella incerta</i>	0	2	0	0	0	0	0	2
9	Diptera	0	0	0	1	6	0	0	7
10	<i>Halobates micans</i>	0	0	0	0	0	0	1	1
11	Harpacticoida	9	1	0	0	0	0	0	10
12	<i>Hyallo sp</i>	0	0	0	0	3	1	1	5
13	<i>Latreutes fucorum</i>	480	278	532	675	579	772	603	3919
14	<i>Leander ternuicornis</i>	22	4	7	20	17	24	18	112
15	<i>Perclimenes sp</i>	0	3	0	0	0	0	0	3
16	<i>Portunus sayi</i>	27	2	32	28	20	20	21	150
17	<i>Probopyrinella latreuticola</i>	81	19	31	31	51	80	34	327
18	<i>Sciara sp</i>	1	0	0	0	0	0	0	1
19	<i>Sunamphitoe pelagica</i>	17	0	0	16	17	24	19	93
20	<i>Zeuxo exsargasso</i>	1	0	0	31	5	0	0	37
	CHORDATA								
21	<i>Abudefdux saxatilis</i>	0	0	0	1	0	0	1	2
22	<i>Histrio histrio</i>	0	0	2	0	0	0	0	2
23	<i>Stephanolepis hispidus</i>	1	2	0	0	0	0	3	6
	CNIDARIA								
24	Diphyidae	0	0	0	0	1	0	0	1
	MOLLUSCA								
25	<i>Corambe obscura</i>	0	0	0	0	0	0	1	1
26	<i>Doto pygmaea</i>	0	0	1	0	0	1	1	3
27	<i>Litiopa melanostoma</i>	476	8	7	5	12	23	25	556
28	<i>Scyllaea pelagica</i>	9	1	0	0	0	0	0	10
29	<i>Spurilla sargassicola</i>	1	0	0	0	0	0	0	1
	NEMATODA								
30	Nematoda	2	1	4	2	1	0	1	11
	NEMERTEA								

31	Nemertea	28	0	0	1	5	6	0	40
	PLATYHELMINTHES								
32	<i>Acerotisa notulata</i>	0	0	5	0	0	0	0	5
33	<i>Chatziplana grubei</i>	216	33	15	1	13	7	7	292
34	<i>Gnesioceros sargassicola</i>	22	80	126	38	23	18	24	331
	XENACOELOMORPHA								
35	<i>Heterochaerus sargassi</i>	0	0	1	1	1	0	1	4

Anexo 2 Nuevos registros de fauna móvil asociada a sargazo en el Parque nacional Arrecife de Puerto Morelos (Galería)



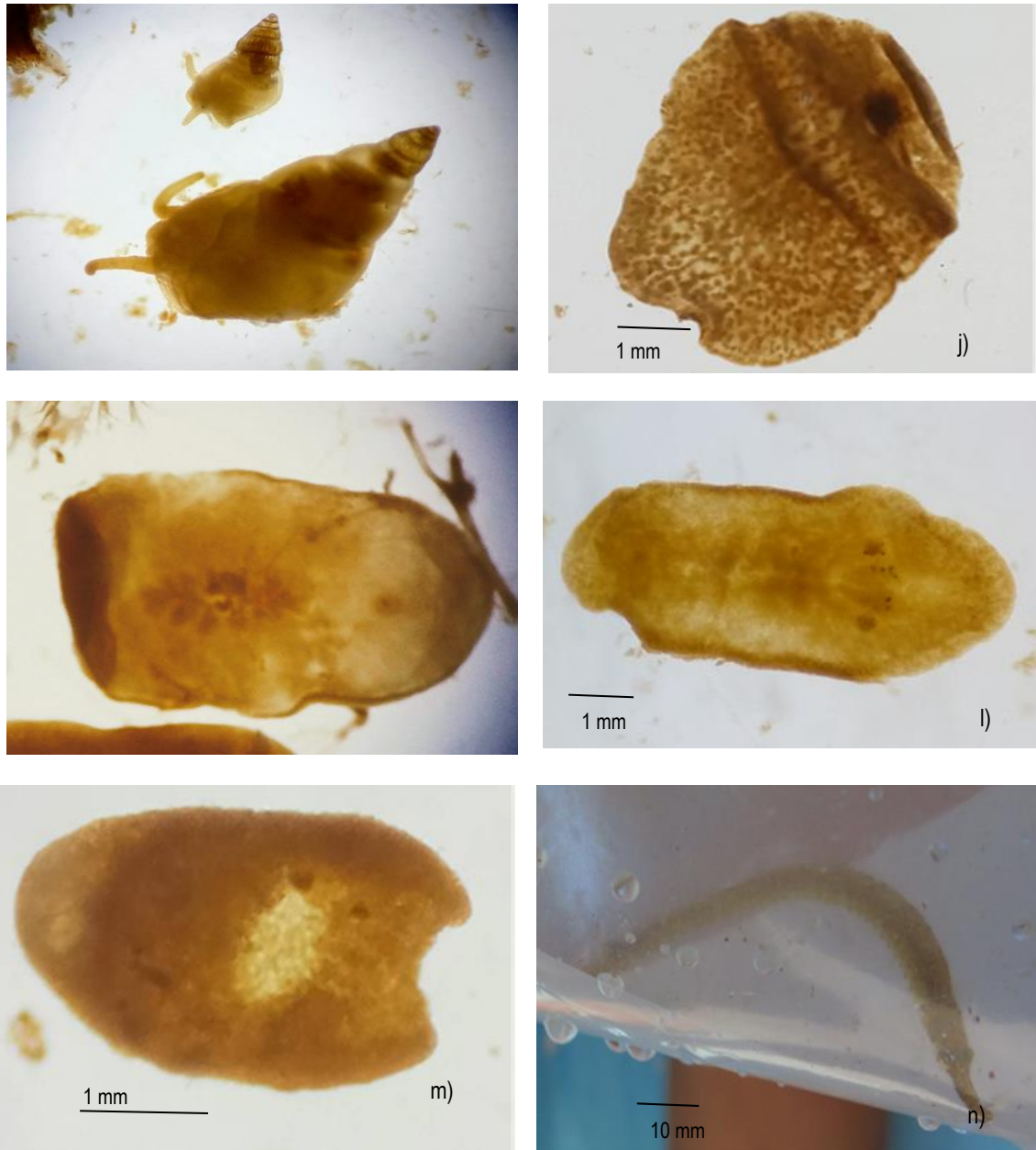


Fig. 1 a) *Carpías minutus*; b) *Idotea metallica* *; c) *Sunamphitoe pelagica**; d) *Zeuxo exsargasso***; e) *Corambe oscura***; f) *Doto pygmaea***; g) *Scyllaea pelagica**; h) *Spurilla sargassicola***; i) *Litiopa melanostoma**; j) *Acerotisa notunata***; k) *Chatziplana grubei***; l) *Gnesioceros sargassicola**; m) *Heterochaerus sargassissi***; n) *Sygnathus pelagicus**

Observaciones: * Nuevos registros en Monroy-Velázquez *et al.* (2019); ** para el presente estudio

Anexo 3. Análisis de MERI (Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) de las 14 especies de nuevo registro asociado al sargazo de este estudio y de Monroy-Valázquez et al. (2019). Valor: Muy Alto (MA=0.1), Alto (A=0.075), Medio (M=0.05), Bajo (B=0.025), Nulo (N=0) y Se Desconoce (SD=0.05). a. Considerando que las afluencias de sargazo son masivas y periódicas, el riesgo de introducción de todos los nuevos registros es muy alta independiente de la densidad de las especies, b. Desconocemos si las especies de nuevo registro se pueden establecer, c. Ninguno de los nuevos registros son de impacto sanitario, d. Es improbable que los nuevos registros tienen un impacto o económico o social por su tamaño reducido.

Especie	Preguntas de evaluación de invasividad										Valor	Categoría de riesgo
	1	2	3	4a.	5b.	6	7c.	8d.	9	10		
<i>Sunamphitoe pelagica</i>	N	M	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.375	Alto
<i>Carpas minutus</i>	N	M	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.375	Alto
<i>Idotea metallica</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Zeuxo exsargasso</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Corambe depressa</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Doto pygmaea</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Litiopa melanostoma</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Spurilla sargassicola</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Scyllaea pelagica</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Acerotisa notulata</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Chatziplana grubei</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Gnesioceros sargassicola</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Heterochaerus sargassi</i>	N	N	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.325	Alto
<i>Syngnathus pelagicus</i>	N	M	N	MA	SD	A	N	N	SD	SD	0.375	Alto

1. Reporte de invasora (existente)
2. Relación con taxones invasores cercanos
3. Vector de otras especies invasoras
4. Riesgo de introducción
5. Riesgo de establecimiento
6. Riesgo de dispersión
7. Impactos sanitarios
8. Impactos económicos y sociales
9. Impactos al ecosistema
10. Impactos a la biodiversidad

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 2

Epibiontes del sargazo

Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., van Tussenbroek, B. I.

Resumen

Se analizaron los ensambles de epibiontes (invertebrados sésiles) en talos de *Sargassum* spp (sargazo) a lo largo de seis muestreos realizados entre abril y julio de 2021 en la costa del Caribe mexicano. Empleando una red de cuchara se realizaron colectas en seis mantos de sargazo en dos zonas (arrecife Frontal y arrecife Posterior) del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Se registraron dos especies de hidrozoarios: *Clytia noliiformis*, que se encontró casi exclusivamente en talos de *Sargassum fluitans* III y *Aglaophenia latecarinata* en *S. natans* VIII. mientras que *S. natans* I tenía muy pocas colonias de *C. noliiformis*. Se determinaron dos especies de epífitas en *Sargassum natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans*: las Cyanobacteria, *Dichothrix penicillata* y *Rivularia atra*. Aunque estas dos especies no se habían registrado anteriormente como epífitas sobre sargazo, existen registros de estas especies sobre otros tipos de sustratos en la región. La baja riqueza de epibiontes asociados a sargazo fue constante a lo largo de todas las fechas de muestreo. Solo se observaron diferencias significativas entre la abundancia de las diferentes fechas de muestreo, y no con respecto a su posición en el arrecife ni entre las especies y morfotipos de sargazo.

I. INTRODUCCIÓN

Las masas flotantes y a la deriva de sargazo (*Sargassum fluitans* y *S. natans*) en el océano son ecosistemas ambulantes biodiversos que incluyen especies móviles y epibiontes (López *et al.* 2020). Todas las especies de *Sargassum*, sean bentónicas o pelágicas, ofrecen sustrato para los epibiontes, incluyendo algas epífitas (Phlips y Zeman, 1990) e invertebrados sésiles (Govindarajan *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019); y su presencia incrementa la complejidad estructural de las masas algales a la deriva (Jacobi y Langevin, 1966). Las especies epibiontes influyen en los ensambles de invertebrados móviles a través del aprovisionamiento de recursos y/o modificación del hábitat a nivel de microescala, incrementando su abundancia y diversidad (Gee y Warwick, 1994; Christie *et al.*, 2009), e incluso pueden influir en su selección de hábitat (Gee y Warwick, 1994; Chemello y Milazzo, 2004; Gestoso, *et al.*, 2012).

Los hidrozoarios y briozoarios son epifitos comunes de macro algas en general, incluyendo las del género *Sargassum* spp. y sus dos especies pelágicas (Niermann, 1986; Morris y Mogelberg, 1973; Cunha & Jacobucci, 2010). Aunque estos epibiontes podrán tener una influencia positiva al incrementar la complejidad del hábitat, estos epifitos afectan su hospedero de manera negativa al reducir su tasa fotosintéticas y flexibilidad del talo, incrementando la probabilidad de fragmentación (Niermann, 1986). Además, los hidrozoarios tienen nematocistos con sustancias urticantes, utilizados para capturar sus presas, y estos pueden producir urticaciones y lesiones dermales en los humanos al contacto (Segura Puertas y Van Tussenbroek 1998; Oliveira y Marques, 2011). Existen registros previos de hidrozoarios epibiontes del sargazo en la zona (Segura Puertas y Van Tussenbroek 1998; Fig. 2), y el antecedente más reciente sobre la fauna en sargazo en el Caribe mexicano en 2018 y 2019, corresponde al de Mendoza-Becerril *et al.* (2020). Estos autores identificaron 14 especies de hidrozoarios epibiontes, briozoarios y poliquetos serpúlidos sobre los talos de sargazo.

El epifitismo algal (un alga viviendo sobre otra alga) es un fenómeno común. Las algas epífitas pueden ser de todos los filos, Chlorophyta, Rhodophyta, Ochrophyta (Phaeophyceae, Bacillariophyceae) y Cyanobacteria (Ramírez-Rodríguez *et al.* 2011, Mendoza-González *et al.* 2011, Quiroz-González *et al.* 2018), registrándose gran número de especies, principalmente de algas rojas y cianobacterias. Aunque no existe un dato preciso de cuantas, y cuáles son las especies epífitas, muchas especies algales pueden desarrollarse en numerosos sustratos, incluyendo otras algas (Cruz-Rivera y Hay, 2000). La composición específica de algas epífitas es afectada por innumerables factores, incluyendo factores físicos como la desecación y el movimiento del agua, que afectan la condición del hospedero y por lo tanto el asentamiento y desarrollo de sus epífitas (Benzing 1987; Longtin *et al.*, 2009). El epifitismo también se ve afectado por la intensidad del pastoreo de varios invertebrados o peces presentes (Lubchenco y Gaines, 1981). En México, existen numerosos trabajos que incluyen especies algales epífitas en ambientes marinos (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2011); la mayoría son listados de la flora destacando la condición epífita en referencia al sustrato (Mendoza-González *et al.*, 2011). Hasta la fecha, no se conoce las especies de algas epífitas sobre sargazo recalado en las costas caribeñas de México.

Muchos epibiontes marinos son generalistas sin una afinidad a un sustrato en particular (p.ej., Calder y Kirkendale, 2005; Cruz-Rivera y Hay, 2000), razón por la cual pueden ser co-introducidos en sus sustratos. Debido a la relevancia que tiene el sargazo como vehículo para la introducción de especies no nativas, el presente informe describe las especies de epibiontes asociadas al sargazo, y se en caso de tratarse de un nuevo registro se evaluará su potencial capacidad invasora.

Objetivos

- Identificar los epibiontes asociados a mantos de sargazo colectados en dos zonas durante seis periodos de muestro dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) en el Caribe mexicano.
- Determinar los diferentes índices propuestos en el protocolo
- Realizar comparaciones entre la zona frontal y del arrecife posterior, así como evaluar variaciones temporales en la composición y abundancia de los epibiontes.

Hipótesis

- Se revelarán especies de epibiontes de nuevo registro asociadas a los mantos de sargazo
- Los epibiontes asociados al sargazo muestran variaciones espaciales y temporales en su composición

II. METODOS

II.1 Trabajo en el mar

Las colectas en dos sitios siendo arrecife frontal (F) y arrecife posterior (P) están descritas en el Capítulo 1 (Fig. 1), y se analizaron los epibiontes de los seis muestreos de 2021: 21 de abril (2021-1), 18 de mayo (2021-2), 01 de junio (2021-3), 11 de junio (2021-4), 24 de junio (2021-5) y 02 de julio (2021-6).

II.2 Trabajo de laboratorio

II.2.1. Procesamiento del material fresco

El sargazo colectado se depositó en palanganas con agua para evitar la deshidratación, usando guantes. Para el estudio de epifauna, se separaron cinco secciones de talo maduro por especie/morfotipo (tamaño ≈ 10 cm de longitud de talo) por muestra, y se preservaron en frascos de 50 ml con formol al 4%. Para el estudio de algas epífitas, se separó una fracción representativa (tamaño aproximado 10 cm) por especie/morfotipo de sargazo, que se colocó en bolsas de plástico con agua de mar y formol 4% neutralizado con borato de sodio para su preservación. Las muestras se trasladaron en bolsas resellables rotuladas con papel absorbente de formol al Laboratorio de Ficología (Biodiversidad Marina) de la Facultad de Ciencias de la UNAM, para su procesamiento.

II.2.2. Epifauna-hidrozoarios

Empleando un microscopio estereoscópico (Olympus SZ61), se identificaron las colonias de hidrozoarios a nivel especie, empleando claves de Morris y Mogelbert (1973) y de Calder (1988, 2005), siguiendo los criterios de Cunha y Jacobucci (2010). Para estimar la cobertura de los hidrozoarios, se seleccionan 10 láminas con cobertura alta por especie/morfotipo. Se

colocó la lámina entre dos placas de acrílico transparente, con una cuadrícula de 1 cm². Se contó el número de cuadros sin y con hidrozoario en ambos lados de las placas. Se determinó la cobertura como el porcentaje de los cuadros totales ocupado por hidrozoarios. Se realizó este proceso para el conjunto de las dos especies, y para cada especie de hidrozoario por separado. Se procesaron *S. fluitans* III y de *S. natans* VIII por tener láminas anchas, las láminas más angostas de *S. natans* I estaban virtualmente desprovistas de hidrozoarios.

II.2.3. Algas epífitas

Con un microscopio estereoscópico, se llevó a cabo una primera revisión de las secciones grandes de talos de sargazo. Posteriormente de cada especie/morfotipo en cada muestra se seleccionaron cinco fragmentos de talo de 8 cm cada uno con todas las estructuras (estipe, láminas y neumatocistos). Se procedió a inspeccionar de estos fragmentos para ubicar a las algas epífitas, hacer una determinación taxonómica preliminar a género y hacer la valoración de su densidad (número de matas de algas). Solamente se registraron matas pequeñas de algas sobre sargazo. La abundancia de las algas epífitas se registró como la mediana del número matas sobre los fragmentos (de 8cm) de cada especies/morfotipo de sargazo por muestra.

Con un microscopio óptico (marca LAB-OEM, modelo PH2013i FASE) se analizó cada sección de talo para la determinación taxonómica de las algas epífitas al nivel más bajo posible usando la bibliografía clásica y las claves para la región: Taylor (1960), Littler *et al.* (1989), Littler y Littler (2000), De la Garza (2003) y Peruzzi *et al.* (2009). Además, se consultaron obras sobre la región para obtener datos importantes de caracteres morfológicos de apoyo a la determinación taxonómica como Mendoza-González y Mateo-Cid (1996), Guimarães. (2004), Castro-Nunes (2007), Fernández (2008), Ardito y García (2009), Morón y Ardito (2010) entre otros. Algae Base (Guiry y Guiry, 2021) fue la base de datos utilizada para actualizar la nomenclatura y la ubicación taxonómica supraespecífica.

II.3 Análisis de datos

II.3.1. Índices

Considerando que los métodos de determinar la abundancia de los hidrozoarios y de los epífitos algales fue distinto, se determinaron los índices por separado para cada grupo de epibiontes.

Se determinaron los siguientes índices **de las especies epibiontes por muestreo**.

1. Número total de especies (riqueza específica S)
2. Número de registros nuevos (especies de nuevo registro para la localidad o su área biogeográfica)
3. Promedio (SD, N) de la cobertura (o abundancia) total de epibiontes en las secciones de los talos por especie/morfotipo
4. Dominancia de las especies (Índice de Valor Biológico de Sanders IVB) para su cálculo se requiere asignar un valor a cada especie en relación a su número de individuos por muestra, este índice es expresado a manera de puntajes, se ordena jerárquicamente cada una de las especies de cada muestra respecto a su abundancia, de esta forma la especie más abundante en la muestra ocupa el primer lugar (rango= 1), la segunda más abundante el segundo lugar (rango=2) y así sucesivamente (Loya Salinas y Escofet 1990). Se realiza este análisis por separado para cada especie/morfotipo de sargazo

II.3.2. Análisis estadísticos

Para verificar si existen diferencias significativas en la cobertura de hidrozoarios entre zonas (Frontal y Posterior), se realizó un análisis no-paramétricos de Wilcoxon, y se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para verificar diferencias en cobertura entre muestreos (2021-1 a 2021-6). Se utilizaron las mismas pruebas para verificar posibles diferencias en abundancia de

epífitas entre zonas y muestreos. Los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2020, Versión 1.3.1093) se utilizó el paquete: doBy (Højsgaard y Halekoh, 2022).

III. RESULTADOS

III.1. Epifauna en general

Aparte de los hidrozoarios (ver sección III.2), únicamente se registraron el briozoario incrustante *Jellyella tuberculata* y el poliqueto serpúlido *Neodexiospira formosa*, en los talos de sargazo, resultando en una riqueza específica (S) de 2. Estos dos epibiontes estuvieron presentes en casi todos los talos de *S. fluitans* III y *S. natans* VIII, colectadas en las dos zonas y en los seis muestreos. Su cobertura siempre fue baja (0.1-25%, categoría 1 del protocolo), y se encontraron en los distintos partes del talo (estipe, neumatocisto o lámina). Estos epibiontes solamente se encontraron en un solo talo de *S. natans* I, colectado en el arrecife posterior (muestreo 2021-2).

III.2. Epifauna-hidrozoarios

Se registraron únicamente dos especies de hidrozoario. *Aglaophenia latecarinata* (familia Aglaopheniidae) se registró exclusivamente sobre las láminas de *Sargassum natans* VIII, mientras la otra especie *Clytia noliformis* (familia Clytiidae) creció en las láminas de *S. fluitans* III y *S. natans* VIII. También se inspeccionaron talos de *S. natans* I de las colectas; sin embargo, únicamente se registraron dos talos con colonias de *C. noliformis*.

La cobertura de los hidrozoarios en las láminas varió entre 40.6 y 60.9 % (Tabla 1). Ambas especies de hidrozoario ya fueron registradas anteriormente en el área de estudio; por lo tanto, no hubo ningún nuevo registro de hidrozoario en este estudio. La cobertura promedio de *C. noliformis* sobre las láminas de *S. fluitans* fue 46.9 %. Según el índice de Sanders, la especie dominante sobre *S. natans* VIII fue *A. latecarinata*, con una cobertura promedio de

53.1%, ocupando el primer lugar (rango= 1) y *Clytia noliiformis* el segundo lugar (rango =2) con una cobertura promedio de 46.9 (Fig. 3).

Las diferencias en cobertura total de los hidrozoarios en las láminas no fueron significativas entre zonas de muestreo ($p = 0.29$), sin embargo, si lo fueron entre muestreos (Kruskal-Wallis, $p > 0.005$), con una cobertura más baja en los muestreos 2020-1, 2021-4 y 2021-5 (Tabla 1).

III.3 Algas epífitas

El registro de especies algales epífitas sobre *Sargassum fluitans* III, *S. natans* I y *S. natans* VIII, a lo largo de seis muestreos durante 2021, se restringió a dos especies de Cyanobacteria: *Dichothrix penicillata* Zanardini ex Bornet y Flahault y *Rivularia atra* Roth. La riqueza específica se mantuvo en $S = 2$, excepto en el primer muestreo de abril de 2021 (2021-1) cuando solo se registró la especie de *Rivularia atra* (Tabla 1). La abundancia de las algas epífitas varió entre 5.2 y 34.5 matas por sección de talo de 8 cm, dependiendo del muestreo (Tabla 1). Según el índice de Sanders, considerando la abundancia promedio, *D. penicillata* es la especie dominante (rango=1) sobre las tres especies/morfotipos de sargazo (Tabla 2; Figura 4); sin embargo, esta especie es la menos frecuente en sargazo (Tabla 2). Ninguna de las dos especies de epífitas son nuevos registros para la región.

Las diferencias en abundancia total de epífitas por sección de talo de 8 cm, no fueron significativas entre zonas de muestreo ($p = 0.896$), sin embargo, si lo fueron entre muestreos (Kruskal-Wallis, $p = 0.007$), con una densidad más baja en los muestreos 2020-1 (Tabla 1, Fig. 3). Tampoco se encontró una preferencia clara de la distribución de las epífitas respecto de las diferentes partes del talo, encontrándose tanto en los ejes de las ramas, como en las láminas y en las axilas (nodos) de las ramificaciones.

IV. DISCUSIÓN

La riqueza específica de la epifauna y algas epífitas sobre sargazo en este estudio fue baja, con solamente una especie de briozoario, una especie de poliqueto serpúlido, dos especies de hidrozoarios y dos especies de algas epífitas. El briozoario incrustante *Jellyella tuberculata* y el poliqueto serpúlido *Neodexiospira formosa* son cosmopolitas (Montoya *et al.* 2007; Knight *et al.* 1974) y existen registros anteriores de estos sobre sargazo (Häussermann y Försterra 2009; Ryland 1974; Mendoza-Becerril *et al.* 2020).

Explicaciones por la baja diversidad de especies epibiontes podrán ser que el sargazo fue colectado recién llegado del ambiente oceánico oligotrófico, con una comunidad abundante de macrofauna depredadora o herbívora, no permitiendo el desarrollo de epibiontes, especialmente las algas. Otro factor podrá ser que algunos epibiontes se desprendieron durante la colecta; por ejemplo, en los residuos de las muestras se observaron algunos zooides desprendidos del hidrozoario *Zanclaea alba* y algas como *Callotrix* spp. Ambas ya fueron registradas en el área de estudio, y por lo tanto no son de preocupación invasora. Estos especímenes desprendidos indican que se debe mejorar el procedimiento de manejo de los epibiontes; con preferencia ya se selecciona y separa las secciones de talo para analizar en el campo, y se fija de manera inmediata.

IV.1. Los hidrozoarios

Las dos especies de hidrozoarios de este estudio, *Clytia noliiformis* y *Aglaophenia latecarinata*, han sido registradas anteriormente como epibiontes dominantes de sargazo (Morris y Mogelbert, 1973; Calder, 1995, 1998). Se sabe más de la especie *C. noliiformis*, por ser un epibionte abundante en sargazo del Mar de los Sargazos, especialmente en *S. natans* I (Calder 1995). Las colonias son diminutas (2 mm), crecen rápidamente hacia el exterior en dirección a las láminas y neumatócitos, y son menos abundantes en las partes más maduras

de los talos (Ryland 1974). *C. noliformis* prevalece donde hay mayor aporte de nutrientes, resultando en más alimento (nanoplancton) del cual se alimenta (Niemann, 1986). *A. latecarinata* ha sido menos estudiado por estar asociada exclusivamente a *S. natans* VIII, cuya presencia fue notoria hasta la formación del Gran Cinturón Atlántico del Sargazo (Schell *et al.* 2015; García-Sánchez *et al.* 2020).

Mendoza-Becerril *et al.* (2020) reportaron una riqueza específica mucho más alta en la misma área de estudio, con un total de 14 taxones de hidrozoarios, incluyendo *C. noliformis* y *A. latecarinata*; esta última también asociada exclusivamente a *Sargassum natans* VIII. La afinidad de asociaciones de hidrozoarios por especie/morfotipo de sargazo puede estar relacionada con la morfología de la macroalga y/o a los metabolitos secundarios que ésta produce (Calder 1995). En el Mar de los Sargazos se han registrado 18 especies de hidrozoarios sobre *S. fluitans* III y *S. natans* I.

Los hidrozoarios son especies generalistas, colonizan sustratos bióticos y abióticos (Calder, 1991), además existen especies que han sido catalogadas como organismos invasores con serias repercusiones particularmente en la pesquería y la acuicultura (Martell *et al.* 2018). Mendoza Becerril *et al.* (2020) reportaron la presencia de *Obelia dichotoma* en *Sargassum fluitans* III y *S. natans* I, especie que no fue detectado en el presente estudio. Sin embargo, esta especie es de interés porque en México ya es considerada especie invasora (Okolodkov *et al.* 2007), por lo que se requieren más estudios de los hidrozoarios.

IV.2. Las algas epífitas

Este trabajo incluyó solo dos especies de Cyanobacteria, *Dichothrix penicillata* y *Rivularia atra* como epífitas de *Sargassum natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans*. La determinación taxonómica de dichas especies epífitas se soportó en el análisis de caracteres morfológicos principalmente registrados en Littler y Littler (2000), los que fueron totalmente coincidentes.

Sin embargo, actualmente la confiabilidad de la identidad específica en la mayoría de las especies algales y particularmente de las cianobacterias, implican la necesidad de incluir análisis moleculares que no fueron considerados en este proyecto.

El registro del epifitismo de especies algales y particularmente de especies de Cyanobacteria tiene una data antigua, como lo muestran las referencias de Geitler en 1925, y las modificaciones morfológicas de las especies de *Chroococcus* y *Dermocarpa* por su hábito epífítico y la referencia de Pascher en 1929 sobre las especies de *Stichosiphon* y *Endonema* (en Fritsch, 1944). Actualmente se cuenta con registros de muchas otras especies de cianobacterias epífitas (Wood y Palmatier, 1954), particularmente con registros de epífitas cianobacterianas para las costas del Caribe mexicano (Mendoza-González *et al.* 1992). Incluso, se han reportado especies de *Dichothrix* como epífitas (Quan-Young *et al.* 2006) como *D. gypsophila* Bornet y Flahault y *D. ramenskii* Elenkin (Nava *et al.* 2017). La especie *D. penicillata* reportada en este informe, ha sido mencionada en los registros de la región creciendo en rocas, sobre coral muerto y como epífita de otras algas (Littler y Littler, 2000) concordante con los resultados obtenidos. En el caso de las especies de *Rivularia* se encontró el reporte de *R. bornetiana* Setchell como una especie epífita (Nava *et al.* 2017), por lo que el registro de *R. atra* creciendo sobre sargazo resulta posible.

Dichothrix penicillata ha sido reportada para Florida, las Antillas menores, las Antillas mayores, el mar Caribe occidental y el Golfo de México (Littler y Littler, 2000; Ortega *et al.* 2001), pero no hay datos específicos para el área de estudio. *Rivularia atra* fue registrada para las Bahamas (Littler y Littler, 2000), se registró también en el Caribe mexicano, en Xcalak (Ortega *et al.* 2001) y de forma general para las costas de del Caribe mexicano por Mendoza-González *et al.* (2016). Por lo tanto, la presencia de esta Cyanobacteria como epífita de sargazo puede considerarse como un nuevo registro para la localidad de Puerto Morelos, si no para la región.

La relación entre las diferentes especies algales hospederas y sus epífitas cianobacterianas ha sido descrita como un tipo de mutualismos donde a cambio del sustrato de fijación para las cianobacterias, las especies anfitrionas obtienen nitrógeno, debido a la especial capacidad de fijar nitrógeno atmosférico de esas epífitas (Carpenter, 1972), como se registró para *Dichothrix fucicola*, quien por su fijación de N proporciona entre el 2 al 32% de las necesidades en *Sargassum natans* y *S. fluitans* (Lapointe *et al.*, 2021). De tal forma, es posible sugerir que las cianobacterias epífitas encontradas en las especies/morfotipos de sargazo reportadas aquí, pueden estar supliendo las necesidades de nitrógeno de las anfitrionas y promoviendo el desarrollo de la biomasa en deriva de sargazo, haciendo de este un sistema auto suficiente.

IV.3. Variaciones espaciales y temporales en los epibiontes

La baja riqueza de epibiontes encontradas en el presente estudio impidió hacer análisis numéricos y estadísticos complejos y la obtención de los índices comunitarios más comunes. La ausencia de cobertura o abundancia de respectivamente los hidrozoarios y algas epífitas entre las zonas de muestreo (arrecife frontal y arrecife posterior) no es sorprendente, considerando que las condiciones de los mantos de sargazo al pasar el arrecife, probablemente no cambiaron suficientemente para causar el desprendimiento de los epibiontes. Las variaciones de la cobertura o densidad de epibiontes a lo largo de las diferentes fechas de muestreo, pueden deberse a fluctuaciones bióticas y abióticas (Cunha *et al.*, 2018), así como también con periodos de crecimiento de sargazo y fases reproductivas de los epibiontes.

CONCLUSIONES

Se registraron cuatro especies epifauna: el briozoario incrustante *Jellyella tuberculata* y el poliqueto serpúlido *Neodexiospira formosa*, y dos especies de hidrozoarios. El briozoario y el poliqueto fueron omnipresentes con bajas densidades en *S. fluitans* III y *S. natans* VII, y virtualmente ausente sobre *S. natans* I. El hidrozoario *Clytia noliformis* que fue predominante en *Sargassum fluitans* III y *Aglaophenia latecarinata* fue registrada de forma exclusiva en *S. natans* VIII, aunque también se observó ocasionalmente a *C. noliformis*. mismas que han sido reportadas en estudios previos. Dado que, un estudio previo sobre hidrozoarios en sargazo en la misma área detectó a la especie *Obelia dichotoma* que es catalogada como invasora, se requieren estudios para evaluar su propagación secundaria.

Las dos especies de algas epífitas encontradas en este estudio, *Dichothrix penicillata* y *Rivularia atra* no han sido reportadas anteriormente como epífitas de sargazo; sin embargo, si se han reportado otras especies de estos dos géneros como epífitas de sargazo, y estas dos especies han sido registrados en otros sustratos en la región.

Se sugiere continuar con el estudio de las epibiontes asociadas a las especies y morfotipos de *Sargassum* para ver si hay un aumento en el número de especies de epibiontes a lo largo de los años ya que se esperaba una mayor riqueza específica.

V. REFERENCIAS

- Ardito S, García M (2009) Estudio ficológico de las localidades de Puerto Francés y San Francisquito, Estado Miranda, Venezuela. *Acta Botanica Venezuelica* 32: 113-143
- Arrontes J (1990) Composition, distribution on host and seasonality of epiphytes on three intertidal algae. *Botanica Marina* 33: 205–211
- Benzing DH (1987) Vascular epiphytism: taxonomic participation and adaptive diversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 74: 183–204
- Calder DR (1988) Shallow-water hydroids of Bermuda: the Athecatae. *Royal Ontario Museum Life Sciences Contributions* 148: 1–110
- Calder DR (1995) Hydroid assemblages on holopelagic *Sargassum* from the Sargasso Sea at Bermuda. *Bulletin of Marine Science* 56:537–546
- Calder DR, Kirkendale L (2005) Hydroids (Cnidaria, Hydrozoa) from shallow water environments along the Caribbean Coast of Panama. *Caribbean Journal of Science* 41: 476–49
- Carpenter EJ (1972) Nitrogen fixation by a blue-green epiphyte on pelagic *Sargassum*. *Science* 178.4066: 1207-1209
- Castro-Nunes J (2007) Duas espécies de Rhodymenia (Rhodophyta, Rhodymeniaceae) no Estado da Bahia, Brasil. *Acta Botanica Malacitana* 32: 228-232
- Chemello R, Milazzo M (2002) Effect of algal architecture on associated fauna: some evidence from phytal molluscs. *Marine Biology* 140: 981–990
- Christie H, Norderhaug KM, Fredriksen S (2009) Macrophytes as habitat for fauna. *Marine Ecology Progress Series* 396: 221-233
- Cruz-Rivera E, Hay ME (2000). The effects of diet mixing on consumer fitness: macroalgae, epiphytes, and animal matter as food for marine amphipods. *Oecologia*, 123(2), 252-264

- Cunha AF, Jacobucci GB (2010) Seasonal variation of epiphytic hydroids (Cnidaria: Hydrozoa) associated to a subtropical *Sargassum cymosum* (Phaeophyta: Fucales) bed. *Zoologia* 27: 945–955
- De la Garza A (2003) Clave genérica de las algas rojas marinas macroscópicas y comunes de las costas de Veracruz, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 74 pp
- Fritsch FE (1944) Present-day classification of algae. *The Botanical Review* 10: 233-277
- Fernández C (2008) Flora marina del Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica, Pacífico Tropical Oriental. *Revista de Biología Tropical* 56(suppl. 2): 57-69
- García-Sánchez M, Graham C, Vera E, Escalante-Mancera E, Álvarez-Filip L, van Tussenbroek BI (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany* 167: 103275
- Gee JM, Warwick RM (1994) Metazoan community structure in relation to the fractal dimensions of marine macroalgae. *Marine Ecology Progress Series* 103:141-150
- Gestoso I, Olabarria C, Troncoso JS (2012) Effects of macroalgal identity on epifaunal assemblages: native species versus the invasive species *Sargassum muticum*. *Helgoland Marine Research* 66:159–166
- Geitler L (1925) Über neue oder wenig bekannte interessante Cyanophyceen aus der Gruppe der Chamaesiphonaceae. *Arch. Protok.* 51: 321-360
- Govindarajan AF, Cooney L, Whittaker K, Bloch D, Burdorf RM, Canning S, Carter C, Cellan SM, Eriksson FAA, Freyer H, Huston G, Hutchinson S, McKeegan K, Malpani M, Merkle-Raymond A, Ouellette K, Petersen-Rockney R, Schultz M, Siuda ANS (2019) The distribution and mitochondrial genotype of the hydroid *Aglaophenia latecarinata* is correlated with its pelagic *Sargassum* substrate type in the tropical and subtropical western Atlantic Ocean. *PeerJ* 7: e7814

- Guiry M, Guiry G (2021). AlgaeBase. World-wide electronic publication. National University of Ireland. Galway, Irlanda. <http://www.algaebase.org>
- Häussermann V, Försterra G (2009) Marine benthic fauna of Chilean Patagonia. Santiago, Nature in Focus. 1000 p
- Højsgaard S y Halekoh U (2007) <https://cran.r-project.org/web/packages/doBy/index.html>
- Jacobi CM, Langevin R (1996) Habitat geometry of benthic substrata: effects on arrival and settlement of mobile epifauna. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 206: 39-54
- Kim HM, Jo J, Park C, Choi BJ, Lee HG, Kim KY (2019) Epibionts associated with floating *Sargassum horneri* in the Korea Strait. *Algae* 34:303-313
- Kirkendale L, Calder DR (2003) Hydroids (Cnidaria: Hydrozoa) from Guam and the Commonwealth of the Northern Marianas Islands (CNMI). *Micronesica* 36:159–188.
- Knight-Jones EW, Knight-Jones P L, Llewellyn C (1974) Spirorbinae (Polychaeta: Serpulidae) from southeastern Australia. Notes on their taxonomy, ecology, and distribution. *Records of the Australian Museum* 29: 106–151
- Lapointe BE, Brewton RA, Herren L W, Wang M, Hu C, McGillicuddy DJ, Lindell BE, Hernandez F J, Morton P L (2021) Nutrient content and stoichiometry of pelagic *Sargassum* reflects increasing nitrogen availability in the Atlantic Basin. *Nature communications* 12: 1-10
- Littler DS, Littler MM (2000) Caribbean reef plants: an identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico. Offshore Graphics. Washington, D.C., USA. 542 pp
- Littler D, Littler M, Bucher K, Norris J (1989) Marine plants of the Caribbean, a field guide from Florida to Brazil. Smithsonian Institution Press. Washington, D.C., USA. 263 pp

- Longtin C, Scrosati R, Whalen G, Garbary D (2009) Distribution of algal epiphytes across environmental gradients at different scales: intertidal elevation, host canopies, and host fronds. *Journal of Phycology* 45: 820–827
- López PJ, Hervé V, Lambourdière J, René-Trouillefou M, Devault D (2020) From the sea to the land: Dynamic of the *Sargassum* tide holobiont in the Caribbean islands. Pre-print Research Square, posted 9th June 2020
- Loya-Salinas D, Escofet A (1990) Contribution to the calculation of the Biological Value Index (Sanders, 1960). *Ciencias Marinas*, 16: 97–115
- Lubchenco J, Gaines SD (1981) A unified approach to marine plant-herbivore interactions I. Populations and communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 12: 405–437
- Martell L, Bracale R, Carrion SA, Purcell JE, Lezzi M, Gravili C (2018) Successional dynamics of marine fouling hydroids (Cnidaria: Hydrozoa) at a finfish aquaculture facility in the Mediterranean Sea. *PLoS ONE* 13(4): e0195352
- Mateo-Cid L, Mendoza-González C, Ávila-Ortiz A, Díaz-Martínez S (2013) Algas marinas bentónicas del litoral de Campeche, México. *Acta Botanica Mexicana* 104: 53-92
- Mendoza-Becerril MA, Serviere-Zaragoza E, Mazariegos-Villarreal A, Rivera-Perez C, Calder DR, Vázquez-Delfín EF, Freile-Pelegrín Y, Agüero J, Robledo D (2020) Epibiont hydroids on beachcast *Sargassum* in the Mexican Caribbean. *PeerJ* 8: e9795
- Mendoza-González AC, Mateo-Cid LE, Acosta-Calderon JA, Vázquez-Rodríguez A, Hernández-Casas CM, Garduño-Acosta GA (2016) Marine seaweeds of the Yucatán Península: diversity, economic importance and conservation. *Marine benthos: biology, ecosystem functions and environmental impact*. Hauppauge. New York, USA, 39-81
- Montoya EP, Flórez-Romero A, Winston JE (2007) Checklist of the marine Bryozoa of the Colombian Caribbean. *Biota Columbiana* 8:159-184

- Morris BF, Mogelberg DD (1973). Identification manual to the pelagic *Sargassum* fauna. Bermuda Biological Station Special Publications 11: 1-63
- Morón M, Ardito S (2010) Estudio ficológico del litoral rocoso de Isla Larga, Parque Nacional San Esteban, estado Carabobo, Venezuela. Acta Botanica Venezuelica 33: 167-185
- Nava-Olvera R, Mateo-Cid LE, Mendoza-González AC, y García-López, D. Y. (2017). Macroalgas, microalgas y cianobacterias epífitas del pasto marino *Thalassia testudinum* (Tracheophyta: Alismatales) en Veracruz y Quintana Roo, Atlántico mexicano. Revista de biología marina y oceanografía, 52(3), 429-439
- Niermann U (1986) Distribution of *Sargassum natans* and some of its epibionts in the Sargasso Sea. Helgoländer Meeresuntersuchungen 40: 343–353
- Okolodkov YB, Bastida-Zavala R, Ibáñez AL, Chapman JW, Suárez-Morales E, Pedroche F, Gutiérrez-Mendieta FJ (2007). Especies acuáticas no indígenas en México. Ciencia y Mar 11(32): 29-67
- Ortega M M, Godínez JL, y Solórzano GG (2001) Catálogo de algas bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe (Vol. 34). UNAM
- Pascher A (1929) Ueber die Teilungsvorgänge bei einer neuen Blaualge: Endonema. Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik 70: 329-347
- Peruzzi V, Rezende D, Marcello N, Yoneshigue Y, Clapis R (2009) Four new additions to the marine flora of Fernando de Noronha Archipelago, Tropical western South Atlantic Ocean. CheckList 5: 210-215
- Phlips E, Zeman C (1990) Photosynthesis, growth and nitrogen fixation by epiphytic forms of filamentous cyanobacteria from pelagic *Sargassum*. Bulletin of Marine Science 47: 613-621

- Quan-Young LI, Díaz-Martín MA, Espinoza-Avalos J (2006). Algas epífitas de Bajo Pepito, Isla Mujeres, Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical* 54: 317-328
- Quiroz-González, N, León-Álvarez D., Rivas-Acuña M (2018) Biodiversidad de algas rojas marinas (Rhodophyta) en Tabasco, México. *Acta Botánica Mexicana* 123: 103-120
- Ramírez-Rodríguez A, Pérez R, Okolodkov Y (2011) Diversidad de especies de algas epífitas marinas, Veracruz. 71 pp
- Ryland JS (1974) Observations on some epibionts of gulf-weed, *Sargassum natans* (L.) Meyen. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 14: 17–25
- Segura Puertas L, Van Tussenbroek BI (1998) En el mar ¿Las plantas urtican? *Espacio Profundo* 37: 23-25
- Schell JM, Goodwin DS, Siuda AN (2015) Recent *Sargassum* inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28: 8-11
- Wood, R. D., y Palmatier, E. A. (1954). Macroscopic algae of the coastal ponds of Rhode Island. *American Journal of Botany*, 135-142

FIGURAS

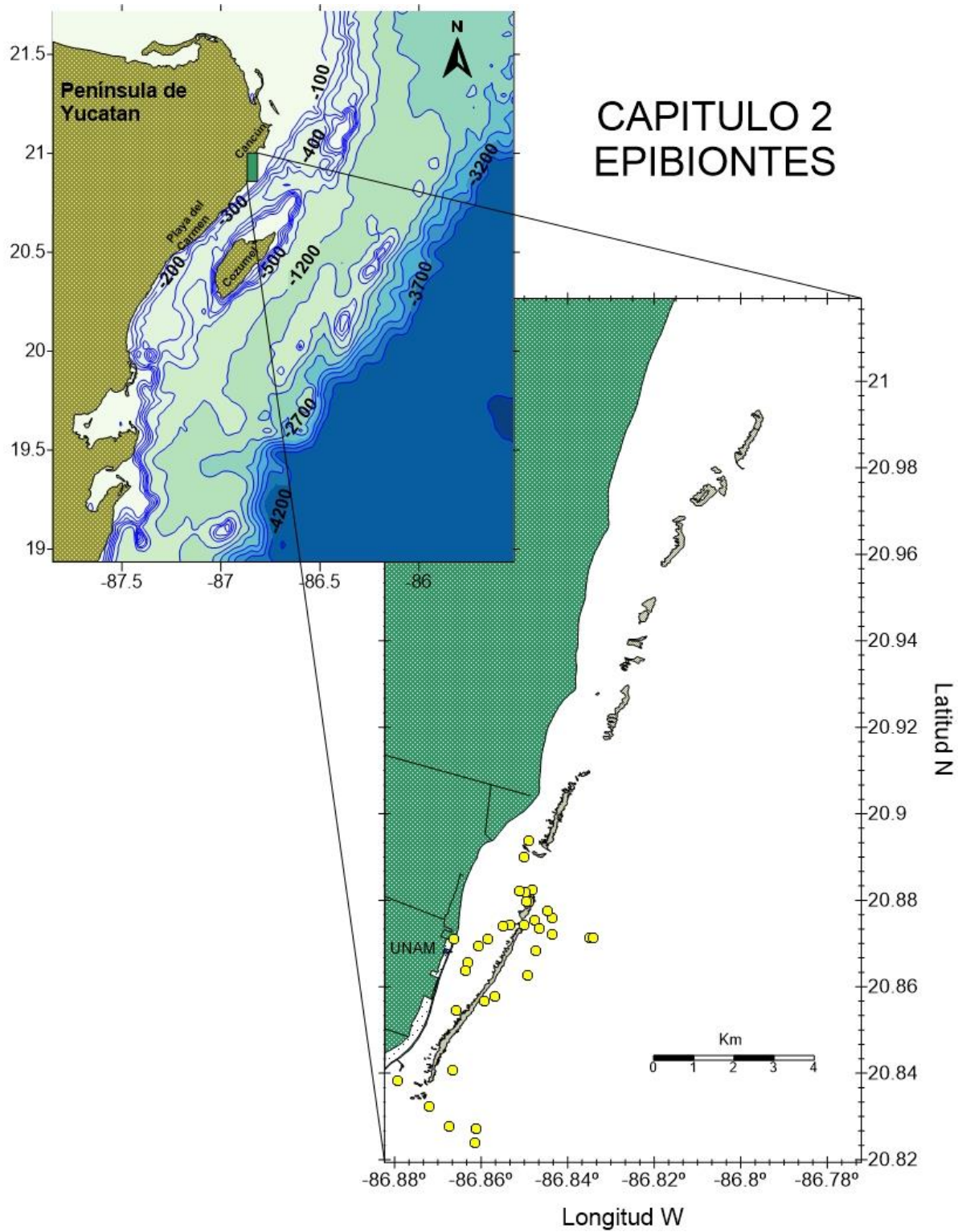


Fig. 1. Mapa de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), indicando los puntos de muestreo del estudio de epibiontes de sargazo.

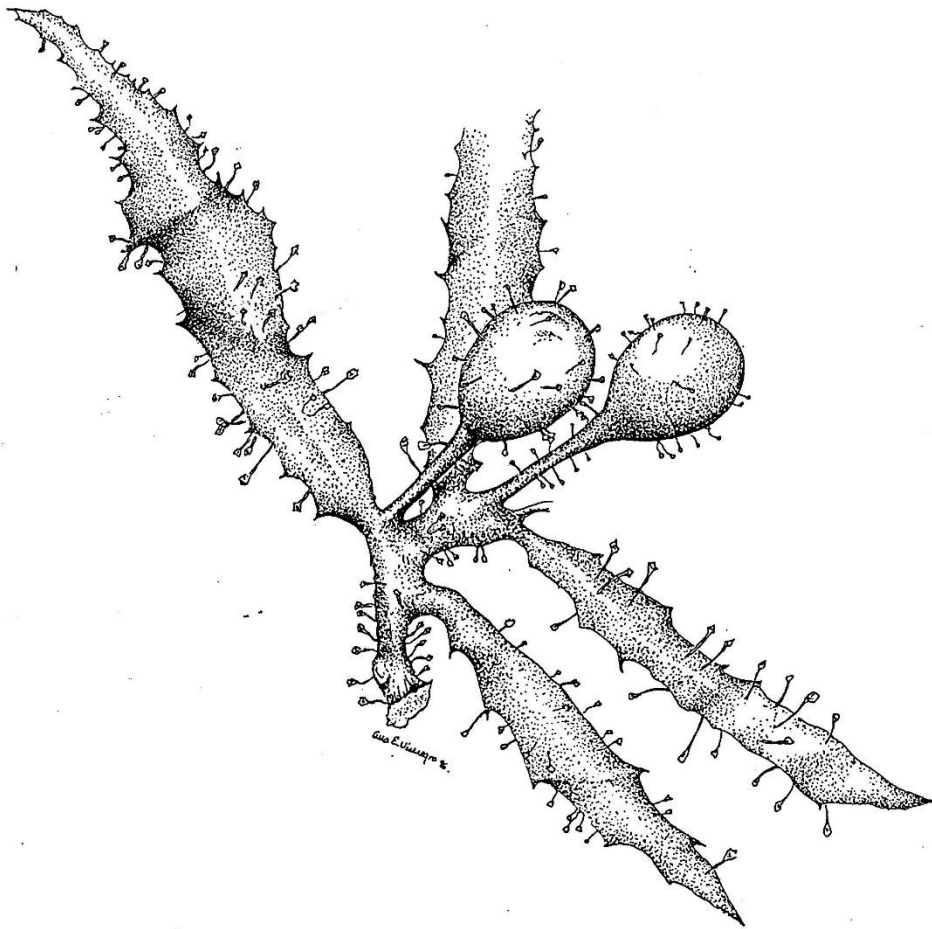


Fig. 2 Hidrozoarios sobre *Sargassum fluitans* III recolectado en 1996 (tomado de Segura Puertas y van Tussenbroek 1998, dibujado por Ana Elena Viniegra)

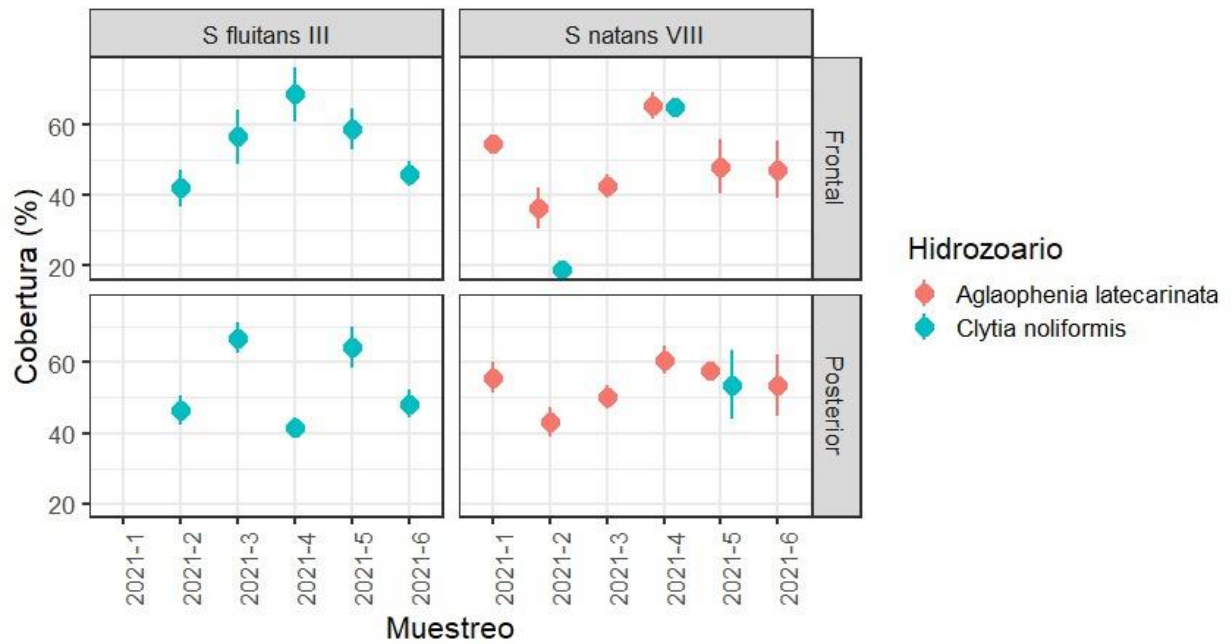


Fig. 3. La cobertura promedio (\pm SE, N=10) de las dos especies de hidrozoarios sobre las láminas de *Sargassum fluitans* III y de *S. natans* VIII, por zona del arrecife y por muestreo. *S. fluitans* III fue escaso en 2021-1, y no se determinó la cobertura de hidrozoarios.

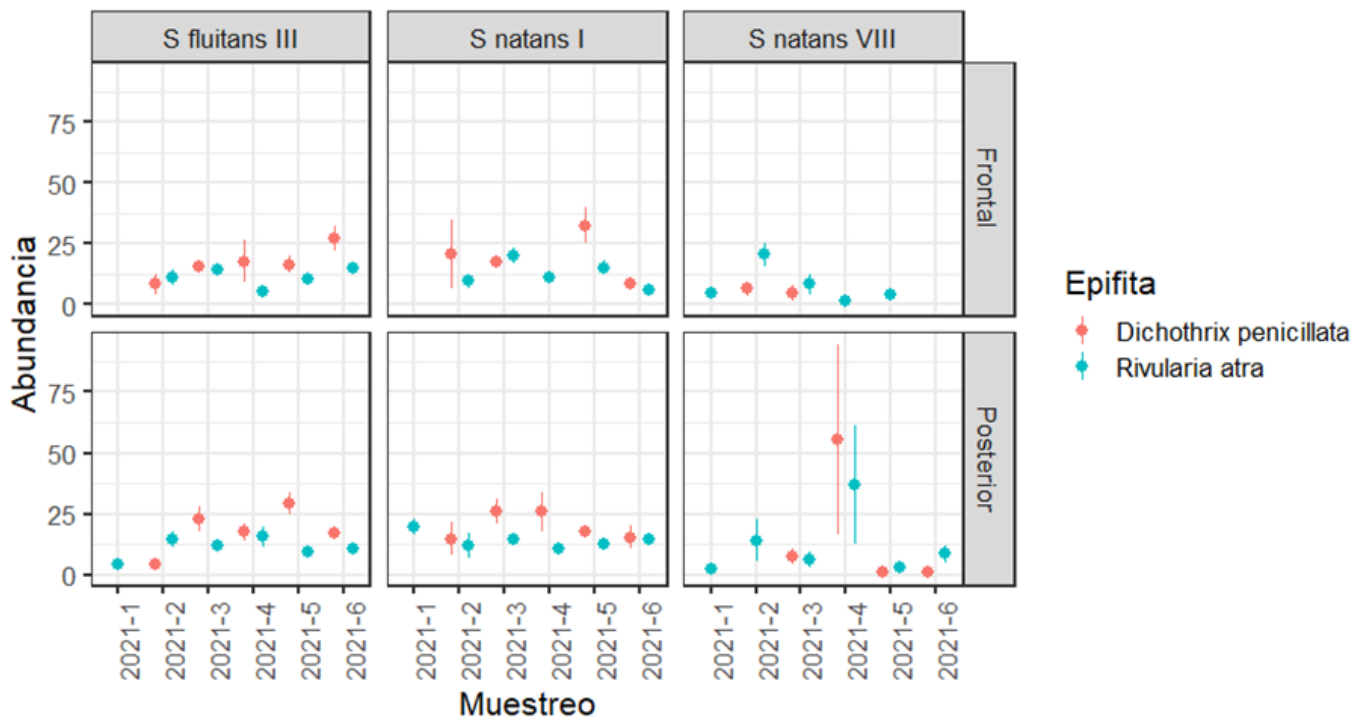


Fig. 4. La abundancia promedio (\pm SE, N=5) de las dos especies de algas epífitas sobre las tres especies/morfotipos de *Sargassum*, por zona del arrecife y por muestreo.

TABLAS

Tabla 1. Índices de epibiontes por muestreo. No se identificaron nuevos registros de hidrozoarios, ni de algas epífitas. Datos de cobertura y abundancia son promedios (SE) de todas las especies de hidrozoario o alga epífita, N= 20 láminas para los hidrozoarios, N=10-16 talos de 8 cm para las algas epífitas.

Muestreo	Hidrozoarios		Algas epífitas		
	Número de	Cobertura	Número de	Abundancia	N
	especies (S)	total	especies (S)	total	
	(N)	(%)	(N)	No. matas/ 8 cm de talo	
2021-1	2	55.1 (2.6)	1	5.2 (1.6)	10
2021-2	2	40.65 (2.4)	2	23.6 (5.8)	13
2021-3	2	54 (1.8)	2	34.5 (3.4)	17
2021-4	2	60.95 (2.3)	2	28.7 (14.8)	15
2021-5	2	57.05 (2.3)	2	28.5 (4.2)	16
2021-6	2	48 (2.8)	2	30.2 (3.4)	13

Tabla 2. Abundancia promedio (SE, N) de las algas epífitas *Dichothrix penicillata* y *Rivularia atra* y sobre secciones de 8 cm de talo de las especies/morfotipos de sargazo *Sargassum fluitans* III (N=33 talos), *S. natans* I (N= 30 talos) y *S. natans* VIII (N=21 talos). Frecuencia= número de talos con el epifito/total de número de los talos.

Abundancia (no. matas)					
sargazo	epífita	promedio	SE	N	Frecuencia
<i>S. fluitans</i> III	<i>D. penicillata</i>	16.4	2.66	14	0.42
	<i>R. atra</i>	10.7	1.41	25	0.75
<i>S. natans</i> I	<i>D. penicillata</i>	24.9	4.01	13	0.43
	<i>R. atra</i>	14.2	1.87	22	0.73
<i>S. natans</i> VIII	<i>D. penicillata</i>	28.4	18.29	7	0.33
	<i>R. atra</i>	17.9	5.29	18	0.86

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 3

Comunidad de bacterioplancton asociada al *Sargassum*.

Suescún-Bolívar, L.P., Cerqueda-García, D., Thomé, P. E, García-Maldonado, J.Q

Resumen

Se caracterizó la comunidad de bacterias asociada a especies pelágicas de *Sargassum* (sargazo) a la deriva, ubicadas tanto en el arrecife frontal como en el arrecife posterior en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos en el Caribe mexicano, durante cuatro meses (de abril a julio de 2021). Para esta caracterización, se realizaron colectas por triplicado de sargazo sin distinción del morfotipo. Además, se colectó por triplicado agua superficial con el fin de identificar diferencias entre la estructura de la comunidad bacteriana propia del sargazo y del agua circundante. Las muestras fueron procesadas para la obtención de DNA y caracterización molecular de la comunidad bacteriana por secuenciación de alto rendimiento, utilizando las regiones hipervariables V4 y V5 del DNA ribosomal. Los resultados mostraron una distinción de estas comunidades, primero, entre bacterias asociadas al sargazo y las del agua circundante, y segundo, en el tiempo de los muestreos. En términos de diversidad, las muestras de agua no mostraron diferencias importantes, siendo ligeramente mayor en el mes de julio, sugiriendo que el sargazo acumulado afectó a la comunidad bacteriana del agua circundante, principalmente en la región del arrecife frontal, antes de la cresta arrecifal. En concordancia, las clases dominantes en muestras de agua fueron Alphaproteobacteria y Bacteroidia, excepto en las muestras de julio que mostraron un incremento en la dominancia

de Gamaproteobacteria. Las bacterias asociadas al sargazo pelágico estuvieron dominadas por la clase Gammaproteobacteria, en particular por el género *Vibrio*. No se detectaron grupos de bacterias que pudieran sugerir presencia de especies bacterianas invasoras. Los resultados permiten proponer que un monitoreo continuo del género *Vibrio* podría determinar presencia de especies e incrementos en abundancia, que pudieran representar un riesgo de salud para la población humana o incluso para invertebrados y macroalgas presentes en el sistema arrecifal y lagunar.

I. INTRODUCCIÓN

El ecosistema flotante de sargazo puede albergar y transportar una gran variedad de organismos y microorganismos (Ezenwa et al., 2012; Turnbaugh et al., 2007, 2009; Shoemaker y Moisaner, 2015; Lederberg 2000), los cuales podrían ser especies exóticas con potencial para competir por los recursos del ecosistema local. Del mismo modo, el transporte y acumulación de microorganismos por el sargazo (Michotey et al., 2020), es un hecho latente que puede acarrear enfermedades que afectan tanto a la fauna silvestre como a la población humana de la región (Baker-Austin et al., 2012).

En la actualidad, se puede estudiar la comunidad de microorganismos a través de la secuenciación masiva (Parada et al., 2016). Estudios han revelado que el sargazo podría albergar y transportar, bajo ciertas condiciones ambientales, bacterias de importancia para la salud pública y el ecosistema (Michotey et al., 2020). Por tal motivo, se caracterizó la estructura de la comunidad de bacterias epibiontes del sargazo, así como la modificación del bacterioplancton asociado al agua circundante afectada por las masas de sargazo en el ecosistema frontal y posterior del arrecife coralino del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos en el Caribe mexicano.

II. Objetivos

- Identificar y caracterizar la comunidad bacteriana asociada a mantos de sargazo y al agua circundante, colectados en las zonas Frontal y Posterior del sistema arrecifal Mesoamericano dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) en el Caribe mexicano.
- Comparar cambios en la comunidad bacteriana asociada a mantos de sargazo y al agua circundante, entre el arrecife Frontal y Posterior del sistema arrecifal Mesoamericano dentro del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) en el Caribe mexicano.

III. Hipótesis.

- El sargazo posee una comunidad bacteriana diferente a la del agua circundante, con poca variación espacio-temporal

III. MÉTODOS.

III.1 Trabajo en el mar.

III.1.1 Selección de sitios y tiempos de muestreo.

Ver Capítulo 1 respecto a los sitios de muestreo. Los muestreos se realizaron aproximadamente cada mes durante tres meses, en las siguientes fechas: 21 de abril (2021-1), primero de junio (2021-3) y 2 de julio de 2021 (2021-6).

III.1.2 Obtención de muestras de bacterioplancton y microbioma.

En cada sitio de muestreo, se colectó aproximadamente 50 g de sargazo pelágico con una red de inmersión de 0.25 m² de abertura de boca y luz de malla de 500 µm (Tanaka y Leite, 1988; Monroy-Velázquez *et al.* 2019). Las muestras de sargazo se preservaron en bolsas herméticas debidamente etiquetadas dentro de una hielera hasta su posterior tratamiento en el laboratorio. Además, se tomaron muestras adyacentes de agua de mar, sin biomasa de sargazo, a 80 cm de profundidad por medio de una botella van Dohrn para obtener una referencia de la comunidad

del bacterioplancton en la columna de agua. Las muestras de agua se transportaron en botellas estériles de 4.8 L en hielera hasta su posterior procesamiento en el laboratorio.

III.2 Trabajo de Laboratorio

III.2.1. Obtención de la microbiota epífita

Una vez en el laboratorio, las muestras de sargazo fueron procesadas siguiendo el método de Burke et al. (2003), con algunas modificaciones. Se tomaron 10 g de sargazo (peso húmedo) en tubos estériles de 50 mL, por triplicado. El sargazo se enjuagó tres veces con agua de mar estéril y se dejaron lavando con buffer CMFSW (0.45 M NaCl, 10 mM KCl, 7 mM Na₂SO₄, y 0.5 mM NaHCO₃) a 150 rpm de agitación durante 2 h a temperatura ambiente. Enseguida, se retiró el sargazo y se filtró el sobrenadante por 0.22 µm. Los filtros se almacenaron en microtubos, un filtro por tubo, a -20 °C hasta su procesamiento. Las muestras de agua se filtraron directamente por filtros de 0.22 µm, y se almacenaron en microtubos a -20°C para su procesamiento.

III.2.2 Extracción de ADN

El ADN se obtuvo por medio del kit PowerWater (Qiagen) siguiendo el método desarrollado por el proveedor. Se determinó la concentración y calidad del ADN por medio de espectrometría a 260/280 nm, y de manera cualitativa, por medio de electroforesis de agarosa. Estas muestras fueron debidamente etiquetadas por medio de un número de lote.

III.2.3. Amplificación del rADN 16S.

Los PCRs se realizaron con 1 µL de ADN de cada una de las muestras. Para amplificar la región V4-V5 del rDNA 16 S se utilizaron como controles positivos una muestra conocida de ADN de bacterioplancton de agua o de sargazo. Se utilizaron los cebadores con los adaptadores de Illumina (MiSeq adapter) + 515F: 5'-
(TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAG)GTGYCAGCMGCCGCGGTAA-
3', y el (MiSeq adapter) + 926R 5'-

(GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAG)CCGYCAATTYMTTTRAGTTT-3'. Las condiciones de PCR se adecuaron según las recomendaciones de Parada et al (2016): 3 min a 94 °C, 30 ciclos de 45 s a 94 °C, 45 s a 50 o 52 °C y 1.5' 72 °C, y una extensión final de 5 min a 72 °C.

III.2.4. Preparación de bibliotecas 16S rADN Illumina MiSeq.

Para la preparación de las bibliotecas 16S rADN (Fig. 3C) los amplicones obtenidos en el PCR anterior, se purificaron siguiendo el protocolo recomendado por illumina (16S Metagenomic Sequencing Library Preparation 15044223 B, (https://support.illumina.com/downloads/16s_metagenomic_sequencing_library_preparation.html). Una vez obtenidos los amplicones libres de cebadores, se marcaron por medio de índices duales y adaptadores mediante una segunda reacción de PCR: 5 µl de los amplicones purificados anteriormente se amplificaron con los adaptadores Nextera XT Index Primer 1 (N7xx) y Primer 2 (S5xx), bajo las siguientes condiciones: desnaturalización inicial de 3 minutos a 95 °C, seguido de 8 ciclos de: 95 °C (30 s), 55 °C (30 s) y 72 °C (30 s), y una extensión final de 5 min a 72 °C. Se obtuvo la biblioteca final mediante la purificación de los amplicones anteriores, separados en un gel de agarosa al 4%. Los productos de amplificación de 630 bp de longitud, se cuantificaron y analizaron por medio del Bioanalyzer DNA 1000. La concentración final de la biblioteca se diluyó a 4 nM utilizando Tris pH 8,5. La biblioteca de amplicones se desnaturalizó con 0.2 N de NaOH, se diluyó con solución tampón de hibridación y se desnaturalizó una segunda vez por calor, para ser secuenciada en un secuenciador Illumina MiSeq. Se incluyó 5 % de PhiX como control interno.

III.3 Análisis taxonómico de la diversidad bacteriana.

III.3.1 Procesamiento y análisis de secuencias.

Se procesaron 2 X 250 lecturas de extremos emparejados por medio de QIIME 2 (Caporaso et al., 2010) y se eliminaron las bases ambiguas en la posición 40 de la hebra 5' de ambas lecturas por inspección manual. Los ASVs (por sus siglas en inglés, Amplicon Sequences Variants) se resolvieron por medio del complemento DADA2 (Callahan et al., 2016). Los ASVs representan OTUs (por sus siglas en inglés, Operational Taxonomic Units) al 99 % y éstos, a su vez, se definen como organismos con genes 16S rRNA similares en ≥ 97 %.

La asignación taxonómica de las secuencias representativas de los ASVs se obtuvo con el complemento de clasificación-consenso-vsearch (Rognes *et al.*, 2016), utilizando SILVA 132 como base de datos de referencia. Se construyó un árbol filogenético con FastTree 2 (Price *et al.*, 2010) después de alinear y enmascarar las secuencias representativas con MAFFT (Katoh y Standley, 2013). Los datos se importaron a la plataforma R (McMurdie y Holmes, 2013) y se analizaron mediante los paquetes Phyloseq, Vegan (Oksanen, 2009) y ggplot2 v3.1.0 (Wickham, 2016). Además, se eliminaron todas las secuencias no bacterianas que corresponden a cloroplastos y mitocondrias. Las muestras fueron normalizadas con escalado de suma acumulada (CSS, por sus siglas en inglés Cumulative Sum Scaling).

III.3.2 Cálculos de diversidad alfa y beta.

Los análisis de diversidad alfa de la comunidad bacteriana se realizaron en el ambiente de desarrollo R con la librería phyloseq (McMurdie y Holmes, 2013). Se calcularon los índices de diversidad más comunes utilizados en el análisis del bacterioma: el índice de Shannon (H'), índice de Simpson (Ds) y ASVs observados. Para el análisis de diversidad beta se construyó una matriz Unifrac ponderada de distancias para calcular la variación en la composición de la comunidad bacteriana, y su similitud se realizó mediante el análisis de coordenadas principales (PCoA, en inglés), utilizando el paquete Vegan.

IV. RESULTADOS

IV.1 Composición y diversidad de la comunidad de bacterioplancton en sargazo y el agua circundante.

Se procesaron tres muestreos de la comunidad de bacterias epibiontes de sargazo en las fechas del 21 de abril, 18 de mayo y 2 de julio del 2021. Además se procesaron muestras del agua circundante mensuales, entre abril y julio. En el mes de abril se observó el menor arribo de sargazo, mientras que en los meses de mayo a julio hubo un arribo mayor. En el análisis de bacterias asociadas al arribo de sargazo, se obtuvo un total de 556,814 lecturas, de las cuales 99,460 lecturas pertenecieron a las muestras de agua, y 457,354 lecturas a las muestras de sargazo. Por medio del complemento DADA2 en QIIME 2 se analizaron las secuencias, y se obtuvo un total de 2,211 ASVs (Amplicon Sequences Variants). Los ASVs con abundancias menores al 1 %, fueron agrupados como “otros”.

Los análisis de Coordenadas Principales (PCoA) indicaron un agrupamiento diferencial de ASVs entre las muestras de agua y las de sargazo (Fig. 1). Las muestras de sargazo en general se agruparon sin importar el sitio de muestreo, mientras que las muestras del muestreo de julio se separaron ligeramente según la ubicación (frontal y posterior).

IV.1.1 Estructura de la comunidad de bacterioplancton

El número de especies observadas (ASVs) y el índice de diversidad de Shannon (Fig. 2) en las muestras de sargazo del muestreo de abril en el arrecife frontal, fueron más altos que en las muestras de sargazo del arrecife posterior (Tabla 1). Las muestras de agua de abril a julio fueron similares en número de ASVs y diversidad de Shannon, aunque en el muestreo del mes de julio hubo una diversidad ligeramente mayor. Sin embargo, tanto el número de ASVs como la diversidad de las muestras de sargazo de abril, en el arrecife frontal fueron similares a los encontrados en el agua del último muestreo (2 de julio). Además, se pudo observar que

todas las muestras presentaron una dominancia de especies similar (índice de Simpson), excepto en el agua en muestras del mes de mayo del arrecife frontal, con una menor dominancia (Fig. 2C).

Las clases más abundantes del dominio Bacteria en las muestras de agua del arrecife frontal y posterior, fueron: Alphaproteobacteria, Bacteroidia y Gamaproteobacteria. La clase Cyanobacteria tuvo un incremento importante en las muestras del 2 de julio, particularmente en el arrecife posterior. Mientras que en sargazo dominó la clase Gammaproteobacteria, la cuál también estuvo presente en gran abundancia en el agua de mar del arrecife posterior en el último muestreo. (Fig. 3). Estos resultados indican que en el mes de julio se tuvieron cambios importantes en la comunidad bacteriana.

Respecto a la abundancia a nivel de género, se encontró de manera general que en las muestras de agua dominaron HIMB11, el clado SAR116, *Synechococcus* CC9902 (sobretudo en las muestras de agua frontal del muestreo de julio) y *Photobacterium* en el agua de la zona posterior del muestreo de julio (Fig. 4). Mientras que las muestras de sargazo estuvieron dominadas por el género *Vibrio* (Fig. 4) el cual disminuyó hacia el mes de julio.

V. DISCUSIÓN.

V.1. Diferencia entre la comunidad bacteriana asociada al sargazo y la del agua de mar circundante.

La comunidad de bacterias asociada con el sargazo es diferente a la del agua superficial. El análisis PCoA separó distintivamente las muestras originadas de la comunidad de epibiontes del sargazo, aunque no distinguió entre muestras del arrecife frontal y posterior, hecho que ha sido reportado en estudios recientes del bacterioma del sargazo (Michotey et al., 2020) y de otras macroalgas (Dobretsov et al., 2006; Wahl et al., 2012; Torralba et al., 2017).

En estudios de epibiontes microbianos de macroalgas, es común encontrar diferencias entre su comunidad bacteriana asociada y la del agua circundante, lo que lleva a suponer que las macroalgas actúan como hospederos para esta comunidad microbiana (Florez et al., 2017). Las macroalgas no solamente proveen de sustrato a las bacterias y otros microbios, sino que interaccionan con esta comunidad al contribuir en su nutrición, proveyéndolos de oxígeno durante el día y polisacáridos; mientras que las bacterias epibiontes pueden interaccionar con estos hospederos proveyéndoles de vitaminas, dióxido de carbono, fijando o reduciendo nitrógeno y/o secretando sustancias promotoras del crecimiento, entre otros, generando una relación funcional de gran importancia para el mantenimiento del ecosistema flotante que representa el sargazo pelágico (Egan et al, 2013).

V.1.2 Diversidad diferencial de la comunidad del agua de mar

Por otro lado, las muestras de agua se asociaron por fecha de muestreo, distinguiéndose por localidad, en particular en el último muestreo del mes de julio, cuando el arribo de sargazo fue mayor. Este último hecho se podría deber al efecto acumulado de la arribazón de sargazo (ver cap. 1), en conjunto con un reducido intercambio de agua entre la laguna arrecifal y el mar abierto (por lo menos en el último muestreo) probablemente por las condiciones de viento que ocurren en verano, y otras variables ambientales y fisicoquímicas no evaluadas en este estudio.

Se encontró que las muestras de agua del arrecife frontal fueron las más diversas y con mayor número de ASVs hacia el mes de julio. Los resultados de mayor diversidad en el agua del arrecife frontal del muestreo de julio, se pudo deber al cambio de las condiciones del agua por el efecto acumulado de la presencia del sargazo y al bajo recambio de agua de la laguna arrecifal, así como una mayor temperatura del agua. Mientras que la mayor diversidad de la comunidad bacteriana asociada al sargazo del arrecife frontal comparado con el sargazo del

arrecife posterior, podría explicarse por las condiciones fisicoquímicas propias de la laguna arrecifal, así como al tiempo de deriva de los manchones de esta macroalga, lo cuál implica un tiempo mayor de exposición a la radiación solar y a la desecación de los mantos de sargazo.

A pesar de lo anterior, no se encontró una diferencia marcada en la dominancia entre las muestras de agua del arrecife frontal y posterior, a excepción del agua del muestreo de abril que fue el menor valor calculado. Mientras que en las muestras de sargazo del arrecife frontal se encontró una dominancia similar en su comunidad de bacterioplancton, aunque con una mayor diversidad en comparación al sargazo del arrecife posterior, siendo mas evidente en el mes de julio.

Los resultados obtenidos no indican la detección de grupos bacterianos anómalos que pudieran ser transportados con el sargazo, al menos de los géneros que pudieron ser identificados. Tampoco se ha reportado que el sargazo sea una fuente de bacterias poco comunes; de hecho, los muestreos realizados indican que la diversidad de la comunidad bacteriana asociada al sargazo fue similar que la del agua circundante en el arrecife posterior, aunque en el arrecife frontal se observó una diversidad un poco mayor que la del agua circundante.

V.1.3 Género *Vibrio*, el pasajero más abundante de la comunidad de bacterioplancton transportada por sargazo.

La clase Alphaproteobacteria se presentó en mayor abundancia en el agua de mar, seguida de Bacteroidia, también comunes en muestras ambientales (Kirchman, 2018). Además, se encontraron en alta abundancia la clase Cyanobacteriia y Acidimicrobiia. Las Cyanobacteriias son de importancia en procesos de oxigenación (Cornet et al., 2018) y su presencia se ha reportado en la superficie de macroalgas (Florez et al., 2017), incluyendo al sargazo (Hervé et

al., 2021). La clase Acidimicrobiia es de interés en este tipo de estudios, ya que su crecimiento óptimo es a un pH menor a 2.0 y estudios recientes han encontrado que la descomposición del sargazo en la costa genera una reducción del pH (Rodríguez-Muñoz et al., 2021; Vázquez-Delfín et al., 2021) que este grupo podría aprovechar.

En el sargazo se encontró que la clase más abundante fue la Gammaproteobacteria, clase que parece ser ubicua dentro del microbioma del sargazo (Michotey et al., 2020; Serebryakova et al., 2018). Dentro de esta clase, estuvieron presentes el género *Photobacterium* y *Vibrio* de la familia Vibrionaceae. Vale la pena resaltar la presencia del género *Photobacterium*, ya que este es el primer reporte en el que se encuentra formando parte de la comunidad del microbioma del sargazo; además, está implicado en grandes pérdidas en la industria piscícola (Magarinos, 2001). Sin embargo, *Vibrio* dominó en gran medida la comunidad de bacterioplancton de la macroalga, con un porcentaje de abundancia mayor al 50 %, en contraste con el porcentaje global de este género (6.1 %) reportado en estudios de sargazo del Caribe (Michotey et al., 2020). Este incremento está de acuerdo con la hipótesis planteada de que la comunidad de *Vibrio* incrementa cada vez que las balsas de sargazo se acercan a la costa (Michotey et al., 2020), aunque la disminución de este género hacia el mes de julio, hace suponer que el incremento en la temperatura llega a ser desfavorable.

Aunado a lo anterior, la abundancia del género *Vibrio* en muestras del agua de mar es mucho menor, lo que lleva a suponer que *Vibrio* podría estar siendo acarreado con el sargazo o verse favorecido en su crecimiento, dado que este género es capaz de aprovechar diversas formas de materia orgánica (Lee et al, 2016). También, el sargazo pelágico libera cantidades importantes de materia orgánica que podría favorecer la colonización por bacterias (Powers et al, 2017).

La mayor abundancia de *Vibrio* asociada a sargazo pelágico, como se mencionó anteriormente, fue descrita en estudios en el Atlántico central, cerca de las islas del Caribe (Michotey et al, 2020). Estos mismos autores mencionan que un estudio previo de Torralba y

colaboradores (2017) realizado en el Golfo de México, no se había detectado *Vibrio*.

Desafortunadamente, el tipo de estudio que realizamos no permite determinar con confianza qué especies de *Vibrio* fueron las más abundantes. Sin embargo, algunas especies potencialmente patogénicas de *Vibrio*, asociadas a sargazo han sido reportadas, incluyendo *V. parahaemolyticus*, *V. alginolyticus* y *V. campbellii* (Michotey et al, 2020). Los resultados de este trabajo nos permiten sugerir que tener un monitoreo constante durante las arribazones de sargazo ayudaría a determinar si la presencia de especies patógenas de *Vibrio* por medio de cultivos específicos (Hara-Kudo et al., 2001) llegan a detectarse en abundancias importantes, de modo que pudieran representar un riesgo de salud para la población o incluso para invertebrados y macroalgas presentes en el sistema arrecifal y lagunar. Es importante considerar que los cebadores que se emplean en estudios de secuenciación masiva generan un sesgo, por lo que los resultados deben tomarse con cautela y verificarse con marcadores más específicos para grupos de interés, como podría ser los géneros *Vibrio* y *Photobacterium*. También de resaltar es la presencia del género *Photobacterium*, ya que está implicado en grandes pérdidas en la industria piscícola y este es el primer trabajo en el que se reporta este grupo de bacterias como parte de la comunidad del microbioma del sargazo.

CONCLUSIONES.

La comunidad bacteriana asociada al sargazo pelágico del arrecife frontal y posterior es diferente a la del agua de mar circundante, y está dominada por el género *Vibrio*.

Las arribazones progresivas de sargazo pelágico en el año, van generando un cambio en la comunidad de bacterioplancton diversificándose ligeramente, lo que puede llegar a influir en las bacterias que llegan a asociarse con invertebrados y macroalgas.

VI. REFERENCIAS.

- Baker-Austin C, Trinanes J, Taylor N, *et al.* (2013) Emerging *Vibrio* risk at high latitudes in response to ocean warming. *Nature Climate Change* 3: 73–77.
- Burke C, Kjelleberg S, Thomas T (2009) Selective Extraction of Bacterial DNA from the Surfaces of Macroalgae. *Applied and Environmental Microbiology* 75: 252–256
- Callahan BJ, McMurdie PJ, Rosen MJ, Han AW, Johnson AJ, Holmes SP (2016) DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods* 13: 581–583
- Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J, Bittinger K, Bushman FD, Costello EK, Fierer N, Peña AG, Goodrich JK, Gordon JI, Huttley GA, Kelley ST, Knights D, Koenig JE, Ley RE, Lozupone CA, McDonald D, Muegge BD, Pirrung M, Reeder J, *et al.* (2010) QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature Methods* 7: 335–336
- Cornet L, Wilmotte A, Javaux EJ, Baurain D (2018) A constrained SSU-rRNA phylogeny reveals the unsequenced diversity of photosynthetic Cyanobacteria (Oxyphotobacteria). *BMC Research Notes*, 11: 435.
- Dobretsov S, Dahms HU, Harder T, Qian PY (2006) Allelochemical defense against epibiosis in the macroalga *Caulerpa racemosa* var. *turbinata*. *Marine Ecology Progress Series* 318: 165-175.
- Egan S, Harder T, Burke C, Steinberg P, Kjelleberg S, and Thomas T (2013) The seaweed holobiont: understanding seaweed–bacteria interactions. *FEMS Microbiology Reviews* 37: 462–476.
- Ezenwa VO, Gerardo NM, Inouye DW, Medina M, Xavier JB (2012) Microbiology. Animal behavior and the microbiome. *Science* 338: 198-199

- Florez JZ, Camus C, Hengst MB, Buschmann AH (2017) A functional perspective analysis of macroalgae and epiphytic bacterial community interaction. *Frontiers in Microbiology* 8: 2561.
- Hara-Kudo Y, Nishina T, Nakagawa H, Konuma H, Hasegawa J, Kumagai S (2001) Improved method for detection of *Vibrio parahaemolyticus* in seafood. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 5819–5823
- Hervé V, Lambourdière J, René-Trouillefou M, Devault DA, Lopez PJ (2021) *Sargassum* differentially shapes the microbiota composition and diversity at coastal tide sites and inland storage sites on Caribbean Islands. *Frontiers in Microbiology* 12: 701155.
- Katoh K, Standley DM (2013) MAFFT multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability. *Molecular Biology and Evolution* 30: 772–780
- Kirchman, DL (2018) Processes in microbial ecology. Oxford University Press. 2da Ed. Cap 4: pp 62.
- Lederberg J (2000) Infectious history. *Science* 288: 287–293
- Lee STM, Davy SK, Tang SL, Kench PS (2016) Mucus sugar content shapes the bacterial community structure in thermally stressed *Acropora muricata*. *Frontiers in Microbiology* 7: 371.
- Magarinos B, Couso N, Noya M, Merino P, Toranzo AE, Lamas J (2001) Effect of temperature on the development of pasteurellosis in carrier gilthead seabream (*Sparus aurata*) *Aquaculture* 195: 17-21
- McMurdie PJ, Holmes S (2013) Phyloseq: an R package for reproducible interactive analysis and graphics of microbiome census data. *PloS One* 8: e61217
- Michotey V, Blanfuné A, Chevalier C, Garel M, Diaz F, Berline L, Le Grand L, Armougom F, Guasco S, Ruitton S, Changeux T, Belloni B, Blanchot J, Ménard F, and Thibaut T

- (2020) In situ observations and modelling revealed environmental factors favouring occurrence of *Vibrio* in microbiome of the pelagic *Sargassum* responsible for strandings. *Science of the Total Environment* 748: 141216.
- Monroy-Velázquez LV, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Aguiar T, Solís-Weiss V, Briones-Fourzan P (2019) Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon. *Journal of Environmental Management* 252: 109650
- Rodríguez-Muñoz R, Muñiz-Castillo AI, Euán-Avila JI, Hernández-Núñez H, Valdés-Lozano DS, Collí-Dulá RC, Arias-González JE (2021) Assessing temporal dynamics on pelagic *Sargassum* influx and its relationship with water quality parameters in the Mexican Caribbean. *Regional Studies in Marine Science* 48: 102005.
- Oksanen (2009) [Ordination and Analysis of Dissimilarities: Tutorial with R and vegan](http://www.pelagicos.net/MARS6910_spring2015/manuals/R_vegan_ordination.pdf).
http://www.pelagicos.net/MARS6910_spring2015/manuals/R_vegan_ordination.pdf
- Parada AE, Needham DM, Fuhrman JA (2016) Every base matters: assessing small subunit rRNA primers for marine microbiomes with mock communities, time series and global field samples. *Environmental Microbiology* 18: 1403–1414
- Powers LC, Hertkorn N, McDonald N, Schmitt-Kopplin P, Del Vecchio R, Blough NV, Gonsior M (2019) *Sargassum* sp. act as a large regional source of marine dissolved organic carbon and polyphenols. *Global Biogeochemical Cycles* 33: 1423-39.
- Price MN, Dehal PS, Arkin AP (2010) FastTree 2--approximately maximum-likelihood trees for large alignments. *PloS One* 5: e9490
- Rognes T, Flouri T, Nichols B, Quince C, Mahé F (2016) VSEARCH: a versatile open source tool for metagenomics. *PeerJ* 4: e2584
- Serebryakova A, Aires T, Viard F, Serrão EA, Engelen AH (2018) Summer shifts of bacterial communities associated with the invasive brown seaweed *Sargassum muticum* are location and tissue dependent. *PloS One* 13: e0206734.

- Shoemaker KM, Moisander PH (2015) Microbial diversity associated with copepods in the North Atlantic subtropical gyre. *FEMS Microbial Ecology* 7: fiv064
- Tanaka MO, Leite FPP (1998) The effect of sieve mesh size on the abundance and composition of macrophyte-associated macrofaunal assemblages. *Hydrobiologia* 389: 21–28
- Torralba MG, Franks JS, Gomez A, Yooseph S, Nelson KE, Grimes DJ (2017) Effect of Macondo Prospect 252 oil on microbiota associated with pelagic *Sargassum* in the northern Gulf of Mexico. *Microbial Ecology* 73: 91-100.
- Turnbaugh PJ, Hamady M, Yatsunenko T, Cantarel BL, Duncan A, Ley RE, Sogin ML, Jones WJ, Roe BA, Affourtit JP, *et al.* (2009) A core gut microbiome in obese and lean twins. *Nature* 457: 480–484
- Turnbaugh PJ, Ley RE, Hamady M, Fraser-Liggett CM, Knight R, Gordon JI (2007) The human microbiome project. *Nature* 449: 804–810
- Vázquez-Delfín E, Freile-Pelegrín Y, Salazar-Garibay A, Serviere-Zaragoza E, Méndez-Rodríguez LC, Robledo D (2021) Species composition and chemical characterization of *Sargassum* influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *The Science of the Total Environment* 795: 148852.
- Wahl M, Goecke F, Labes A, Dobretsov S, Weinberger F (2012) The second skin: ecological role of epibiotic biofilms on marine organisms. *Frontiers in Microbiology* 3: 292.
- Wickham H (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>

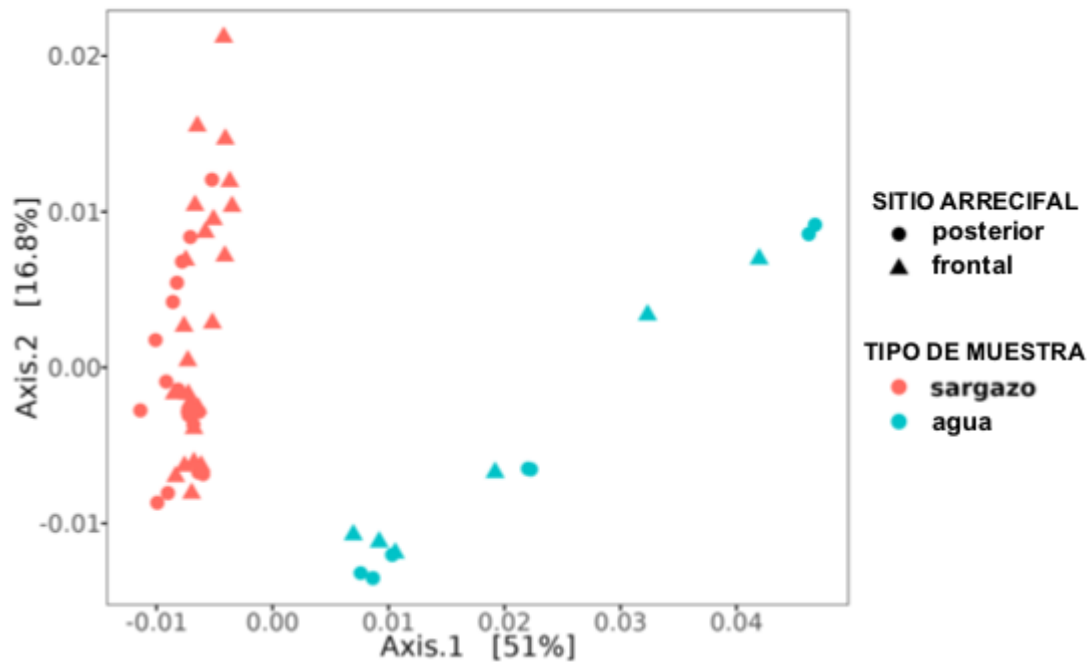
FIGURAS

Fig. 1. Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de muestras de agua y sargazo, basados en la distancia UniFrac ponderada. Una menor distancia entre puntos equivale a una mayor similitud entre muestras. Frontal: arrecife frontal, de cara a la laguna arrecifal. Posterior: arrecife posterior, de cara al mar abierto. Los colores similares representan muestras independientes en cada muestreo.

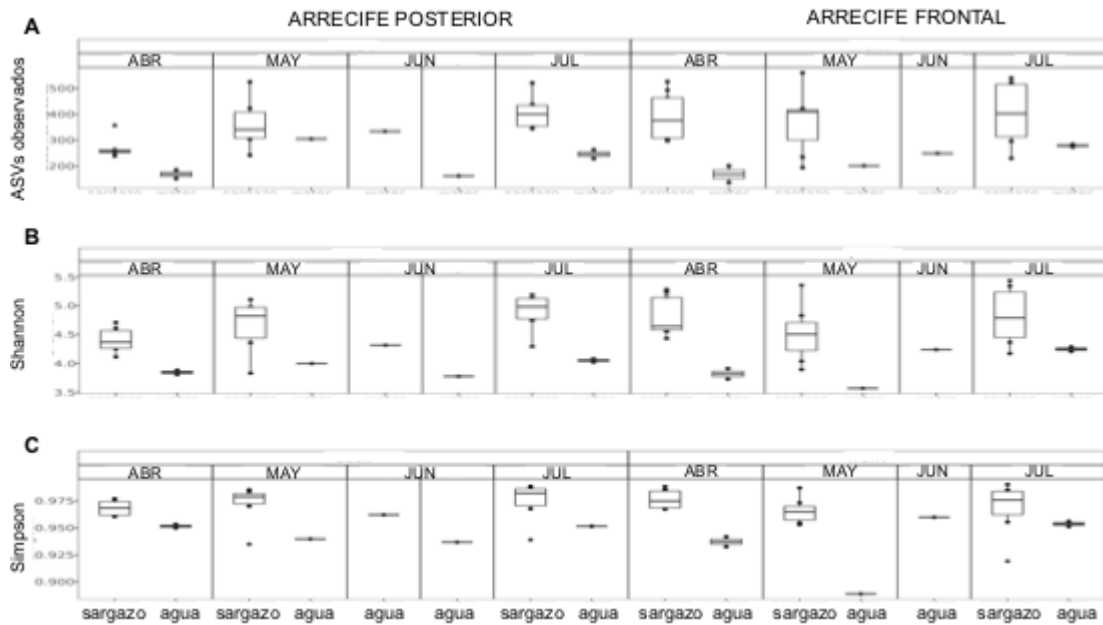


Fig. 2. Gráfica de cajas y bigotes (box plot) del número de especies observadas e índices de diversidad. (A) número de especies observadas (ASVs), (B) índice de Shannon y (C) índice de Simpson de la comunidad de bacterioplankton en muestras de sargazo y agua en el arrecife frontal y posterior durante los muestreos en el tiempo (ABR, 21 de abril; MAY, 18 de mayo; JUN, 11 y 24 de junio [solo agua]; JUL, 2 de julio).

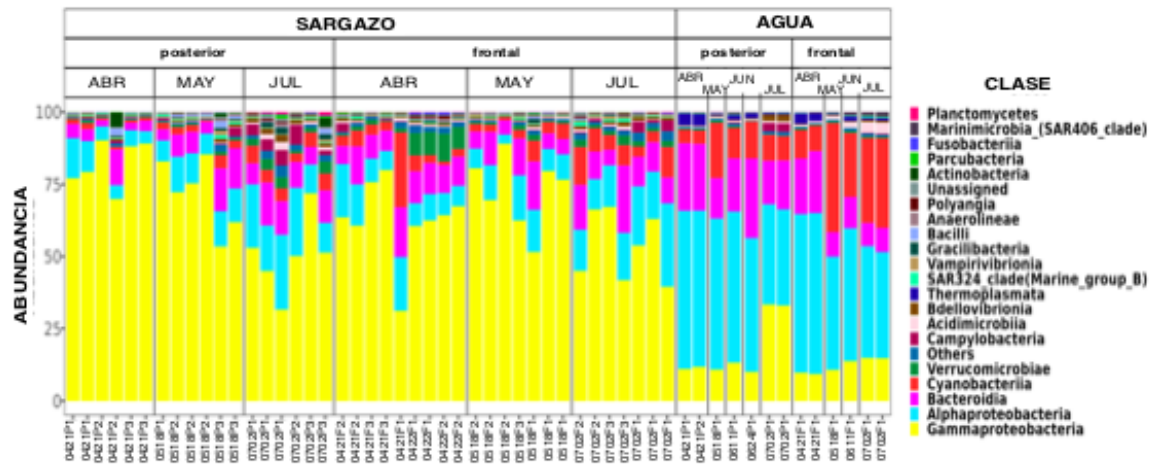


Fig. 3. Composición taxonómica del bacterioplancton a nivel de clase en muestras de *Sargassum* y agua circundante. Las barras con mayor volumen por color, indican una abundancia relativa mayor. Los muestreos se realizaron en las zonas posterior y frontal respecto a la cresta arrecifal. Los meses indican los muestreos en el tiempo y la fecha de muestreo se indica en la abscisa. La abundancia es relativa, calculada respecto al número total de clases dentro de una misma muestra.

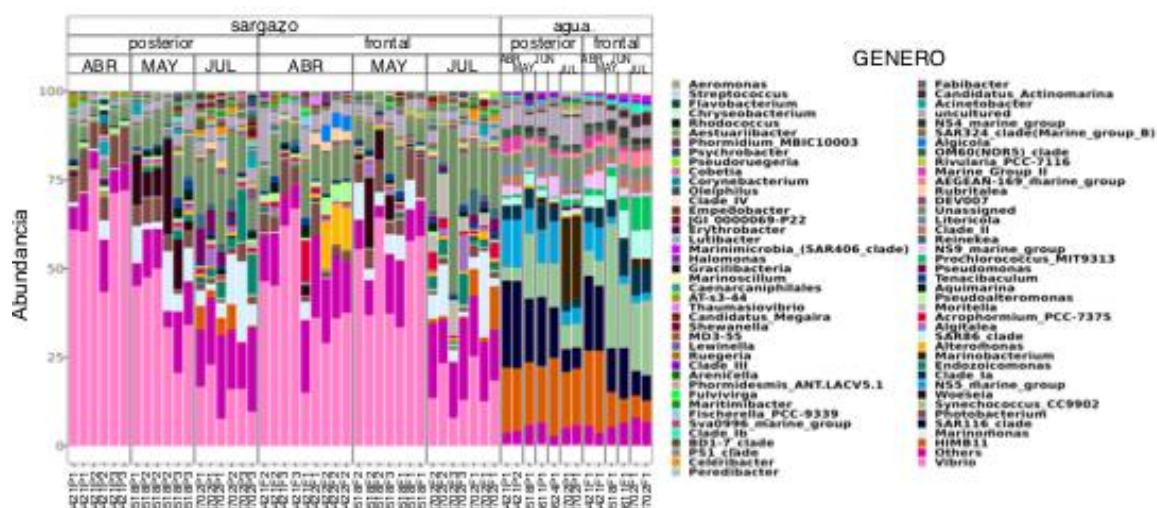


Fig. 4. Composición taxonómica del bacterioplancton a nivel de género en muestras de *Sargassum* y agua circundante. Las barras con mayor volumen por color, indican una abundancia relativa mayor. Los muestreos se realizaron en las zonas posterior y frontal respecto a la cresta arrecifal. Los meses indican los muestreos en el tiempo y la fecha de muestreo se indica en la abscisa. La abundancia es relativa, calculada respecto al número total de clases dentro de una misma muestra.

Tabla 1. Índices de diversidad por muestra. La identidad de cada muestra corresponde a los muestreos 1 (21 de abril, M1), 2 (18 de mayo, M3) y 6 (2 de julio, M6) realizados en 2021. Los muestreos de agua incluyeron también muestras del 11 y 24 de junio (M4 y M5).

ID	Muestreo	Tipo	Sitio	Muestra	ASV Obs	Shannon	Simpson
M1-1-2	2021-04-21	agua	frontal	ABR-210421AF1	200	3.8	0.935
M2-1-2	2021-05-18	agua	frontal	MAY-210518AF1	200	3.6	0.880
M4-2	2021-06-11	agua	frontal	JUN-210611AF1	250	4.2	0.955
M6-1-2	2021-07-02	agua	frontal	JUL-210702AF1	295	4.3	0.955
M1-4 a 6	2021-04-21	agua	posterior	ABR-210421AP1	360	3.9	0.950
M2-5-6	2021-05-18	agua	posterior	MAY-210518AP1	505	4.0	0.935
M4-4	2021-06-11	agua	posterior	JUN-210611AP1	310	4.4	0.960
M5-4	2021-06-24	agua	posterior	JUN-210624AP1	160	3.7	0.935
M6-5-6	2021-07-02	agua	posterior	JUL-210702AP1	290	4.0	0.950
M1-7a14	2021-04-21	sargazo	frontal	ABR-210421SF1-3	360	4.6	0.975
M2-7a13	2021-05-18	sargazo	frontal	MAY-210518SF1-3	305	4.5	0.965
M6-7a14	2021-07-02	sargazo	frontal	JUL-210702SF1-3	360	4.8	0.975
M1-16 a 23	2021-04-21	sargazo	posterior	ABR-210421SP1-3	350	4.4	0.970
M2-16 a 23	2021-05-18	sargazo	posterior	MAY-210518SP1-3	505	4.8	0.980
M6-16 a 24	2021-07-02	sargazo	posterior	JUL-210702SP1-3	505	5.0	0.985

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 4

Ictiofauna

Martínez López, I.G., van Tussenbroek, B. I.

Resumen

Se analizó la composición de la ictiofauna asociada a especies pelágicas de *Sargassum* (sargazo) en la costa del Caribe mexicano febrero del 2021 y marzo del 2022 en mantos a la deriva por medio del uso de dispositivos remotos de video (RUVs). Los videos se dividieron en clips de 10 minutos y cada clip se consideró una muestra. A partir de los videos se determinó la especie y su abundancia con el uso del Índice MaxN. Se analizaron un total de 15 videos correspondientes a un total de 150 minutos en los que se identificaron un total de 15 especies de 7 familias (Carangidae, Kyphosidae, Balistidae, Monacanthidae, Sphyrnidae, Pomacentridae, Acanthuridae); ninguna especie fue de nuevo registro en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. La familia mejor representada fue la familia Carangidae con siete especies seguida de la familia Balistidae con dos especies, en su mayoría juveniles para todas las especies. Este estudio constituye hasta ahora una de las pocas aproximaciones para conocer la ictiofauna asociada a mantos de sargazo pelágico que arriba a las costas del Caribe. El uso de los RUVs probó ser una técnica eficaz para registrar las especies de ictiofauna sin la alteración o disturbio como podrá ocurrir cuando son observados por buzos.

I. INTRODUCCIÓN

Los mantos a la deriva de las algas pardas pelágicas del género *Sargassum* (también conocido como sargazo) constituyen un hábitat para una gran diversidad de organismos. Estos mantos flotantes de sargazo son particularmente importantes para la supervivencia de varias especies de peces, muchos en su estadio temprano. Estudios previos en el Mar de los Sargazos y el Golfo de México, establecieron que estos mantos constituyen sitios de crianza para más de 100 especies de peces, incluidos algunos de importancia comercial o recreativa tales como *Coryphaena hippurus* (dorado), *Caranx* spp. (jurel), *Seriola* spp. (coronado o pez limón), (Dooley, 1972; Bortone *et al.*, 1977; Moser *et al.*, 1998; Wells y Rooker, 2004). Los mantos de sargazo, además, pueden actuar como medio de transporte y dispersión para los peces típicamente asociados a estas algas tales como el pez de los sargazos *Histrio histrio* entre otros (Dooley, 1972; Casazza y Ross, 2008).

Desde el año 2014, el Caribe Mexicano ha experimentado una llegada masiva de sargazo hacia sus costas (Chavez *et al.*, 2020); sin embargo, aún existe poca información sobre la comunidad de peces asociada al sargazo pelágico del Caribe. Monroy Velázquez *et al.* (2019) en su estudio de macrofauna asociada a sargazo que se llevó a cabo por medio de colecta con una red de cuchara durante 2018 en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) reportaron la colecta incidental de cinco especies, todas en estadio juvenil; y uno de ellas, *Syngnathus pelagicus*, fue un nuevo registro para el Caribe mexicano. Cabe notar que estos autores también registraron erróneamente a *Stephanolepis hispidus* como un nuevo registro; sin embargo, esto ya fue mencionado como parte de la ictiofauna en el plan de manejo de Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos con su sinónimo *Monacanthus hispidus* (INE, 2000).

El muestreo para determinar la estructura comunitaria de los peces asociados al sargazo resulta complejo y en muchas ocasiones se debe recurrir a diferentes métodos

(Casazza y Ross, 2008). Es preferible usar métodos de mínima intrusión, ya que el acercamiento de una embarcación, una red, o un buzo con videocámara, podrá asustar a los peces, o los peces con más capacidad de locomoción podrán evitar su captura por medio de una red, razón por la cual optamos por utilizar dispositivos remotos de video (RUVs por sus siglas en inglés: Remote Underwater Video). En el presente informe, se presentan los datos obtenidos por medio de videocámaras, fijadas en boyas a la deriva, de especies de ictiofauna asociadas a los mantos a la deriva de sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano.

Objetivos

- Identificar la ictiofauna asociada a mantos de sargazo pelágicos por medio de videocámaras en el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) en el Caribe mexicano.
- Determinar los diferentes índices propuestos en el protocolo

Hipótesis

- No se revelarán especies de nuevo registro asociadas a los mantos de sargazo

II. METODOS

Se realizaron monitoreos utilizando el método de dispositivos remotos de video (RUVs por sus siglas en inglés: Remote Underwater Video). Para este fin se posicionaron los RUVs en mantos de sargazo en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM, Fig. 1). Se realizaron 14 salidas a campo entre febrero de 2021 y marzo de 2022 para realizar monitoreos con RUVs aunque solo seis de los monitoreos cumplieron con los estándares necesarios para el análisis de los videos (en mayo, junio octubre de 2021 y febrero, marzo de 2022, ver Tabla 1). Los RUVs consistieron en boyas superficiales con GPS (ver capítulo 5) y equipo de video (Fig. 2). Los RUVS se colocaron adentro de un manto de sargazo que, en su conjunto, se desplazaron conforme las direcciones de la corriente, oleaje y viento (ver Cap. 5). El sistema

de video consiste en una cámara Go-Pro9 (black)® con tomas en alta resolución (1080x 1920) y con 60 fotogramas por segundo. Se reinició la toma de video cada 10-12 minutos y la función de estabilización se mantuvo activa (Hyper Smooth). El campo de visión utilizado fue Super View. Durante pruebas preliminares, se realizaron varias pruebas de la posición de la cámara, y la posición fue óptima cuando el lente enfoca una parte de la columna de agua y otra parte del lado inferior del manto de sargazo. Por tal motivo, la estructura utilizada para el montaje de la cámara fue diseñada para mantenerla a aproximadamente 30 cm por debajo del manto de sargazo (Fig. 2). Empleando una embarcación, una vez ubicado un manto de sargazo, se procedió a colocar el dispositivo RUVs, dejándola a la deriva en el manto de sargazo por un lapso mínimo de una hora, y se registraron los datos en la Hoja 1 del Protocolo. Se realizaron también grabaciones de video en esnórquel bajo el manto de sargazo para facilitar la identificación de peces, antes o después de las grabaciones con la cámara en deriva, apuntando la posición del manto (coordenadas GPS) en el momento que se realizaron estas tomas en la hoja de campo.

II.2 Trabajo de laboratorio

II.2.1. Identificación de ictiofauna

En el laboratorio, se revisaron los videos para identificar las especies de peces y su asociación al manto de sargazo. Si fue posible, se anotó si los peces son pasantes o visitantes; i.e., peces que se acercaron a los mantos temporalmente probablemente porque este representó una fuente de comida o refugio temporal.

Se descartaron las tomas del primer minuto del primer video y el último del último video para descartar la posible perturbación provocada al colocar o retirar la cámara, respectivamente. Con fines de estandarización, además se descartaron los primeros y últimos minutos de todos los clips de 12 minutos, resultando en “muestras” de 10 minutos. Para la

identificación de peces se utilizó Froese y Pauly (2011) y Humann y Deloach (2014). La identificación se realizó de ser posible a nivel de especie y su estado (juvenil o adulto). Para determinar la abundancia de cada especie de pez por clip de video, se calculó una métrica basada en el Índice MaxN que es el número máximo de individuos de una especie observados al mismo tiempo en un fotograma del video. Para ello primero se anotan por especie los minutos y segundos, así como los fotogramas donde se observó un (grupo de) peces en el video de acuerdo con las clases de abundancia definidas. Al finalizar el video se seleccionó por especie el valor máximo de abundancia registrado en un fotograma (Hoja 2 del protocolo). Las clases de abundancia son: **solo** (un solo espécimen, valor 1), **pocos** (entre 2 a 10 individuos, valor 6), **muchos** (entre 11 a 100 individuos, valor 55) y **abundantes** (más de 100 individuos, valor 100).

II.3 Análisis de datos

Se calcularon los siguientes índices:

Los videos se dividieron en clips de 10 minutos y cada clip de 10 minutos se considera una muestra. Del listado de las especies y su abundancia (Índice MaxN) en cada muestra (hoja 2), se determinó los siguientes índices de la ictiofauna:

Por muestreo (i.e. todas las tomas siguiendo un mismo manto):

1. Número de especies (sumando las especies en todas las muestras/videos)
2. Número de registros nuevos; i.e., especies de nuevo registro para la localidad (o su área biogeográfica)

Por especie:

3. Frecuencia (por especie o taxón): Número de muestras (clips de video) en que se registró la especie o taxón

4. Frecuencia relativa (por especies o taxón) = [Frecuencia Taxón A / Suma Frecuencias de Taxones A a X] *100.
5. Abundancia (por especie/taxón): Media del valor asignada a cada clase de abundancia en todas muestras
6. Índice de Valor Biológico (IVB) de Sanders) se determina asignando rangos del 1 al 10 a las especies por orden de abundancia en una muestra, si el número de especies en el muestreo son alrededor de 10. Si generalmente hay menos especies presentes se puede fijar este número a 5, o si es mayor se podrá fijar en 20. En el caso de 10 especies, un rango de 1 equivale a un valor de 10 puntos, un rango de 2 corresponde a 9 puntos, y así sucesivamente hasta llegar al rango de 10 que equivale a 1 punto (si hay más de 10 especies, las demás especies/taxones reciben valor 0 para esta muestra). De esta forma, si una especie ocupa el primer lugar en rango en 6 muestras (i.e. 6 clips de video de 10 minutos cada uno), tendrá un valor de 60, o sea el máximo valor posible (Loya Salinas y Escofet 1990).

III. RESULTADOS

Se analizaron un total de 16 videos correspondientes a un total de 150 minutos (Tabla 1) en donde se observó una densidad de peces en promedio de 3.17 ± 10.68 SE individuos por video para la zona frontal y de 2.50 ± 10.08 SE individuos por video para la zona posterior del arrecife (Fig. 3).

La curva de acumulación de esfuerzo de muestreo, la cual muestra el número de especies acumuladas a medida que se incrementa el esfuerzo de muestreo, y que en este caso se basa en los estimadores de especies de Chao 1, Jackknife 1 y Bootstrap, mostró que el número de especies derivados de los videos analizados representan aproximadamente el 60 % de las especies totales esperadas con base a los estimadores. Dicho resultado permite

considerar que el esfuerzo de muestreo fue suficiente para conocer sobre la estructura de la comunidad de peces asociada a mantos de sargazo, pero aumentar el esfuerzo incrementaría la oportunidad de registrar a especies raras (Fig. 4).

III.1 Riqueza específica y abundancia

Se registró un total de 15 especies, distribuidas en 7 familias (Carangidae, Kyphosidae, Balistidae, Monacanthidae, Sphyrnidae, Pomacentridae, Acanthuridae), pero ninguna de ellas fue nuevo registro en el PNAPM (Tabla 1). La familia mejor representada fue la familia Carangidae con siete especies seguida de la familia Balistidae con dos especies, el resto de las familias fue representado por una especie (Tabla 2).

Al considerar la riqueza específica por zonas del arrecife, se registró para la zona frontal un total de 12 especies y una abundancia total de 538 individuos a diferencia de la zona posterior, la cual presentó una riqueza de 4 especies con una abundancia total de 75 individuos (Tabla 3).

Índices de diversidad

La diversidad de peces asociadas a mantos de sargazo mostró valores más altos en la zona frontal del arrecife en comparación con la zona posterior (Tabla 3), lo cual es evidente en el Índice de Shannon-Wiener con un valor de diversidad específica de 1.75 bits para la zona frontal, en comparación de un valor de 0.82 bits para la zona del arrecife posterior. Así mismo, el Índice de diversidad de Margalef que considera el número de especies (S) y el número total de individuos de todas las especies (N) también mostró valores más altos para la zona frontal. Finalmente, el Índice de diversidad de Simpson (Índice de Dominancia) basado en el número de especies y su abundancia relativa, también mostró una mayor dominancia de especies en la zona del arrecife frontal (Tabla 3).

Especies dominantes

De las especies registradas en este estudio, la familia Carangidae mostró la mayor dominancia atribuida principalmente a la especie *Caranx ruber* con un valor de IVB de 124, a las especies pertenecientes a esta familia que no pudieron ser identificadas hasta nivel de especie, así como por otras especies del género *Caranx* como es el caso de *C. bartholomaei*. La familia Balistidae fue la segunda familia dominante conformado por las especies *Canthidermis sufflamen* y *C. maculata*, con valores 42 y 12 respectivamente para el IVB. Se observó también, que las especies con los mayores índices de valor biológico estuvieron asociadas a los mantos de sargazo en la zona del arrecife frontal, mientras que los valores más bajos se registraron en especies observadas en mantos de sargazos en la zona del arrecife posterior, con excepción de la especie de la familia Monacanthidae que no puedo ser identificada hasta nivel de especie (Tabla 2).

Nuevos registros

En este estudio no se tuvieron nuevos registros de peces asociados a mantos de sargazo dentro del PNAPM. Sin embargo, cabe mencionar que Monroy Velázquez *et al.* (2019) reportaron por primera vez al pez *Sygnathus pelagicus* para el Caribe Mexicano, y que es una especie que pasa su ciclo de vida típicamente asociada al sargazo.

IV. DISCUSIÓN

Este estudio constituye hasta ahora una de las pocas aproximaciones para conocer la ictiofauna asociada a mantos de sargazo pelágico que arriba a las costas del Caribe utilizando de manera estandarizada la metodología con dispositivos remotos de video. Los resultados de este estudio evidenciaron tanto una baja riqueza de especies, así como una baja diversidad, incluyendo poca evidencia de especies exóticas con potencial de ser invasivas hasta el momento. Sin embargo, cabe destacar la importancia del sargazo pelágico como hábitat utilizado por invertebrados y peces en sus primeros estadios de vida (Monroy-Velázquez *et al.*, 2019; Casazza y Ross, 2008), por lo cual es importante continuar con una evaluación a una escala espacio temporal más amplia. Además, existe un reporte previo de *Sygnathus pelagicus* como nuevo registro para el Caribe Mexicano que se encontró en muestras colectas de mantos de sargazo pelágico en Puerto Morelos, México (Monroy-Velázquez *et al.*, 2019).

En este estudio, los peces juveniles dominaron la comunidad de peces asociada al sargazo, lo cual coincide con lo reportado en otros estudios para otras regiones del Atlántico (Dooley, 1972; Casazza y Ross, 2008; Wells y Rooker, 2004). Como ocurre con ecosistemas como los pastos marinos, los mantos de sargazo proveen un ambiente con complejidad estructural y con recursos como alimento, que sirven de zonas de crianza para una diversidad de especies de peces, algunos de importancia comercial o recreacional como *Coryphaena hippurus*, *Caranx* spp. y *Seriola* spp. (Casazza y Ross, 2008). La familia Carangidae que incluye al género *Caranx* spp. y *Seriola* spp., constituyó la familia con los índices de importancia biológica más altos en este estudio (Tabla 2). La importancia de peces de la familia Carangidae como parte de la comunidad de peces asociados al sargazo también fue reportada en otros trabajos previos y para otras zonas (Dooley, 1972; Casazza y Ross, 2008; Wells y Rooker, 2004), y por Moritz (2015) en un manto de sargazo varado por varios días en una zona costera en República Dominicana, y quien también reportó especies registradas en este

estudio (*Caranx ruber*, *Seriola dumerili*, *Kyphosus* sp. y *Canthidermis maculata*). Dooley (1972) reportó a la familia Carangidae como uno de los grupos más diversos y numerosos encontrados en el sargazo. Los juveniles de este grupo pueden beneficiarse de la protección que ofrece el sargazo y tener una mayor disponibilidad de recursos en comparación con las condiciones en mar abierto desprovisto de este tipo de sustrato (Casazza y Ross, 2008). Los ejemplares de mayor talla de estas mismas especies progresivamente se desplazan fuera y a una mayor distancia de la protección que provee el sargazo flotante. En los videos analizados, se observó que los juveniles pertenecientes a la familia Carangidae y los juveniles de otras especies, se mantienen por más tiempo y en mayor cercanía al sargazo que flota en superficie (Fig. 4), a diferencia de los adultos grabados en los videos, donde se observan por un menor periodo de tiempo y su presencia es menos común en los videos. Casazza (2008) sugirió que la estrecha asociación a los mantos de sargazo de los peces de tallas más pequeñas sugiere la importancia del sargazo como hábitat de refugio para juveniles al disminuir su depredación. Para peces de mayor talla, como los adultos de jureles, las agregaciones debajo de mantos de sargazo parecen estar más asociadas con la alimentación.

Los peces registrados en los mantos en la zona del arrecife posterior, como *Acanthurus* sp. y *Abudefduf saxatilis*, fueron en su mayoría especies asociadas a ecosistemas bentónicos como los arrecifes coralinos, siendo la presencia de estos peces incidental o bien una asociación de tipo temporal como fue sugerido por Monroy Velázquez *et al.* 2019 para la presencia de juveniles de *A. saxatilis* en muestras de cuchara en mantos de sargazo en Puerto Morelos. En este estudio, los videos y observaciones en esnórquel permitieron observar una asociación temporal de la especie *Sphyraena barracuda* a los mantos de sargazo posiblemente asociada a un aprovechamiento del hábitat como fuente de recursos para la alimentación.

Los videos obtenidos en la zona frontal del arrecife mostraron un mayor número de especies y abundancia con respecto a los videos registrados para la zona posterior (Tabla 3).

Estos cambios en la comunidad de peces asociada a los mantos pueden estar relacionada no solo con los peces presentes en la zona arrecifal donde transita un manto y su posible asociación temporal, sino también a los mismos cambios estructurales que sufre el manto al cruzar la barrera arrecifal. Casazza (2009) sugirió que los cambios en la complejidad estructural que ofrece un hábitat altamente dinámico como los mantos de sargazo puede influir en su comunidad de peces asociada. Esta dinámica continua de los mantos de sargazo resulta en un hábitat complejo de muestrear, por lo que no existe una metodología de muestreo ideal. El uso de sistemas de video tipo RUVs para este estudio, resultó una aproximación adecuada una vez lograda la estandarización del sistema de video con un rango de ajustes ante las diferentes condiciones que puede presentar un manto denso o disperso, por ejemplo. Del total de los 27 videos analizados, en 3 no se observaron peces y 12 videos tuvieron que ser descartados porque el campo de visión del foco de la cámara fue obstruido por sargazo o la cámara quedó lejos del sargazo y los peces no pudieron ser identificados a ningún nivel taxonómico. Es apropiado, además, considerar métodos complementarios como la colecta con redes de necton o bien el uso de más de una cámara al mismo tiempo para considerar a aquellos peces de menor talla y/o que su camuflaje dificulta su detección en los videos.

No hay duda de que los mantos de sargazo constituyen un hábitat importante para la supervivencia de juveniles de muchas especies de peces, por lo que representa un transporte y dispersión para estos organismos, por tal motivo resulta apremiante continuar con los esfuerzos para la detección temprana y diagnóstico de especies exóticas asociadas a los mantos pelágicos de sargazo.

V. CONCLUSIONES

El uso de métodos de dispositivos remotos de video (RUVs) es un método adecuado para identificar la ictiofauna asociada a mantos de sargazo pelágico. El uso de registro de especies de ictiofauna mediante videos resultó una técnica que facilita la evaluación de presencia- ausencia de organismos sin la alteración o disturbio ocasionada por la observación directa. Sin embargo, resulta ideal complementar esta metodología como por ejemplo con censos visuales en campo por medio esnórquel o buceo autónomo, con el fin de evitar perturbar en lo posible los mantos de sargazo. Los resultados de este estudio mostraron para la ictiofauna asociada a los mantos de sargazo en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos una baja riqueza de especies, así como una baja diversidad de especies, en su mayoría juveniles. Especies de la familia Carangidae fueron los peces más comúnmente asociados a los mantos de sargazo (*Caranx ruber*, *C. bartholomaei*, *Seriola dumerili*, *S. rivoliana*, *Elegatis bipinnulata*). Si bien no fue el objetivo analizar diferencias en la ictiofauna asociada a mantos de sargazo muestreados en diferentes zonas arrecifales, se encontró una diferencia en los Índices de riqueza, abundancia y diversidad entre los mantos muestreados en la zona frontal y posterior del arrecife, por lo que, se recomienda la estandarización y sistematización del monitoreo para la detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo para otras áreas con presencia de arribazones de sargazo a lo largo de Caribe mexicano.

VI. REFERENCIAS

- Bortone SA, Hastings PA, Collard SB (1977) The pelagic *Sargassum* ichthyofauna of the eastern Gulf of Mexico. *Northeast Gulf Science* 1: 60–67
- Casazza TL, (2008) Community structure and diets of fishes associated with pelagic *Sargassum* and open-water habitats off North Carolina University of North Carolina Wilmington Master Thesis 135 pp.
- Casazza TL, Ross SW (2008) Fishes associated with pelagic *Sargassum* and open water lacking *Sargassum* in the Gulf Stream off North Carolina. *Fish Bulletin* 106: 348-363
- Chávez V, Uribe-Martínez A, Cuevas E, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Francisco V, ... Silva R (2020) Massive influx of pelagic *Sargassum* spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: challenges and opportunities. *Water* 12: 2908
- CONABIO (2015) Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México. México DF
- https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/221685/Obelia_dichotoma.pdf
- Dooley JK (1972) Fishes associated with the pelagic *Sargassum* complex, with a discussion of the *Sargassum* community. *Contributions of Marine Sciences* 16: 1-32
- Froese R, Pauly D (2011) Fish base. World Wide Web electronic publication.
- <http://www.fishbase.org>
- Hulme PE, Bacher S, Kenis M, Klotz S, Kühn I, Minchin D, Nentwig W, Olenin S, Panov V, Pergl JP, Pyšek P, Roques A, Sol D, Solarz, W, Vilà, M (2008) Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *Journal of Applied Ecology* 45: 403-414
- Humann P, Deloach N (2014) Reef fish Identification. Florida Caribbean Bahamas. New World Publications, Inc. USA.

- INE (Instituto Nacional de Ecología y la comunidad de Puerto Morelos) (2000) Programa de manejo del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, México. SEMARNAT, México. 224pp
- Loya-Salinas D, Escofet A (1990) Contribution to the calculation of the Biological Value Index (Sanders, 1960). *Ciencias Marinas*, 16(2): 97–115 <https://doi.org/10.7773/cm.v16i2.688>
- Instituto Nacional de Ecología (2000) Programa de manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos: México. Instituto Nacional de Ecología, México
- Moritz T (2015) Fishes of a stranded Sargassum meadow at Punta Cana, Dominican Republic *Bulletin of Fish Biology* 15(1):141-146
- Monroy-Velázquez LV, Rodríguez-Martínez RE, van Tussenbroek BI, Aguiar T, Solís-Weiss V, Briones-Fourzan P (2019) Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon. *Journal of Environmental Management* 252: 109650
- Pyšek P, Hulme PE, Simberloff D, Bacher S, Blackburn TM, Carlton JT, Dawson W, Ess F, Foxcroft LC, Genovesi P, Jeschke JM, Kühn I, Liebhold AM, Mandrak NE, Meyerson LA, Pauchard A, Pergl J, Roy HE, Wingfield MJ, Richardson DM (2020) Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews* 95: 1511–1534
- Wells RJD, Rooker JR (2004) Spatial and temporal patterns of habitat use by fishes associated with *Sargassum* mats in the northwestern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science* 74: 81-99

FIGURAS

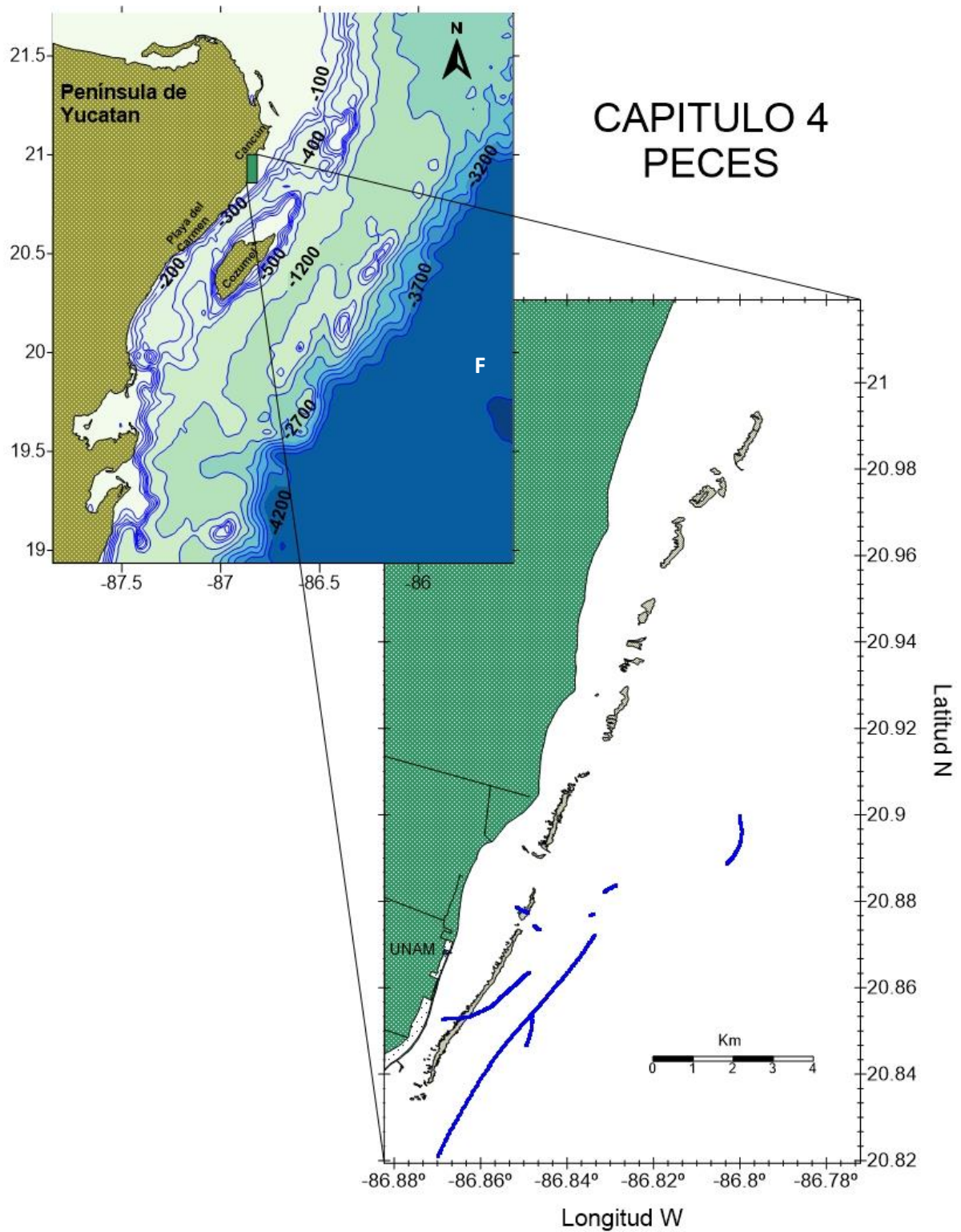


Fig. 1. Mapa de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), indicando todos los trayectos de los dispositivos remotos de video (RUVs).

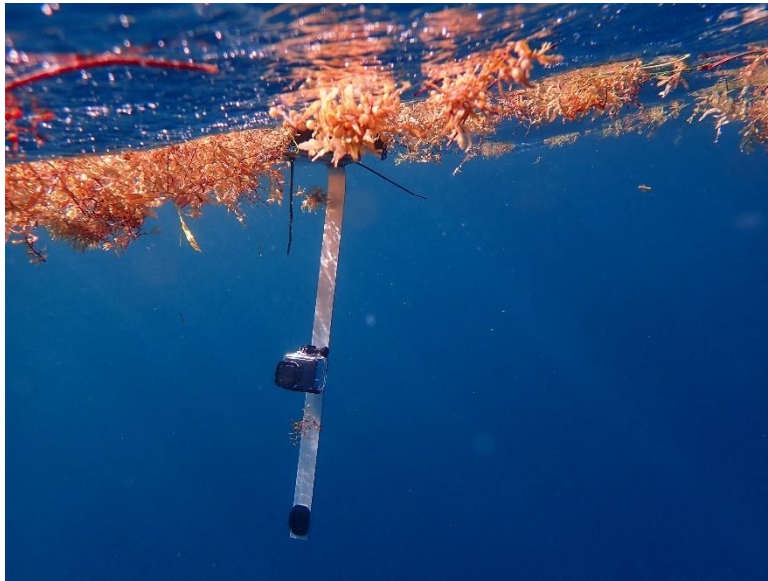


Fig. 2. El sistema RUV utilizado consistió en boyas superficiales con GPS y equipo de video Go-Pro9 (black)®. Aquí se muestra en un manto de sargazo muy escaso.

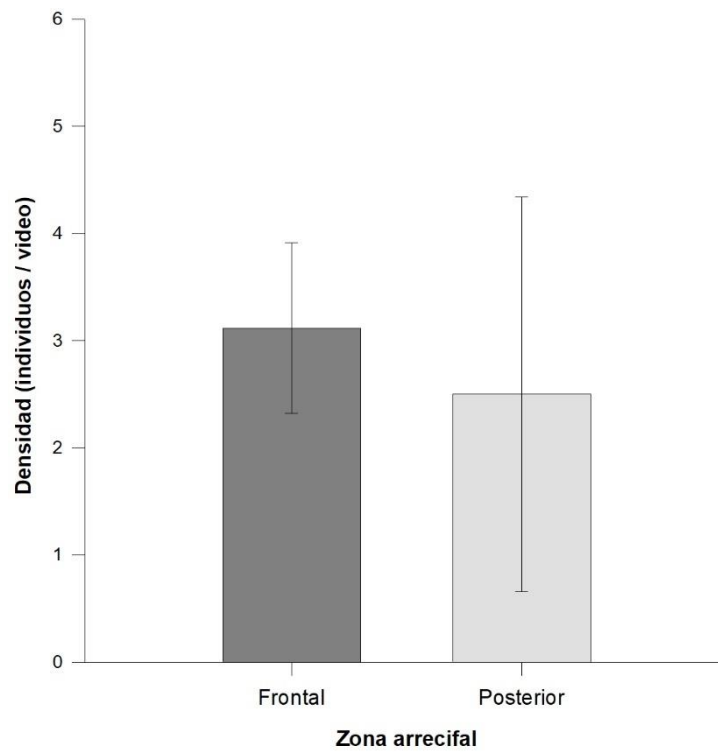


Fig. 3. Densidad de peces por video asociados a mantos de sargazo en la zona arrecifal frontal y posterior del PNAPM, México. El número de individuos fue estimado a partir del valor de MaxN por especie y por video.

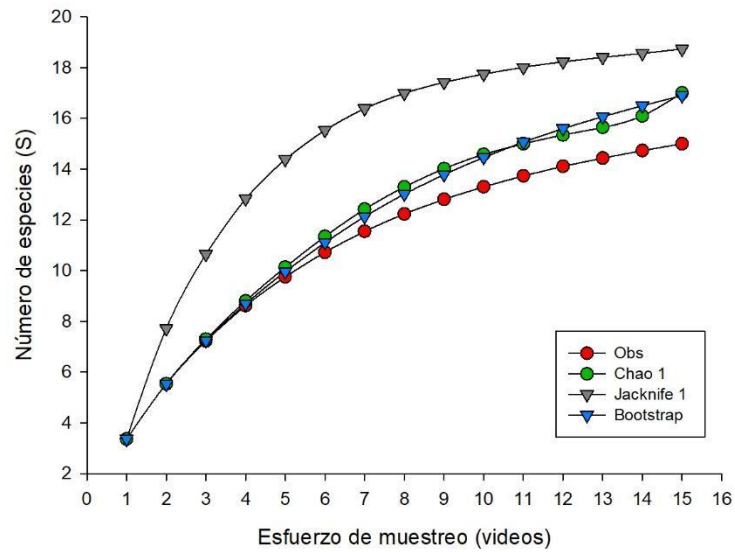


Fig. 4. Curva de acumulación de esfuerzo de muestreo utilizando estimadores de riqueza de especies: Chao 1 (número de especies observadas y el número de especies únicas o duplicadas), Jackknife 1 (número de especies observadas y especies únicas que ocurren en una sola muestra), y Bootstrap (estima las especies observadas y la proporción de especies dominantes).



Fig. 5. Peces juveniles de la familia Carangidae asociados a mantos de sargazo pelágico en el arrecife frontal en el PNAPM, México. Se observan especies como *Caranx ruber*, *C. bartholomaei*, *Elegatis bipinnulata* y *Seriola dumerili*.

Tabla 1. Índices de ictiofauna por muestreo. N=número de muestras (clips de video) por muestreo.

Zona	Código de día de muestreo	Muestreo	Número de especies (S) (N)	Número de registros nuevos (N)	N
Frontal	2021-1	28-05-2021	3	0	1
Frontal	2021-2	24-06-2021	6	0	4
Frontal	2021-3	18-10-2021	2	0	1
Frontal	2022-1	26-02-2022	3	0	1
Frontal	2022-2	08-03-2022	1	0	4
Posterior	2022-2	08-03-2022	4	0	2
Frontal	2022-3	16-03-2022	8	0	2
Total			15	0	15

Tabla 2. Índices por taxón. F: frecuencia, FR: frecuencia relativa, AB: abundancia, IVB: Índice de Valor Biológico de Sanders.

Especie	F	FR	AB	IVB
CARANGIDAE				
Carangidae no id.	4	8	220	40
<i>Caranx ruber</i>	13	26	122	124
<i>Caranx bartholoamei</i>	5	10	30	47
<i>Caranx crysos</i>	1	2	1	8
<i>Caranx</i> sp.	2	4	110	20
<i>Seriola dumerili</i>	4	8	18	29
<i>Seriola rivoliana</i>	2	4	1	10
<i>Elegatis bipinnulata</i>	3	6	18	29
BALISTIDAE				
<i>Canthidermis sufflamen</i>	5	10	7	18
<i>Canthidermis maculata</i>	3	6	3	26
Khyposidae				
<i>Kyphosus</i> sp.	3	6	18	20
Monacanthidae				
Monacanthidae no id.	1	2	1	9
Sphyraenidae				
<i>Sphyraena barracuda</i>	2	4	2	17
Pomacentridae				
<i>Abudefduf saxatilis</i>	1	2	55	10
Acanthuridae				
<i>Acanthurus</i> sp.	1	2	6	9

Tabla 3. Índices por zona. S: riqueza, N: abundancia, d: índice de Margalef, H: índice de Shannon, índice de Simpson.

Zona	Riqueza (S)	Abundancia (N)	d	H'	1-Lamda'
Frontal	12	43.62	2.91	1.75	0.78
Posterior	4	37.5	0.83	0.82	0.44

Anexos

Anexo 1. MaxN (número máximo de individuos de una especie observados al mismo tiempo en un fotograma del video) de la ictiofauna asociada a sargazo en la zona frontal del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos por día de monitoreo. Algunos días incluyen más de una muestra (clip de 10 min).

No.	Especie	Zona	Muestreo						Total (N)
			2021-1	2021-2	2021-3	2022-1	2022-2	2022-2	
1	<i>Acanthurus</i> sp.	Frontal							
2	<i>Abudefdux saxatilis</i>	Frontal							
3	<i>Canthidermis maculata</i>	Frontal						3	3
4	<i>Canthidermis sufflamen</i>	Frontal						7	7
5	Carangidae no id.	Frontal		165			18		183
6	<i>Caranx bartholomaei</i>	Frontal		12				18	30
7	<i>Caranx crysos</i>	Frontal						1	1
8	<i>Caranx ruber</i>	Frontal		73		6		13	92
9	<i>Caranx</i> sp.	Frontal		110	55				165
10	<i>Elegatis bipinnulata</i>	Frontal						18	18
11	<i>Kyphosus</i> sp.	Frontal						18	18
12	Monacanthidae no id.	Frontal		1					1
13	<i>Seriola dumerili</i>	Frontal		1				18	19
14	<i>Seriola rivoliana</i>	Frontal	1						1
15	<i>Sphyraena barracuda</i>	Frontal							
Número de especies (S)			1	6	1	1	1	8	538

Anexo 2. MaxN (número máximo de individuos de una especie observados al mismo tiempo en un fotograma del video) de la ictiofauna asociada a sargazo en la zona posterior del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos por muestreo. El día incluyen más de una muestra (clip de 10 min).

No.	Especie	Zona	Muestreo					Total (N)
			2022-2					
1	<i>Acanthurus</i> sp.	Posterior	6					6
2	<i>Abudefdux saxatilis</i>	Posterior	55					55
3	<i>Canthidermis maculata</i>	Posterior						
4	<i>Canthidermis sufflamen</i>	Posterior						
5	Carangidae no id.	Posterior						
6	<i>Caranx bartholomaei</i>	Posterior						
7	<i>Caranx crysos</i>	Posterior						
8	<i>Caranx ruber</i>	Posterior	12					12
9	<i>Caranx</i> sp.	Posterior						
10	<i>Elegatis bipinnulata</i>	Posterior						
11	<i>Kyphosus</i> sp.	Posterior						
12	Monacanthidae no id.	Posterior						
13	<i>Seriola dumerili</i>	Posterior						
14	<i>Seriola rivoliana</i>	Posterior						
15	<i>Sphyrna barracuda</i>	Posterior	2					2
Número de especies (S)			4					75

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 5

Boyas a la deriva de bajo costo

Gómez Reali, M.A., Escalante Mancera J. E., López Portillo H.J.A

Resumen

Se realizó la construcción de 5 boyas de deriva que pudieran tener el perfil adecuado para lograr el seguimiento de *Sargassum* (sargazo), que además tuvieran la capacidad de montaje de una cámara que permitiera el monitoreo de la fauna móvil asociada a especies pelágicas. Durante el periodo entre febrero del 2021 y marzo del 2022 se lograron hacer más de 14 salidas de campo en las cuales se insertaron estas boyas de deriva construidas con rastreadores (GPS por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*) y envío de mensajes por tecnología celular que permitirían recuperarlas más tarde, todos los datos fueron de las derivas se almacenaron en la memoria interna de las boyas tipo MicoSD con una frecuencia de dos datos por minuto. En nueve de las salidas de campo se encontraron agrupaciones en abundancia de sargazo “balsas de sargazo”, por lo que las boyas instaladas para las derivas contaban con el montaje de una cámara que videograbado en videos cortos de 10 minutos, logrando por salida entre 30 y 40 minutos de video, para más tarde ser analizados para la detección de especies de ictiofauna asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano descrito en el Capítulo 4. Los agrupamientos de sargazo encontrados fueron localizados en la parte frontal del arrecife haciendo el seguimiento con las boyas durante todo su trayecto hasta cruzar la cresta arrecifal para ser recuperadas las boyas en el posterior de la barrera arrecifal. Logrando registrar el rastro de más de 75 horas de derivas de las boyas, así como más de 380 minutos de video y 450 fotos de los recorridos de sargazo.

I. INTRODUCCIÓN

Las corrientes marinas superficiales son generadas principalmente por el esfuerzo del viento sobre la capa somera del océano. Esta interacción entre la atmósfera y el océano se da en todas las escalas y genera una gran variedad de fenómenos como giros oceánicos de gran escala, afloramiento cerca de las costas, oleaje, y derivas superficiales de entre otros eventos.

Para poder observar directamente el fenómeno de las corrientes superficiales en el mar de forma simple, sólo es necesario ver objetos flotantes que deriven con estas y así inferir su velocidad y dirección. Todos los objetos flotantes que no tengan la capacidad de gobernar su movimiento estarán guiados por dichas corrientes, y por ese motivo algunos organismos como el plancton y fitoplancton serán transportados en la superficie como resultado del esfuerzo del viento y la corriente marina, predominante en ese momento.

En la actualidad existen muchas maneras de ver, medir y seguir las corrientes marinas, como son sensores remotos (sensores montados en satélites, aviones, etc) que dan información a gran escala pero con intervalos de tiempo muy espaciados, mediciones *in situ* que permiten registrar las corrientes de forma continua pero sólo en un punto fijo (equipos especializados que pueden medir la corriente de forma mecánica o inferir la corriente por métodos acústica usando el efecto Doppler), y las mediciones de deriva que registran de forma continua su posición (latitud, longitud) con respecto al tiempo que transcurre conforme se mueve con la corriente, permitiendo rastrear en todo momento los objetos flotantes que también son gobernados por el vector resultante del esfuerzo del viento el oleaje y la corriente superficial.

En particular con la deriva del sargazo se ha mostrado en trabajos recientes, que los regímenes de viento, además de los corrientes y oleaje, juegan un papel en la variabilidad temporal en los arribazones de la cantidad de sargazo (Johns et al., 2020). En Puerto Morelos, los vientos alisios del sureste transportan las masas de sargazo acumuladas en la corriente de Yucatán

(paralela a la costa del Caribe mexicano) hacia tierra, mientras que los vientos del norte que dominan en otoño e invierno inhiben el transporte de sargazo a terrestre (García-Sánchez et al., 2020; Rutten et al., 2021).

De lo anterior, se puede decir que la mejor forma de seguir organismos del plancton y fitoplancton como algas y macroalgas en zonas costeras puede ser con un sistema de boyas de deriva, siendo una herramienta que ayudará para saber la trayectoria y así lograr la detección temprana, respuesta rápida y diagnóstico de especies exóticas invasoras como el sargazo pelágico y sus especies asociadas en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR).

Objetivos

- Identificar el tipo y forma de boya de deriva que se comporte y siga la deriva de las balsas de sargazo.
- Determinar la fauna de acompañamiento mediante la instalación de cámaras en las boyas para validar la presencia de estas especies.
- Validar el funcionamiento de los equipos desarrollados “boyas de deriva de bajo costo”.
- Describir el comportamiento de la deriva del sargazo.

Hipótesis

- El perfil de las boyas logrará incorporarse a las balsas del sargazo trazando la deriva hasta su arribo a las playas de Puerto Morelos
- Grabar videos transectos de deriva para identificar las especies asociadas a las balsas de sargazo en la parte frontal y posterior del arrecife.
- Descripción del comportamiento de deriva de las balsas de sargazo asociado a la dirección del viento.

II. MÉTODOS

II.1 Trabajo en el mar

Se realizó un continuo monitoreo en el área Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM, Fig. 1), de acuerdo a lo ya descrito en el protocolo, se buscaron las condiciones

adecuadas para la navegación a mar abierto, y respetando la distancia segura de cobertura de red celular (DSC), 10 km para el caso de Puerto Morelos. Se realizaron continuas salidas de campo en busca de agrupaciones de sargazo las cuales fueron objeto de medición para el seguimiento de la deriva mediante las boyas desarrolladas (Fig. 2) .

Previo haber preparado el material necesario, cargas de baterías y montajes de las boyas , en todas las salidas de se procedió a dirigirse perpendicularmente de la costa hacia mar abierto por la boca más cercana de la laguna arrecifal, realizando una búsqueda en mar abierto de las grandes balsas de sargazo para poder realizar los video transectos, una vez que se detecta alguna balsa de tamaño considerable (Fig. 5), se procedió a insertar en la agrupación de sargazo la baya con los dispositivos remotos de vídeo (RUVS por sus siglas en inglés: Remote Underwater Video). de no haber encontrado agrupaciones considerables pero si la presencia de sargazo se procedió a dejar derivando boyas para conocer su desplazamiento de deriva.

Una vez que se insertan las boyas en la balsas de sargazo se regresaba a costa para hacer un monitoreo de las derivas de forma remota y tomar las mejores decisiones de acuerdo a la dirección que se estuvieran desplazando (Fig. 5), en el caso de las boyas con RUVS se retiran las camaras despues de los 40 minutos ya que por las capacidades de memoria y batería no podrán obtener mayor tiempo de grabación, y en los casos de derivas se mantuvieron hasta por más de 6 horas continuas, retirándose al salir del área de estudio o al estar próximas en llegar a la costa.

De los 24 lances reportados en este informe, se recuperaron todas las veces las boyas haciendo el seguimiento de los pasos de recuperación descritos en el protocolo, así también pudiendo documentar fotográficamente el parche tanto en superficie como subacuática mediante buceo libre (Fig. 3).

II.2 Trabajo de laboratorio

II.2.1. Preparación de la boya

Una vez definidas las posiciones y la cantidad de boyas a llevar a sitio, es necesario realizar los siguientes puntos:

1. De acuerdo con el punto 5.2 del manual, iniciar el software de la estación base y dar de alta la cantidad de boyas y los números telefónicos de las respectivas boyas a utilizar.
2. Preparar a carga completa dos baterías para cada uno de las boyas a utilizar, y la cámara a instalar, es recomendable cargar durante 2 horas previas a su uso.
3. Preparar los chips celulares con saldo y activos, (se recomienda dar de alta como número gratuito al número celular de la base), instalar en las tarjetas GSM.
4. Formatear las tarjetas micro SD e instalarlas en las boyas y las cámaras.
5. Verificar que esté conectada adecuadamente la antena GPS.
6. Montar las baterías en la caja estanca y posteriormente la placa de montaje sin aún conectar las baterías.
7. Tener lista la malla de flotación o flotador, así como cinchos de seguridad.
8. Insertar la batería y memoria micro SD en la cámara, para ajustarla a la base de la boya.

II.2.2. Descarga de datos y procesamiento

Terminada la campaña de campo y son recuperadas con éxito todas las boyas se extrae la información contenida en las memoria micro SD de las boyas y de la cámara, los datos de las derivas serán emparejados con los datos de viento extraídos para esta área de estudio de la

Estación Meteorológica del Servicio Académico de Monitoreo Meteorológico y Oceanográfico (SAMMO), para el periodo que se realizó la campaña de campo.

Los datos de video transectos de los RUVS son almacenados para su revisión con detenimiento por personal especializado en identificación de especies de peces, para proceder a realizar el llenado de la tabla de identificación de especies (Capítulo 4), la cual se puede relacionar con la posición geográfica al obtener el minuto del video y localizar la hora del avistamiento en el archivo generado de derivas. También es posible relacionar los datos de las fotografías iniciales y finales del levantamiento (Fig.5). Las cuáles serán relacionadas en Latitud y Longitud con el inicio y final del transecto respectivamente.

II.2.2. Análisis de los datos obtenidos por la deriva de las boyas

A partir de los datos obtenidos de las boyas de deriva; fecha, hora y su correspondiente punto, latitud y longitud, registrados con una frecuencia de dos datos por minuto, se generó el promedio por minuto de cada serie de tiempo de las derivas, para posteriormente calcular el vector distancia entre dos posición consecutivas (*lat, lon*) y su correspondiente dirección (*theta*). Conociendo la distancia entre los puntos y con la diferencia de tiempo que paso entre un punto y el otro, se puede calcular de manera directa la velocidad parcial entre puntos, como: distancia entre el tiempo. Obteniendo así, vectores de velocidad y dirección del desplazamiento de la boya de deriva, entre un punto y el siguiente. Con las series de tiempo de los datos de velocidad y dirección parciales de las derivas, y se adjuntan los datos de viento (velocidad y dirección) asociados para los mismos tiempos, datos medida con la estación meteorológica (<https://sammo.icmyl.unam.mx/>) que se ubica en el muelle de la UASA, UNAM. (Fig. 1).

Con ambas velocidades (deriva promedio y viento promedio) se efectúa una relación porcentual que nos da un indicador del aporte que tiene el viento en el desplazamiento de las balsas de sargazo, para dos diferentes condiciones de viento; en un caso con condiciones de viento sostenido y moderadamente alto, y el otro caso, con muy poco viento, (Fig.7 y 10).

III. RESULTADOS

Los sistemas de boyas a la deriva fueron implantados durante más de 14 salidas de campo en las cuales se realizaron seguimiento con línea de vista para las primeras prácticas de deriva con el fin de determinar que sea adecuado el perfil de arrastre con corrientes y por viento, posteriormente se procedió a insertar las boyas en diferentes condiciones, tanto con sargazo como sin él, así como en parches de diferente tamaño a los mismos tiempos con el fin de analizar visualmente los transectos generados con los archivos .kml de resultados (Fig. 6), los cuales muestran información de que los parches tienen predominante movimiento en dirección del viento, corroborando lo escrito respecto al transporte de sargazo (García-Sánchez et al., 2020; Rutten et al., 2021). Se analizaron las 75 horas de deriva de las boyas (Fig. 1), obteniendo el análisis de las diferentes posibilidades de deriva, con y sin sargazo, y en dos diferentes condiciones de viento; en un caso, en condiciones de viento sostenido y moderadamente alto, velocidad promedio de 5.27 m/s, (Fig. 7) y el otro caso, con muy poco viento o casi en calma, velocidad promedio de 2.35 m/s , (Fig. 10).

III.1 Análisis con viento moderadamente alto, velocidad promedio de 5.27 m/s.

En este caso no se encontró sargazo y las boyas derivaron con la velocidades de viento no mayores a 5 m/s y direcciones cambiantes del Sureste al Noroeste(Fig.7), las condiciones prevalecientes de viento promedio de 5.27 m/s durante las derivas de tres boyas de deriva para

ese periodo (Fig. 9), mostrando que las tres boyas de deriva fueron gobernadas y/o conducidas predominantemente por el viento, hasta que cruzaron las boyas el arrecife y su velocidad y dirección cambió por efectos internos de la circulación de la laguna arrecifal. El análisis del efecto del viento sobre la corriente superficial fue descrito por el trazo de tres boyas de deriva (Fig. 9), obteniendo las velocidades por debajo de los .25 m/s y direcciones predominantes al Suroeste (Fig. 8), a partir del promedio de las velocidades del viento y de la deriva, se calculó el porcentaje que corresponde al 2.98% de la velocidad del viento, coincidiendo con varios estudios sobre deriva superficial por viento, donde demuestran que la velocidad de la deriva superficial aumenta linealmente con la velocidad del viento (Kenyon, 1969; Wu, 1983). En esos estudios, estimaron que la deriva superficial correspondió al 1.6% y 3.6% de la velocidad del viento.

III.1 Análisis con viento muy bajo, velocidad promedio de 3.1 m/s.

En este caso se localizaron balsas de sargazo chicas para trazar la deriva, pero con una condición de poco viento, iniciando la deriva con el viento en calma y aumentando la magnitud del viento hasta 3.1 m/s en promedio (Fig. 10) y obteniendo una velocidad promedio de la deriva de corriente de 0.29 m/s, al realizar el cálculo de porcentaje que corresponde al viento que induce la corrientes este aumenta hasta 9.33% saliendo de lo estimado por (Kenyon, 1969; Wu, 1983) de 1.6% a 3.6%. Pero si mostrando que la velocidad de la deriva superficial aumenta linealmente con la velocidad del viento.

III.1 Datos obtenidos por los RUVS

Los datos de video transectos que fueron obtenidos durante 8 derivas con cámara, fueron almacenados para su revisión por personal especializado, logrando obtener más de 450 fotos y 380 horas de video de los transectos los cuales ayudarán a ver las diferencias entre las especies que están asociados a las balsas de sargazo descrito en el capítulo 4 de este

documento, notando mayor abundancia de peces al tener mayor incremento del área de cobertura de las balsas de sargazo.

IV. DISCUSIÓN

Se observó un movimiento particular de la forma que se agrupa el sargazo en especial al acercarse a las costas, donde se podría describir que el movimiento de los parches de sargazo está asociado a la magnitud del viento, cuando el viento es sostenido durante un tiempo prolongado y la velocidades es mayor a 5 m/s, la velocidad de la deriva superficial de la corriente corresponde al 3% de la velocidad del viento. Pero cuando el viento es débil o menor a 2.5 m/s la corriente de deriva superficial ya no se correlaciona con el viento y esta puede ser gobernada por el efecto de las corrientes dominantes oceánicas (corriente de Yucatán) y los factores de fricción por la costa, que pueden presentes contra corrientes o giros de circulación costeros.

Por otra lado, conforme más cercanas se encuentran las balsas de sargazo de las costas, mayoe es su movimiento por efectos del viento, es decir que se establece una relación entre el aporte a la dirección del movimiento del sargazo y la distancia a la costa, esta relación se magnifica al pasar la parte posterior de la barrera arrecifal. Por lo que, es de esperarse que los agrupamientos de especies con los que se acerca a la cresta arrecifal sean cambiantes al entrar a la laguna arrecifal y tener estas diferencias de velocidades por una dinámica local de la laguna arrecifal.

Otra situación que se logro identificar es que existen zonas de agrupamiento del sargazo en las bocanas de la laguna arrecifal, derivado de la compensación que produce la corriente de la salida de esta boca de agua y el efecto del viento que propicia el movimiento hacia la costa, si

es en dirección predominantemente Este el aporte del viento. Por lo que el movimiento del sargazo no se puede ver como un movimiento único para todos los parches de sargazo ya que se encuentran cambios en orientación contra corriente dependiendo de la cantidad que se agrupe, ya que produce un cuerpo más denso y de mayor calado, así como una superficie de mayor arrastre superficial que favorece el movimiento con el viento.

V CONCLUSIONES

Al realizar las diferentes pruebas de campo, se pusieron a prueba tanto el desarrollo de tecnología de las boyas de bajo costo, como el perfil de deriva, de lo que se comprobó que el dispositivo generado para este propósito cumplió cabalmente con los objetivos planteados, y favoreció a hacer el seguimiento del sargazo sin tener pérdidas de datos, así como de ninguna de las boyas de deriva construidas. Derivado del análisis de los datos obtenidos por los puntos dados por el GPS, se logró establecer una fuerte relación entre la velocidad superficial de la corriente y la velocidad del viento medida en ese momento en la costa, logrando también validar el funcionamiento del perfil de deriva al insertar boyas en sitios sin sargazo o poca presencia del mismo, corroborando que el movimiento en las boyas sin sargazo se comporta de manera similar a pequeños fragmentos de sargazo sueltos para pasar a agruparse en los grandes balsas de los arribazones que se desprenden de la corrientada y llegan a las costas de Puerto Morelos.

IV. REFERENCIAS

- García-Sánchez M, Graham C, Vera E, Escalante-Mancera E, Álvarez-Filip L, van Tussenbroek BI (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany* 167: 103275
- Johns EM, Lumpkin R, Putman NF, Smith RH, Muller-Karger FE, Rueda-Roa DT, Werner FE (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: 102269
- Rutten J, Arriaga JA, Montoya LD, Mariño-Tapia IJ, Escalante-Mancera E, Mendoza ET, van Tussenbroek BI, Appendini CM (2021) Beaching and natural removal dynamics of pelagic *Sargassum* in a fringing-reef lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, e2021JC017636.
- Wu, J. (1983). Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *Journal of Physical Oceanography*, 13(8), 1441-1451.
- Kenyon, K. E. (1969). Stokes drift for random gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 74(28), 6991-6994.

FIGURAS

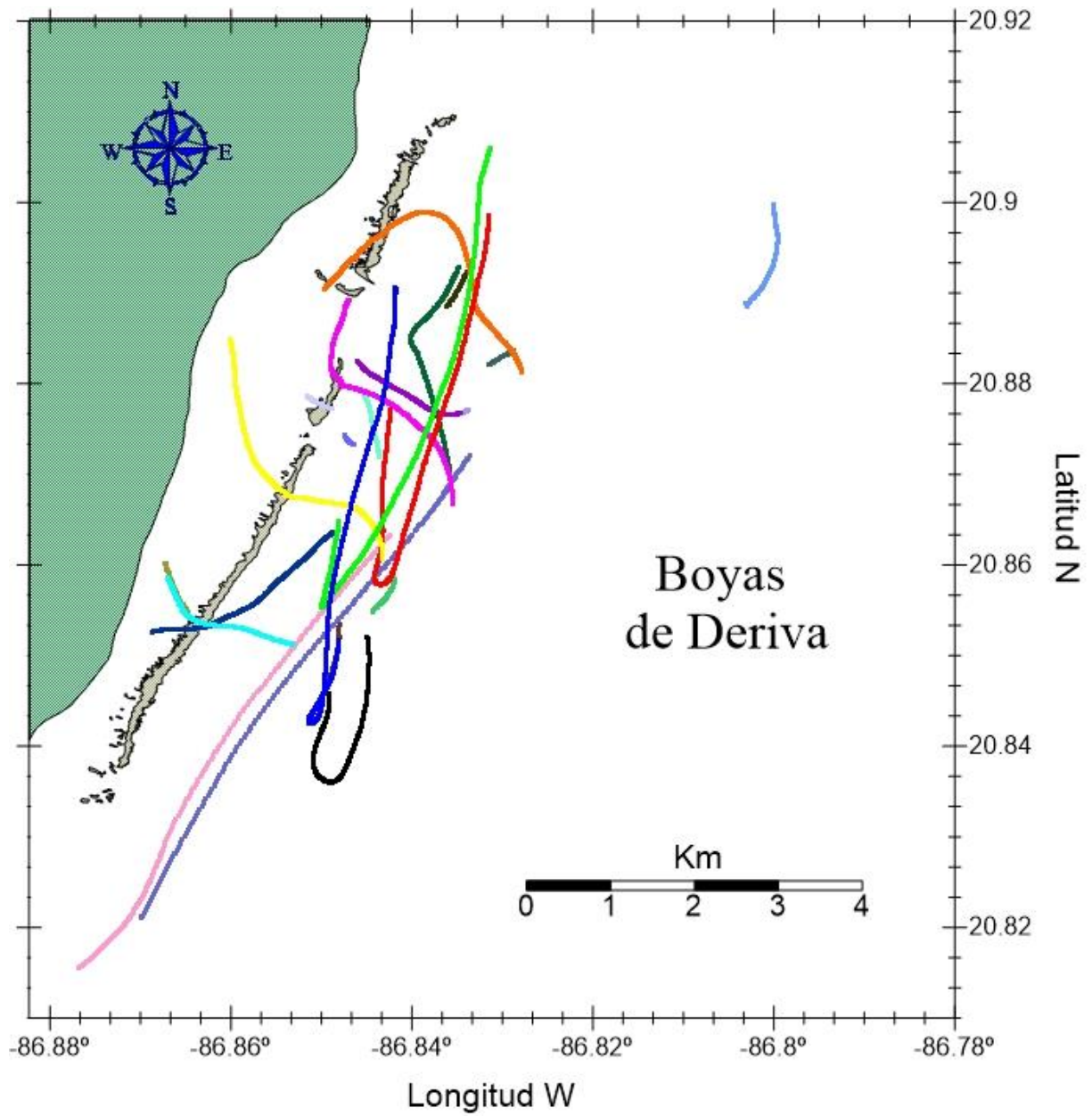


Fig. 1 Área de estudio, trazos de las boyas de deriva para diferentes fechas.

A



B



Fig. 2. Boyas de deriva, con malla para sujeción de sargazo. (A) Vista superior de flotación de boya de deriva; (B) Perfil de flotación de boya superficial para seguimiento de sargazo.

A



B



Fig. 3. Inserción de boya de deriva en balsa de sargazo (A), balsa de sargazo (B)

A



B



Fig. 4. Observación de parches de sargazo. Fotografías al recuperar la boya, para documentar la fauna cercana al parche de sargazo (A), Fotografías del parche de sargazo al momento de insertar la boya para documentar la fauna inicial asociada al sargazo (B) .



Fig. 5. Imágenes con VANT; vuelo de reconocimiento de parches de sargazo. Nótese que en medio de la foto está una embarcación, lancha estándar de 25 pies de largo (~8 metros).



Fig. 6. Archivos kml en imagen de Gogle Earth, salidas de campo y transectos de deriva en balsas de sargazo.

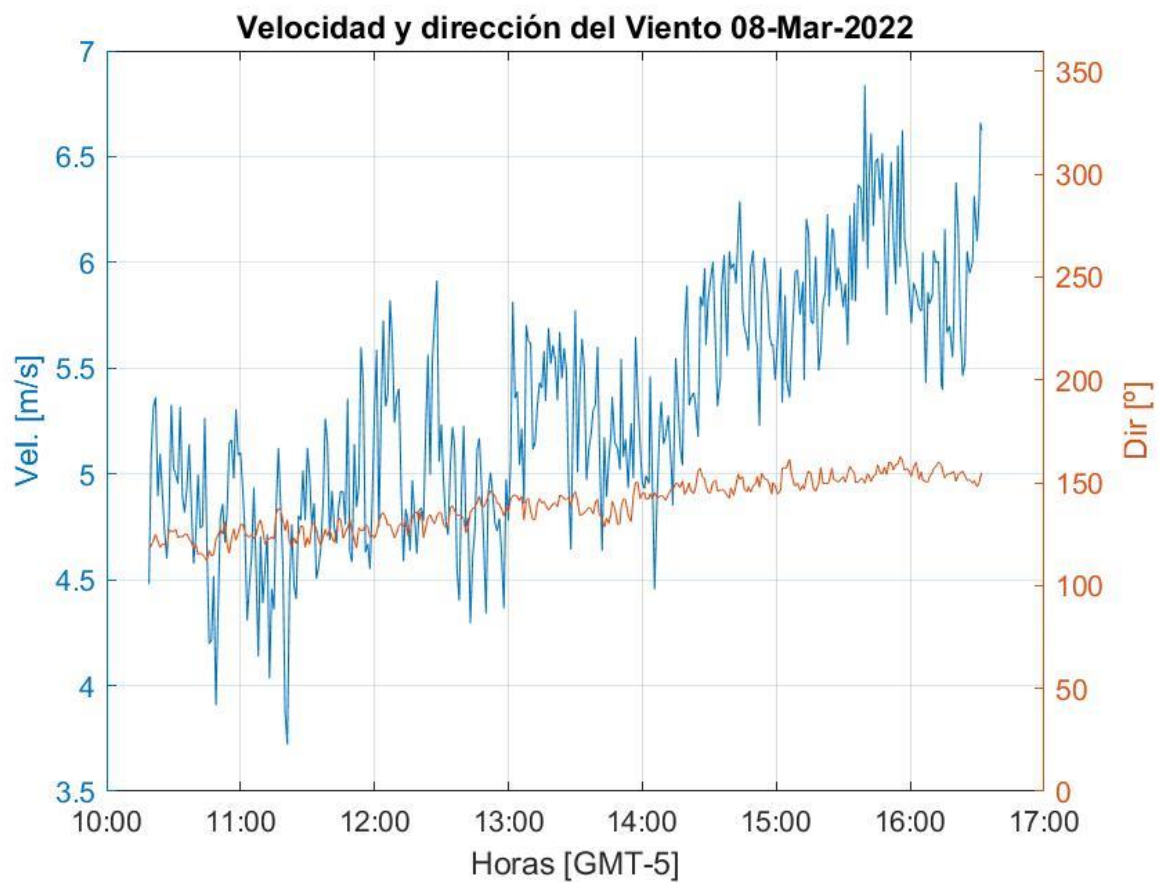


Fig. 7 Velocidad y dirección del viento, condiciones de viento sostenido y moderadamente alto, en promedio 5.27 m/s.

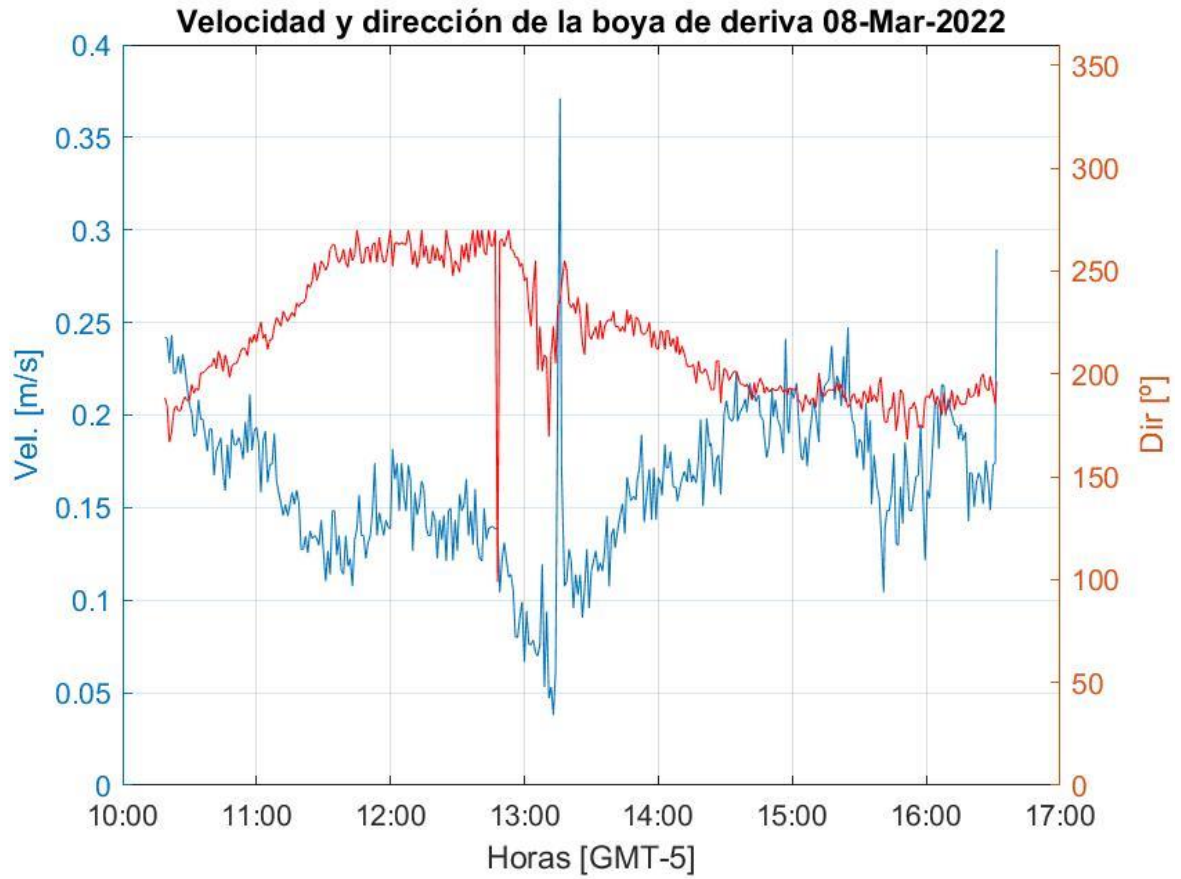


Fig. 8 Velocidad y dirección de la boya de deriva. Velocidad promedio de deriva de 0.15 m/s

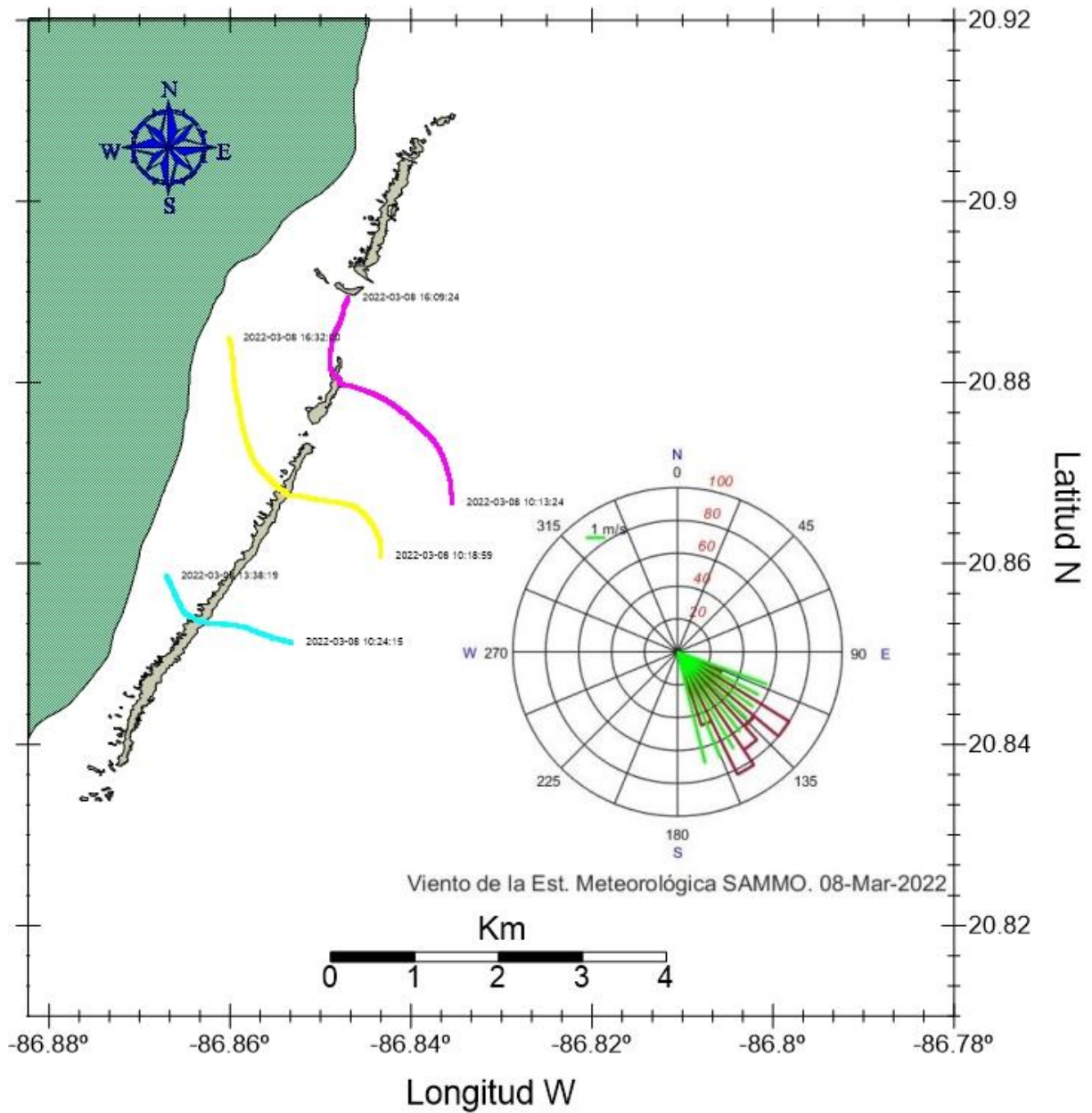


Fig. 9 Derivas con efecto dominante por viento, condiciones de viento sostenido y moderadamente alto, en promedio 5.27 m/s.



Fig. 10 Velocidad y dirección del viento, condiciones de calma, poco viento, en promedio 2.35 m/s.



Fig. 11 Velocidad y dirección de la boya de deriva. Velocidad promedio de deriva de 0.29 m/s

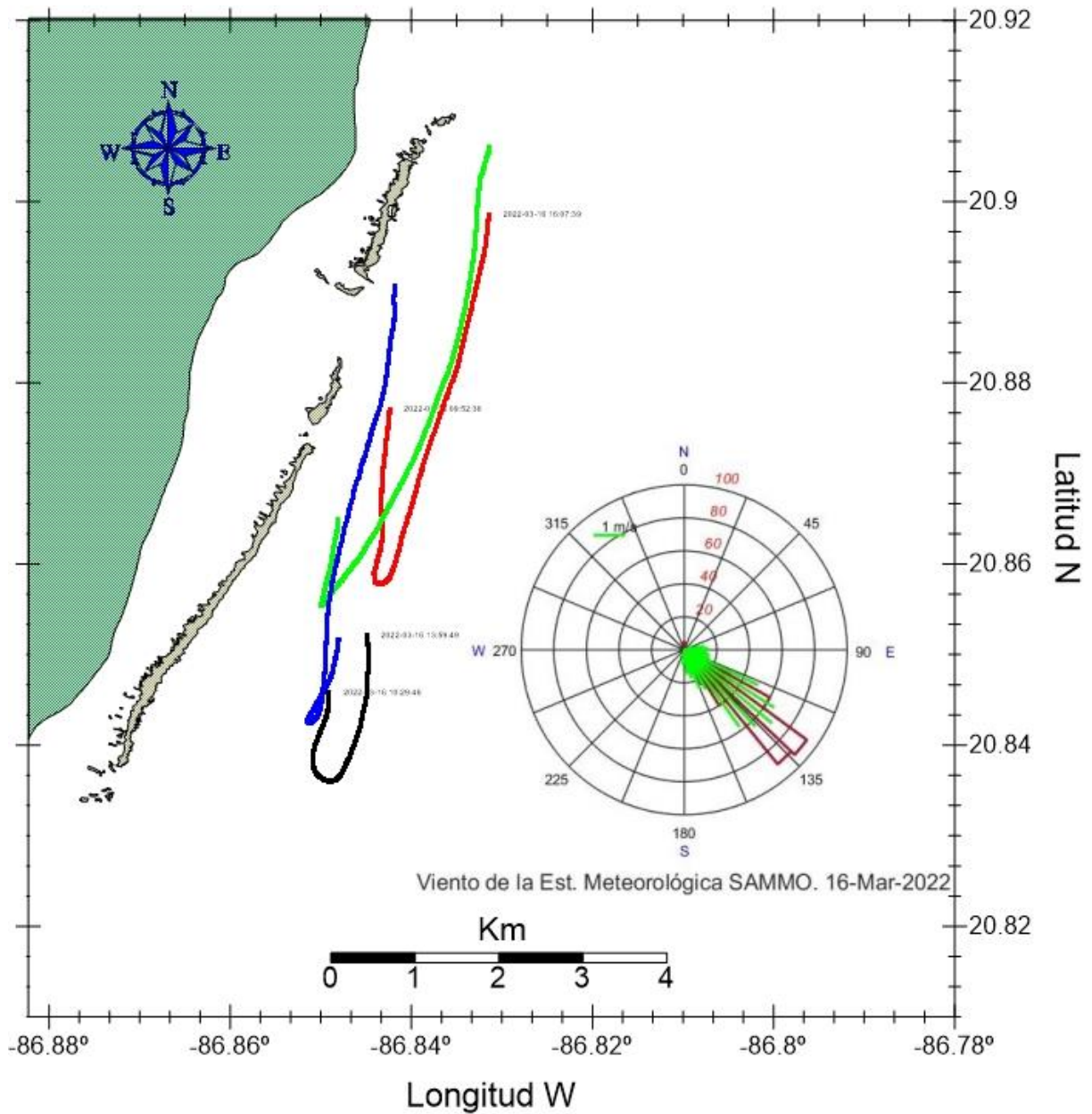


Fig. 12 Derivas con muy poco viento. donde se observa una contra corriente al inicio de las derivas y con ausencia de viento, hasta que aumenta el viento y este orienta las derivas de sur a norte.

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)

Capítulo 6

Calidad de Agua

van Tussenbroek, B.I., López-Portillo, J.A.,

Vera Vázquez, E., Barba Santos, M.G.

Resumen

Se analizaron diferentes indicadores de calidad de agua a intervalos mensuales a trimensuales del septiembre de 2019 hasta diciembre de 2021 en tres zonas (costa, laguna y arrecife) a lo largo de cuatro transectos en la laguna arrecifal del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM). Los promedios de temperatura, salinidad y pH no difirieron considerablemente entre las tres zonas; sin embargo, la zona de la costa tenía en promedio aguas más turbias, con un mayor coeficiente de extinción de luz (K_d), y menos oxígeno disuelto. La temperatura varió a lo largo de tiempo de acuerdo a las estaciones en las tres zonas, mientras los otros parámetros no mostraban una tendencia estacional. Los sitios cercanos a la costa mostraron generalmente mayor variabilidad en salinidad, pH, oxígeno disuelto, turbidez y K_d , que los sitios en media laguna y cercanas al arrecife. Durante dos eventos de mayor afluencia de sargazo, los sitios cercanos a la costa registraron valores de oxígeno disuelto más bajos, acompañado por un incremento en turbidez y K_d . El periodo de monitoreo fue demasiado corto para determinar tendencias generales en las condiciones de agua en las zonas alejadas de la costa. Pero comparaciones de K_d del presente estudio con los determinados en el pasado indican que paulatinamente las aguas cada vez son menos transparentes. Por lo tanto, es urgente continuar con los monitoreos de la calidad de agua.

I. INTRODUCCIÓN

El deterioro local del ambiente arrecifal por las actividades antropogénicas en el Caribe Mexicano ha sido notorio en las últimas cuatro décadas, con un desarrollo urbano exponencial del pueblo de Puerto Morelos en conjunto con el establecimiento de varios complejos hoteleros importantes (Carruthers *et al.*, 2005; Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Las aguas costeras del Caribe mexicano son típicamente oligotróficas (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2010); sin embargo, las aguas paulatinamente se están tornando mesotróficas (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). Las fuentes potenciales de nutrientes en el mar son los hoteles (por ejemplo, el uso de fertilizantes para los campos de golf), granjas de puercos (entre otros) y las aguas subterráneas contaminadas por los basureros, fosas sépticas domésticas e infiltraciones de “deep well injection” al manto acuífero (Hernández-Terrones *et al.*, 2011). El sistema de arrecifes prospera en bajas concentraciones de nutrientes, pero el deterioro de calidad de agua (reflejado en decremento en transparencia, y/o incremento en la concentración de nutrientes) es probablemente uno de los factores causantes de cambios notorios en el arrecife, como lo son la reducción en la cobertura de coral y su complejidad estructural (Álvarez-Filip *et al.*, 2009), así como en la vegetación de las praderas de los pastos marinos (van Tussenbroek, 2011; van Tussenbroek *et al.*, 2014; Hedley *et al.*, 2021).

Este deterioro ha sido agravado por las afluencias masivas de sargazo desde 2015 (Van Tussenbroek *et al.*, 2017), que han acelerado la pérdida de calidad de agua, desde entonces. La acumulación de las masas algales en las playas, generan mareas marrones de sargazo, que en tiempo pico de arribazones potencialmente aportarán aproximadamente entre 20 a 30 veces más nitrógeno y fósforo que las aguas subterráneas ya contaminadas, además de materia orgánica y otros compuestos (Van Tussenbroek *et al.*, 2017). Por lo tanto, un programa de monitoreo de calidad de agua es más urgente que nunca. En este informe, se

presentan datos (aún incompletos) de monitoreos realizados con recursos y/o apoyo logístico de este proyecto, el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos, CEMIE-Océano e ICML-Laboratorio de Biogeoquímica Acuática.

Objetivos

- Monitorear diferentes indicadores de calidad de agua utilizando un protocolo sencillo, a lo largo de 12 sitios distribuidos en 4 transectos de la costa hasta en arrecife del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM).

Hipótesis

- Las mareas marrones de sargazo contribuyen a un deterioro considerable de la calidad de agua de la laguna arrecifal del PNAPM; especialmente en la zona cercanas a la costa.

II. METODOS

II.1 Trabajo en el mar

III.1. Selección de los sitios y tiempos de muestreo

Un criterio para la selección de los sitios para el monitoreo de la calidad de agua fue el buscar un gradiente desde una fuente de la contaminación hacia aguas más lejanas de esta fuente. En el caso de las mareas marrones de sargazo, esta correspondería con un transecto desde la costa hacia mar adentro. En la laguna arrecifal del PNAPM, se seleccionaron 4 transectos perpendiculares a la costa, cada uno con tres estaciones de muestreo: Costa (50-100m de la costa), Laguna (en medio de la laguna arrecifal) y Arrecife (cercana a la barrera arrecifal) (Fig. 1). En estos transectos se determinó la calidad del agua de septiembre de 2019 al diciembre de 2021, a intervalos mensuales o bimestrales; con algunos intervalos cuando no fue posible realizar las salidas al campo.

Con una sonda multiparamétrica (YSI, 6600 V2) se determinó la temperatura, salinidad, pH, turbidez y oxígeno disuelto a lo largo de la columna de agua, hasta llegar al fondo. Los datos de los perfiles temperatura, salinidad y turbidez fueron promediados, para obtener un dato por sitio por fecha. Se consideraron únicamente los datos tomados cercanas al fondo de oxígeno disuelto y pH, considerando que estos parámetros son de más relevancia cerca del fondo donde crece el fitobentos. Se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés; i.e., Photosynthetic Active Radiation) con un sensor plano (2π) sumergible corregido por coseno Licor (Underwater Quantum Sensor LI-192, LI-COR Biosciences, USA) conectado a un data logger Licor, LI-1500 bajando el sensor lentamente de la superficie hasta el fondo y tomando lecturas a 0.35m y después cada metro; cada determinación del perfil tardó aproximadamente 10 minutos dependiendo de las condiciones atmosféricas y meteorológicas; debido a las malas condiciones en algunos meses no fue posible registrar los datos.

En cada estación se tomó una muestra de 25 o 230 ml de agua superficial. El agua de la mar colectada se colocó en frascos previamente lavados con jabón libre de fosfatos y HCl 10%, y enjuagados con agua desionizada. Antes de colocar las muestras en los frascos, se pasaron por un filtro con poro de $0.22\ \mu\text{m}$ (Millipore) para eliminar partículas pequeñas en el agua, y una vez en el frasco, se añadieron 2-3 gotas de cloroformo. Las muestras se colocaron sobre hielo inmediatamente después de su colecta y se congelaron a -20°C hasta su posterior análisis. Las muestras se mantuvieron congeladas a -20°C hasta su análisis en el laboratorio de Biogeoquímica Acuática especializado en determinar nutrientes (análisis pendientes).

II.2. Trabajo de gabinete

Los datos de los perfiles temperatura, salinidad y turbidez (por sitio y fecha) fueron promediados, para obtener un dato de la columna de agua. De los perfiles de pH y oxígeno disuelto (DO) se consideraron únicamente los datos tomados cercanas al fondo, considerando que estos parámetros son de más relevancia cerca del fondo donde crece el fitobentos.

Los datos de las sondas fueron transferidos a las bases de datos. Con los datos de sensor 2π de LICOR se calculó el coeficiente difuso de extinción de PAR (K_d) de la siguiente manera:

$K_d = -1/z \ln [PAR(z)/PAR(0)]$ $Z PAR(0)$, en que Z = profundidad en metros (o diferencia en profundidad entre dos mediciones simultáneas), $PAR(Z)$ = irradiancia a la profundidad z , $PAR(0)$ =irradiancia al superficie del agua

III. RESULTADOS

III.1 Indicadores

Los promedios de temperatura, salinidad y pH no difirieron considerablemente entre las tres zonas del Parque Nacional Arrecife Puerto Morelos (PNAPM; Tabla 1). Sin embargo, la zona de la costa tenía en promedio aguas más turbias, con un mayor coeficiente de extinción de luz (K_d), y menos oxígeno disuelto (Tabla 1).

La temperatura varió a lo largo de tiempo de acuerdo a las estaciones en las tres zonas (Fig. 2), mientras los otros parámetros no mostraban una tendencia estacional. Los sitios cercanos a la costa (zona Costa) mostraron generalmente mayor variabilidad en salinidad (Fig. 3), pH (Fig. 4), oxígeno disuelto (Fig. 5), turbidez (Fig. 6) y K_d (Fig. 7), que los sitios en media laguna y cercanas al arrecife, con algunas excepciones.

IV. DISCUSIÓN

Desde 2015, las afluencias de sargazo al Caribe mexicano son recurrentes de manera estacional entre marzo/abril hasta septiembre/octubre de cada año (García-Sánchez et al. 2020; Rutten et al. 2021; Fig 3); sin embargo, hay una gran variabilidad interanual de las cantidades de sargazo que arriban a las costas. Durante el periodo de monitoreo ocurrieron dos eventos mayores de afluencia de sargazo en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAM); el primero al inicio del monitoreo en septiembre de 2019, y el otro aproximadamente del junio hasta septiembre de 2021 (Observaciones no publicados, Figs. 2-7). Durante estos dos eventos de mayor afluencia de sargazo, los sitios cercanos a la costa registraron valores de oxígeno disuelto más bajos (Fig. 5), acompañado por un incremento en turbidez (Fig. 6) y coeficiente de extinción de luz (K_d , Fig. 7). Este deterioro de transparencia y falta de oxígeno se podrá atribuir a las mareas marrones de sargazo, que tornan las aguas de color café por los lixiviados y POM liberados por las masas algales en descomposición (Van Tussenbroek *et al.*, 2017).

No se registraron tendencias similares en el oxígeno disuelto y la transparencia del agua en las zonas de la laguna y arrecife durante estos eventos de mayor afluencia de sargazo (Figs. 5-7). Sin embargo, esto no significa que el impacto de las mareas marrones de sargazo se limita a la zona cercana a la costa. Por ejemplo, Enríquez y Pantoja-Reyes (2005) determinaron el K_d en nueve sitios distribuidos entre la costa y el arrecife en la laguna arrecifal de Puerto Morelos durante 2000 y 2001, reportando valor promedio de 0.32 m^{-1} . Esto es ampliamente menor que el K_d promedio de 0.54 m^{-1} de este estudio, considerando que la extinción de luz se registra en escala logarítmica. Una tendencia similar en pérdida de transparencia de agua en la laguna arrecifal ya fue registrada por Van Tussenbroek *et al.* (2017) and Hedley *et al.* (2021). El aumento en la atenuación de la luz

puede indicar un proceso de eutrofización induciendo un incremento en fitoplancton o POM; que inducirá cambios en este ecosistema típicamente oligotrófico.

V. CONCLUSIONES

El monitoreo de calidad de agua registró el impacto de los recales masivas de sargazo en OD (oxígeno disuelto), turbidez y en K_d (el coeficiente de extinción de luz). Sin embargo, el periodo de monitoreo fue demasiado corto para determinar tendencias generales en las condiciones de agua en las zonas alejadas de la costa. Comparaciones de valores del presente estudio con los determinados en el pasado, indican que paulatinamente las aguas cada vez son menos transparentes. Por lo tanto, es más urgente que nunca continuar con los monitoreos de la calidad de agua, considerando que los arribazones recurrentes ya son el “nuevo normal” en el Caribe (UNEP-CEP, 2021).

VI. REFERENCIAS

- Álvarez-Filip L, Dulvy NK, Gill JA, Côté IM, Watkinson AR (2009) Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proc. R. Soc. B* 276: 3019
- Carruthers TJB, van Tussenbroek BI, Dennison WC (2005) Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 64: 191-199
- Enríquez S, Pantoja-Reyes NI (2005) Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self-shading in the seagrass *Thalassia testudinum*. *Oecologia* 145: 234-242
- Hedley JD, Velázquez-Ochoa R, Enríquez S (2021) Seagrass Depth Distribution Mirrors Coastal Development in the Mexican Caribbean—An Automated Analysis of 800 Satellite Images. *Frontiers in Marine Science*: 1449.
- Hernández-Terrones L, Rebolledo-Vieyra M, Merino-Ibarra M, Soto M, Le-Cossec A, Monroy-Ríos E (2011) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air & Soil Pollution* 218: 517-528
- Kirk, JTO (1994) Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press. Gran Bretaña. 2a ed. 112-151 pp.
- Pantoja-Reyes NA (2003) Evaluación de la importancia de la luz como factor regulador de la productividad foliar del pasto marino *Thalassia testudinum* Banks ex König en la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Tesis Doctorado, UNAM-ICMYL. México. 98pp
- Rodríguez-Martínez RE, Ruíz-Rentería F, van Tussenbroek BI, Barba-Santos G, Escalante-Mancera E, Jordán-Garza G, Jordán-Dahlgren E (2010) Environmental state and

tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico. *Revista Biología Tropical* 58: 23-43

UNEP-CEP (2021). *Sargassum White Paper—Turning the Crisis into an Opportunity*; Ninth Meeting of the Scientific and Technical Advisory Committee (STAC) to the Protocol Concerning Specially Protected Areas and Wildlife (SPA) in the Wider Caribbean Region; UNEP-CEP: Kingston, Jamaica, 56 pp

Van Tussenbroek BI (2011) Dynamics of seagrasses and associated algae in coral reef lagoons. *Hidrobiológica* 21: 293-310

Van Tussenbroek BI, Cortés J, Collin R, Fonseca AC, Gayle PMH, Guzmán HM, Jácome GE, Juman R, Koltés KH, Oxenford HA, Rodríguez-Ramírez A, Samper-Villarreal J, Smith SR, Tschirky JJ, Weil E (2014) Caribbean-wide, long-term study of seagrass beds reveals local variations, shifts in community structure and occasional collapse. *PlosOne* 9: e90600

Van Tussenbroek, BI, Hernández Arana HA, Rodríguez-Martínez RE, Espinoza-Avalos J, Canizales-Flores HM, González-Godoy CE, Barba-Santos MG, Vega-Zepeda A, Collado-Vides L (2017) Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin* 122: 272-281

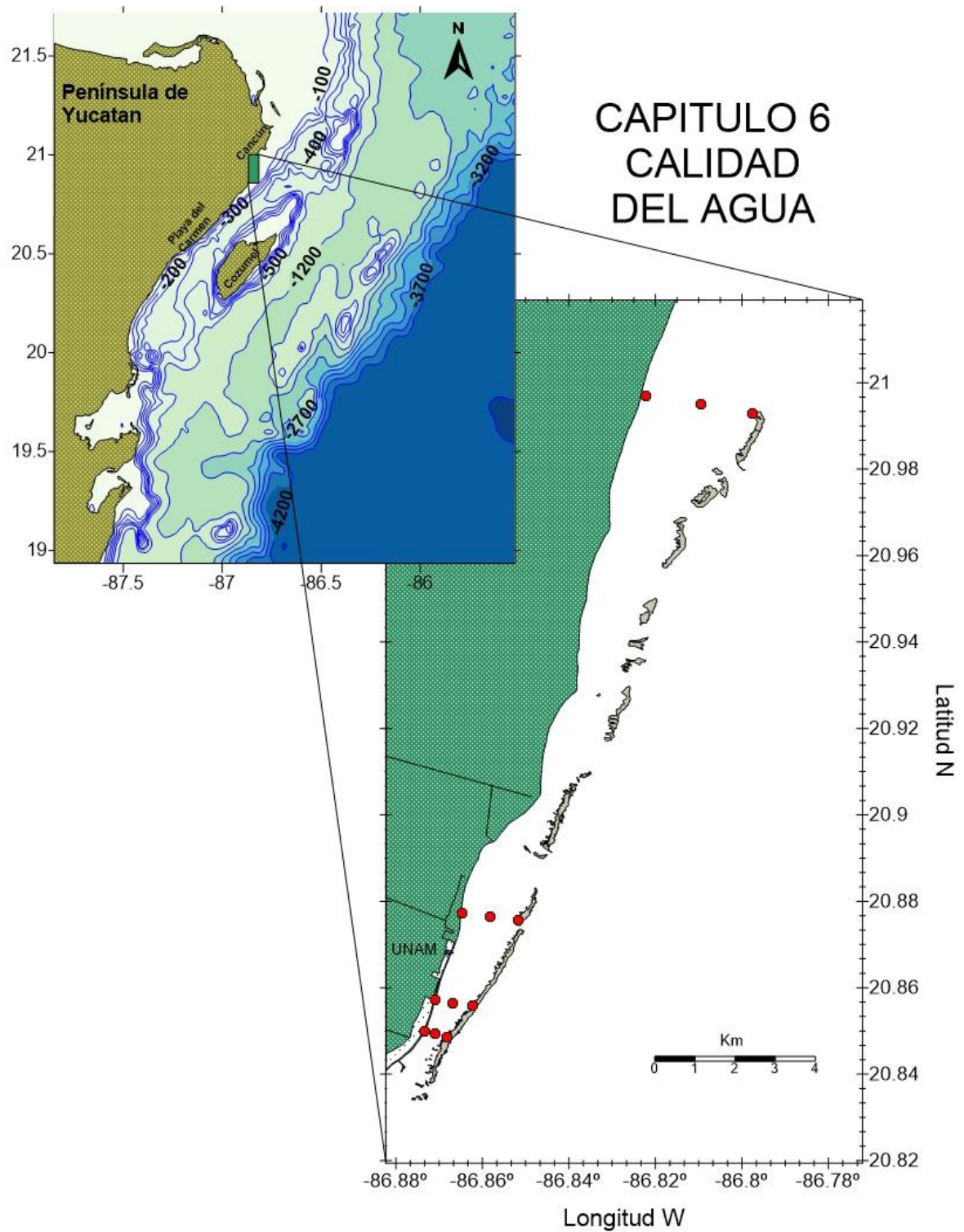


Fig. 1. Mapa de Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), indicando los puntos de monitoreo de la calidad de agua, organizados en cuatro transectos de la costa hacia el arrecife, divididos en zona Costa, Laguna (media) y Arrecife (posterior).

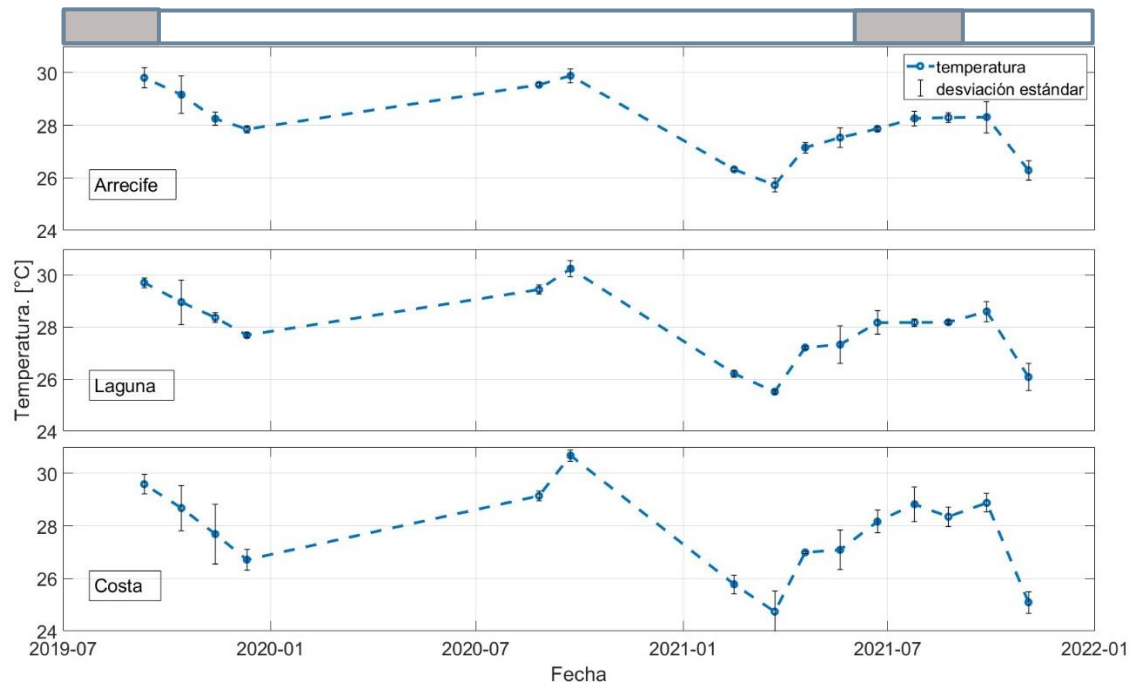


Fig. 2. Temperatura promedio (\pm SD, N=4) de la columna de agua por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2019 hasta diciembre de 2021. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

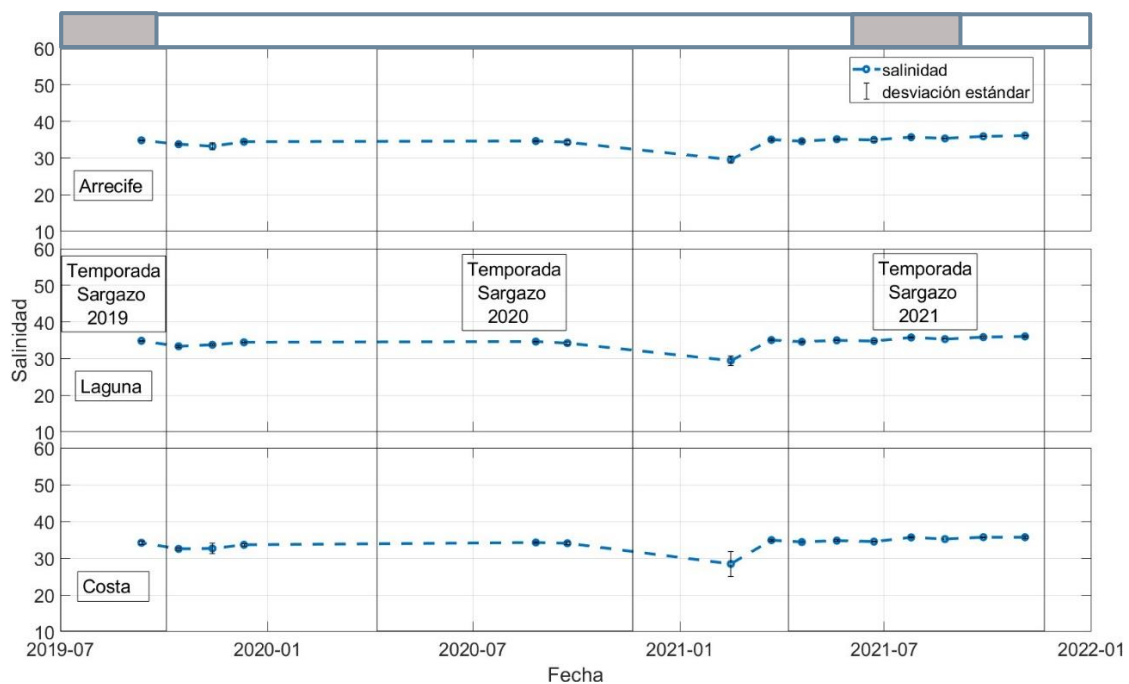


Fig. 3. Salinidad promedio (\pm SD, N=4) de la columna de agua por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2019 hasta diciembre de 2021. Los cuadros delimitados por líneas indican la temporada anual de arribazones de sargazo. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

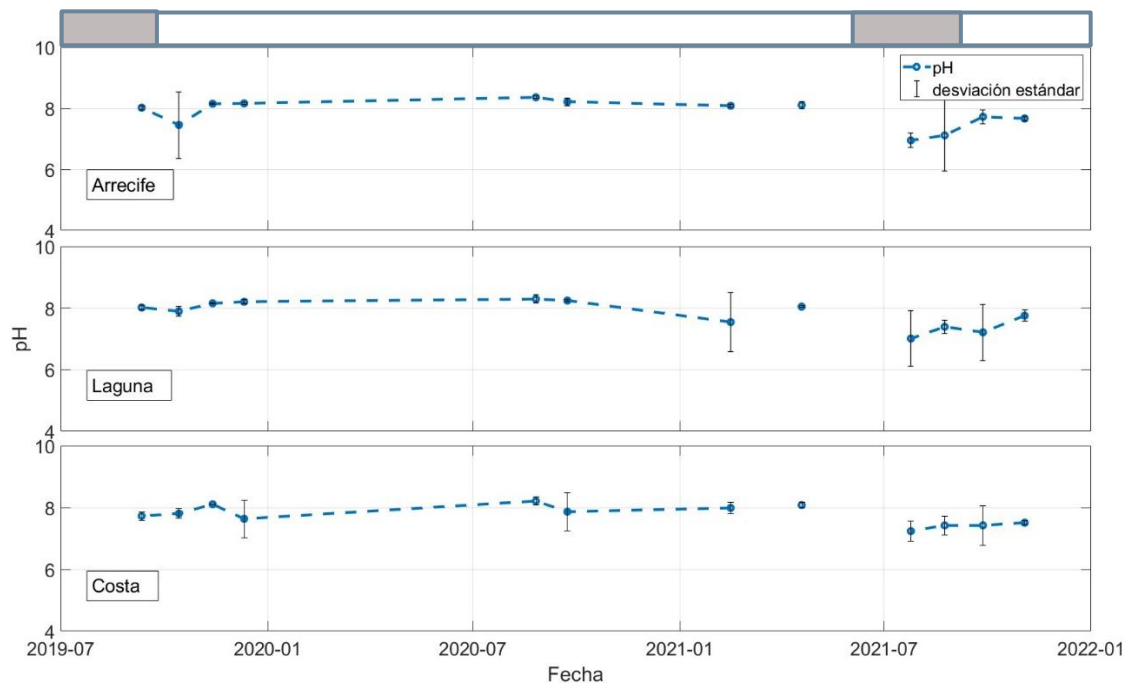


Fig. 4. pH promedio (\pm SD, N=4) en el fondo por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2019 hasta diciembre de 2021. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

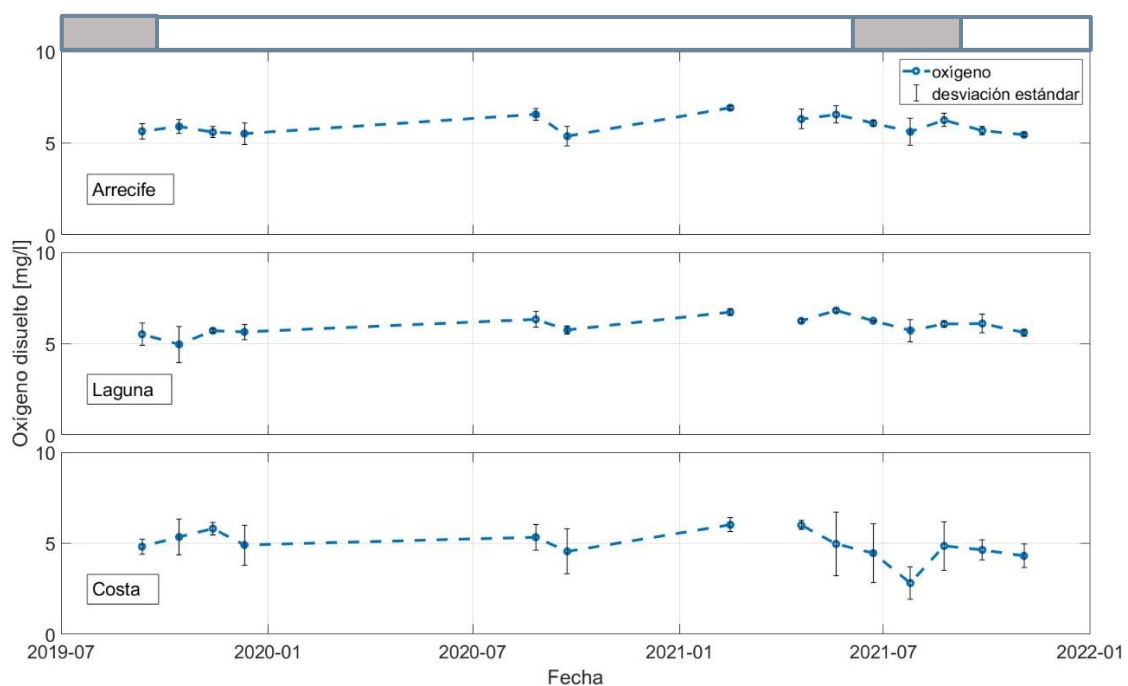


Fig. 5. Oxígeno disuelto promedio (\pm SD, N=4) en el fondo por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2019 hasta diciembre de 2021. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

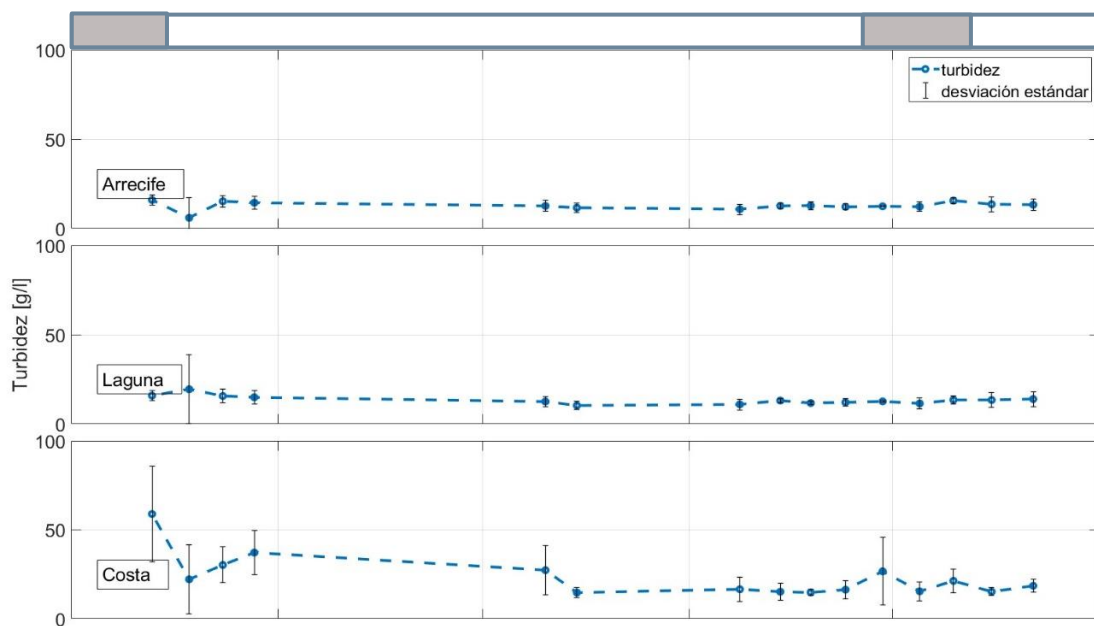


Fig. 6. Turbidez promedio (\pm SD, N=4) de la columna de agua por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2019 hasta diciembre de 2021. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

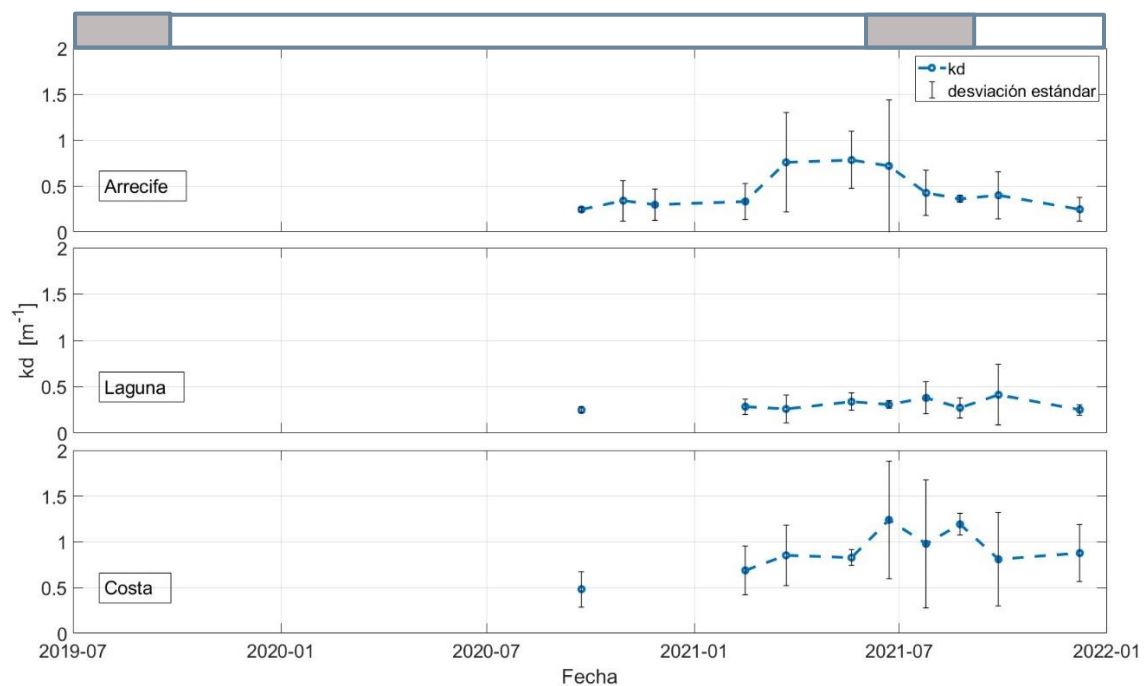


Fig. 7. Coeficiente de extinción de luz (K_d) promedio (\pm SD, N=4 sitios) de la columna de agua por zona (Costa, Laguna y Arrecife) en PNAPM de septiembre 2020 hasta diciembre de 2021. Los cuadros grises en la barra superior indican los periodos de arribazones máximos de sargazo

Tabla 1. Valores promedio \pm SD (N = número de muestreos) de los parámetros de calidad de agua por zona entre septiembre 2019 y diciembre de 2021 en el PNAPM. OD: oxígeno disuelto, Kd: coeficiente de extinción de luz.

	Costa	Laguna	Arrecife
Temperatura (°C)	27.76 \pm 1.67 (15)	27.99 \pm 1.36 (15)	28.02 \pm 1.28 (15)
Salinidad	34.03 \pm 1.83 (15)	34.47 \pm 1.58 (15)	34.50 \pm 1.57 (15)
pH	7.75 \pm 0.31 (12)	7.81 \pm 0.43 (12)	7.83 \pm 0.46 (12)
OD (mg l⁻¹)	4.91 \pm 0.82 (15)	5.95 \pm 0.50 (15)	5.96 \pm 0.49 (14)
Turbidez (g l⁻¹)	23.41 \pm 11.94 (15)	13.45 \pm 2.32 (15)	12.74 \pm 2.39 (15)
Kd (m⁻¹)	0.88 \pm 0.23 (9)	0.44 \pm 0.21 (11)	0.44 \pm 0.21 (11)

Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas
invasoras asociadas al sargazo pelágico en zonas marino-costeras del Caribe mexicano
(InvaSAR)

Recomendaciones

Van Tussenbroek, B. I., Monroy Velázquez, L.V., Rodríguez Vargas, D.C., Suescún-Bolívar,
Thomé, P. E., Cerqueda-García, D., García-Maldonado, J.Q, Martínez-López, I.G., Gómez
Realí, M.A., Escalante Mancera J. E., López Portillo J.A., Vera Vázquez E.

Barba Santos, M.G.

El proyecto “Establecimiento de un protocolo de detección temprana y diagnóstico de especies exóticas invasoras asociadas al sargazo pelágico en zonas marino-costeras del Caribe mexicano (InvaSAR)” desarrolló y ejecutó un protocolo para el estudio de la flora y fauna asociada a los mantos de sargazo, los movimientos de los mantos de sargazo cuando se acercan hacia la costa, así como el monitoreo de la calidad de agua en zonas afectadas por las mareas marrones de sargazo. El área de estudio fue el Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) en el norte del Caribe mexicano.

Las recomendaciones para estudios posteriores a la flora y fauna asociada a las afluencias masivas de sargazo son las siguientes:

1. Considerando la alta variabilidad de la biota asociada a los mantos de sargazo, dependiendo de los eventos (tiempos) de los arribazones, se recomienda realizar varios muestreos a lo largo de una temporada de afluencia, para obtener una caracterización representativa.

2. En sistemas arrecifales, tales como el del PNAPM, la zona idónea para coleccionar la biota asociada al sargazo para su caracterización, es el arrecife frontal, antes de que el sargazo haya atravesado la cresta del arrecife. Ésto aplica en especial a la ictiofauna.
3. El muestreo por red de cuchara es idóneo para la colecta de fauna de menor tamaño. Si se captura accidentalmente ictiofauna u otro organismo de tamaño mediano o grande (p.ej., tortuga) en las redes, se llevará a cabo un registro fotográfico y se regresa al mar.
4. Se debe colocar los talos con sus epibiontes cuidadosamente en bolsas o recipientes previamente rellenos con agua de mar, para evitar desprendimiento de organismos asociados. También se recomienda fijación con formol al 4%, si se emplea etanol al 70%, los talos se endurecen y son más difíciles de manipular.
5. Los dispositivos remotos de video o RUVs fueron idóneos para observar peces debajo de los mantos de sargazo. Se sugiere incluir en los dispositivos remotos una cámara adicional en posición inmediata y por debajo del manto de sargazo para aumentar la probabilidad de registrar a los peces de menor talla y que suelen estar estrechamente asociados a los mantos de sargazo, también a aquellos que por su camuflaje resultan difíciles de observar como *Histrionotus histrionotus* y *Stephanolepis hispidus*.
6. En caso que es deseable utilizar los dispositivos remotos de video, o utilizar las boyas de deriva para seguir las trayectorias de los mantos de sargazo más lejano a la costa, se sugiere la instalación de un sistema de localización por satélite en vez de telefonía móvil.
7. En cuanto al microbiota asociado, se recomienda tener un monitoreo del género *Vibrio* que puede llevarse a cabo con el uso de agar cromogénico, comparando colonias que se desarrollan en éste y en agar marino.
8. Con respecto al muestreo de agua para analizar nutrientes, se recomienda tomar nota de las condiciones del mar en el momento, así como la presencia de sargazo y si se encuentra desintegrándose, presencia de flujo de agua dulce, etc.

Recomendaciones para dar respuestas oportunas de la flora y fauna exótica asociada a la llegada de sargazo pelágico, son las siguientes:

1. El único grupo de biota asociado al sargazo con especies de nuevo registro fue la fauna móvil de menor tamaño. Por lo que es recomendable estudiar este grupo de organismos con especial interés, sin descuidar el estudio de los otros grupos de organismos asociados, ya que no se puede descartar que estos podrán incluir nuevos registros en otros tiempos o áreas.
2. Todas las 14 especies de nuevo registro de fauna móvil, se clasifican como especies exóticas con un **alto riesgo de invasión**. Este riesgo alto está basado en su elevada probabilidad de introducción por las afluencias frecuentes y masivas de los mantos de sargazo que son sus vehículos de introducción. Añadiendo a esto, se desconoce el riesgo de establecimiento de estas especies, por lo que es urgente estudiar esto de manera inmediata.
3. Además, se desconoce el impacto que podrán tener estas 14 especies sobre el ecosistema y la biodiversidad, por lo que se recomienda realizar monitoreo del bentos de los ecosistemas afectadas por las inundaciones de sargazo, para detectar la posible propagación de esta fauna introducida por el sargazo.