

Pelagic sargassum is a source of microplastic pollution in the Mexican Caribbean

El sargazo pelágico es fuente de contaminación por microplásticos en el Caribe Mexicano

Les sargasses pélagiques sont une source de pollution microplastique dans les Caraïbes Mexicaines

DALILA ALDANA ARANDA^{1*}, TANIA GIL CORTES¹, ROSA ELISA RODRIGUEZ MARTINEZ², VICTOR CASTILLO¹, ADÁN CABALLERO VÁZQUEZ³, GILBERTO ACOSTA GONZÁLEZ³ Y ROSA MARIA LEAL BAUTISTA³

¹Cinvestav IPN Mérida, Recursos del Mar

²Lab. Sistemas Arrecifales

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

³Unidad de Ciencias del Agua, CICY

*daldana@cinvestav.mx

ABSTRACT

Microplastics (MP) and massive influxes of pelagic *Sargassum* are emerging ecological problems. Microplastics are ubiquitous and can obstruct the digestive system and cause malnutrition, tumors, and reduced reproductive capacity, among other effects. Massive influxes of *Sargassum* deteriorate the quality of coastal waters. They cause eutrophication, decrease dissolved oxygen and pollute with heavy metals and arsenic, affecting ecosystems in their biodiversity and functioning. This research aimed to characterize the degree of MP contamination in the *Sargassum* landing in the northern Caribbean area of Mexico. The abundance of MP, forms, and colors were determined by optical microscopy. The analysis of its morpho structure and elemental analysis were determined by SEM scanning microscopy and EDXS. The abundance of MP was higher in March and April of 2021, with means of 12.0 MP.g⁻¹ and 15 MP.g⁻¹, respectively. The lower abundances (3-5 MP.g⁻¹) occurred from May to October of that year and in January 2022. Fibers were the predominant form, representing between 48 and 98%. Transparent MP were the most abundant, followed by black and blue fibers.

KEYWORDS : Pelagic sargassum, microplastic pollution, Mexican Caribbean

RESUMEN

Los microplásticos (MP) y los arribos masivos de sargazo pelágico a las costas constituyen problemas ecológicos emergentes. Los microplásticos son ubicuos y pueden obstruir el sistema digestivo y causar desnutrición, tumoraciones y reducción de la capacidad reproductiva, entre otros efectos. Los arribazones de sargazo deterioran la calidad del agua costera afectando la biodiversidad y funcionamiento de los ecosistemas costeros. Provocan eutrofización, disminuyen la concentración de oxígeno disuelto y contaminan con metales pesados y arsénico. El objetivo de esta investigación fue caracterizar el grado de contaminación por MP en el sargazo que arriba a la zona Norte del Caribe de México. Se cuantificó la abundancia de MP en un ciclo anual, así como su forma y color. Se analizó su morfo estructura utilizando microscopía de barrido (SEM) y su composición elemental mediante EDXS. La abundancia de MP fue mayor en marzo y abril de 2021, con medias de 12.0 MP.g⁻¹ y 15 MP.g⁻¹, respectivamente. Las menores abundancias (3-5 MP.g⁻¹) se presentaron de mayo a octubre del mismo año y en enero de 2022. Las fibras fueron los MP predominantes, representando entre 48 y 98%. Los MP transparentes fueron los más abundantes, seguidos de las fibras negras y azules.

PALABRAS CLAVES: sargazo pelágico, contaminación, microplásticos, Caribe Mexicano

INTRODUCCIÓN

El sargazo pelágico ha incrementado su abundancia en el océano Atlántico desde el 2011, convirtiéndose en el mayor florecimiento de macroalgas registrado a la fecha (Xiao et al., 2021). Imágenes satelitales revelaron la presencia de una nueva zona de florecimiento de estas algas, a la que se le nombró el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, la cual se extiende desde África hasta el Golfo de México y que en 2018 tuvo una cobertura de 6,000 km² y una biomasa de 20 millones de toneladas (Wang et al., 2019). Las masas de sargazo son transportadas al Caribe mexicano entre marzo y octubre por los vientos alisios del Este y Sureste (García-Sánchez et al., 2020; Godínez-Ortega et al., 2021). Su acumulación y descomposición en la zona costera provoca una disminución en el paso de la luz, hipoxia y eutrofización de los sistemas arrecifales, afectando a los pastos marinos y fauna (van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019).

Por lo que respecta a los plásticos, son residuos sólidos de mayor presencia en la vida diaria. Su producción se ha incrementado de forma exponencial en los últimos 20 años, con una producción anual mundial de 368 millones de toneladas (Statista 2022). En el océano, estos polímeros se degradan y fragmentan, al estar expuestos a los rayos UV y al desgaste mecánico por el movimiento de las olas, produciendo macroplásticos (5–50 cm), partículas de microplásticos (<5 mm) y

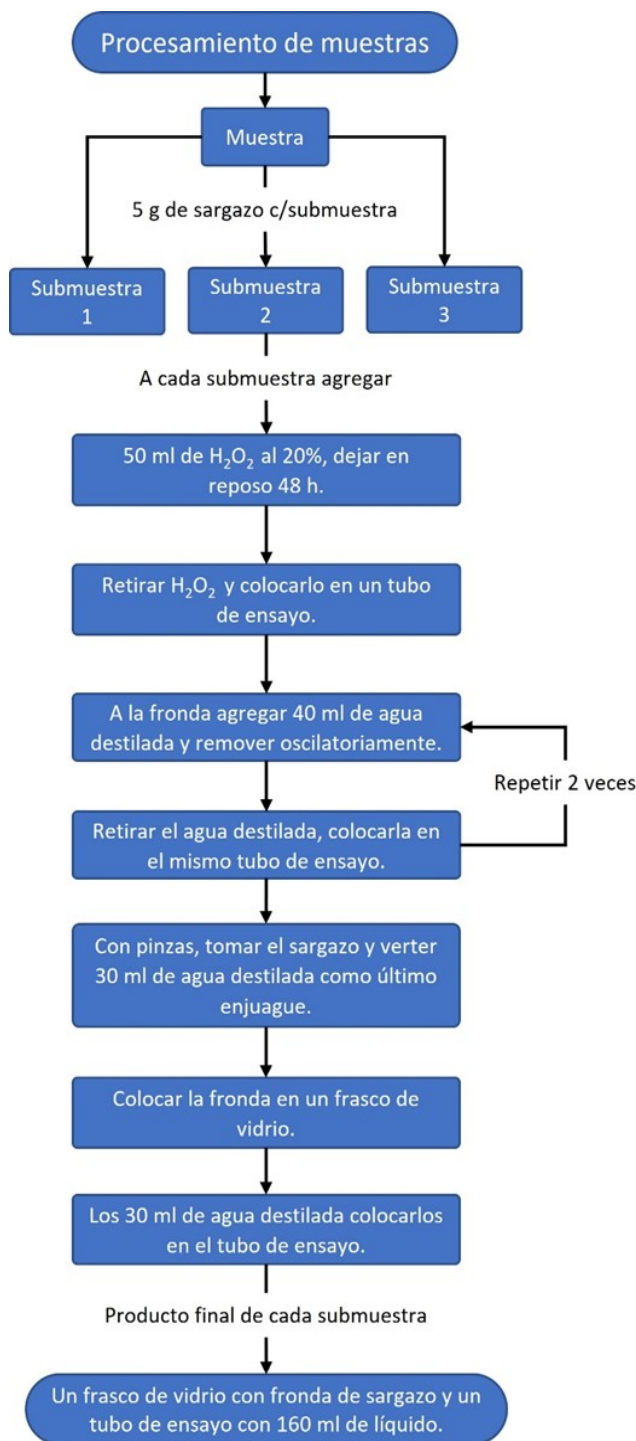


Figure 1. Esquema de procesamiento de muestras de sargazo para digestión de materia orgánica y obtención de microplásticos.

nanoplásticos ($\leq 0.1 \mu\text{m}$). También pueden encontrarse perlas de plástico provenientes de productos higiénicos y fibras de textiles sintéticos. Los microplásticos (MP) son contaminantes emergentes encontrándose en todos los

ecosistemas marinos, desde los polos hasta los trópicos y por su ubicuidad, están potencialmente en todos los organismos (Wright et al., 2013). Los plásticos en el medio marino absorben contaminantes, como los orgánicos persistentes, donde casi la mitad de su composición son sustancias químicas peligrosas (Rochman, 2013) que pueden provocar [alteraciones en la expresión de genes](#) (Imhof et al., 2017), en el desarrollo, la fecundidad y el estrés oxidativo (Jeong et al., 2017; Choi et al., 2018).

En el Caribe, los MP están presentes tanto en la columna de agua, como en las playas y los organismos marinos. En Jamaica, la concentración de MP en la columna de agua fue de $5.73 \text{ partículas/m}^3$, siendo estos principalmente de polietileno y polipropileno (Deanna y Webber, 2019). En playas de Colombia, los MP fueron en su mayoría de polietileno y polipropileno (Acosta-Coley y Olivero-Verbel, 2015), y en las de las Antillas Menores (Anguila, San Bartolomé, San Eustaquio y San Martín), se encontraron en concentraciones de $261 \pm 6 \text{ MP.kg}^{-1}$ de arena, con un máximo de $620 \pm 96 \text{ MP.kg}^{-1}$, y el 95% fueron fibras (Bosker et al., 2018). En las playas de Holbox y Playa del Carmen, Quintana Roo, México, se reportaron abundancias de 67 y 113 MP/m^2 , respectivamente, y dominaron los fragmentos, principalmente de polietileno, polipropileno y poliestireno (Álvarez-Zeferino et al., 2020). Respecto a la presencia de MP en especies marinas, se tienen reportes de su presencia, principalmente fibras, en el 75% de las hojas del pasto marino (*Thalassia testudinum*) colectado en el atolón de Turneffe, Belize (Goss et al. 2018). Adicionalmente, se han encontrado en el caracol rosa (*Aliger gigas*) en concentraciones de $270 \text{ MP.individuo}^{-1}$ en Belice y $43 \text{ MP.individuo}^{-1}$ en el Puerto Morelos, México, dominando las fibras (Aranda et al., 2022).

El objetivo del presente estudio es cuantificar la abundancia de microplásticos en el sargazo pelágico (*Sargassum fluitans* III) que arriba de forma masiva a la zona norte del Caribe mexicano (Puerto Morelos, Quintana Roo), así como determinar la abundancia relativa de las diferentes formas y colores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El área de estudio se ubica en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Entre las coordenadas $20^\circ 56'$ y $20^\circ 48'$ latitud Norte y $86^\circ 50'$ y $86^\circ 54'$ longitud Oeste. La temperatura del aire varía entre $20.7\text{-}30.4^\circ\text{C}$ y la del mar entre $25.1\text{-}29.9^\circ\text{C}$, con valores más elevados entre mayo y octubre, y la precipitación pluvial es mínima en abril (21.1 mm) y máxima en octubre (161.4 mm) (Rodríguez-Martínez et al., 2010). Las masas de sargazo que llegan a la costa son transportadas por la Corriente de Yucatán, que tiene una dirección que fluctúa del noreste al noroeste y una velocidad media de 5.4 km h^{-1} cerca de la superficie (Candela et al., 2003). El régimen de vientos juega un papel importante en la cantidad de sargazo que llega a las playas. Los vientos del este y sureste favorecen su movimiento a la costa en primavera y verano (García-Sánchez et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2022).

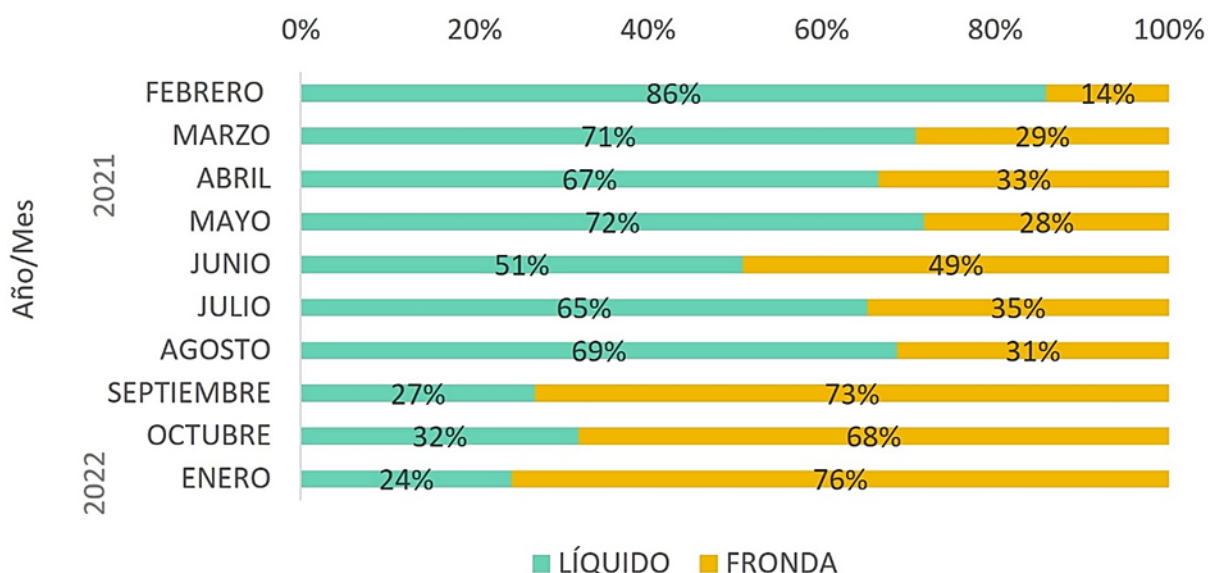


Figure 2. Porcentaje de micro plásticos obtenidos mensualmente en frondas de sargazo procedentes de la orilla del mar en la localidad de Puerto Morelos, Quintana Roo, México y en la solución de enjuague.

Muestreo en campo. Se realizaron colectas mensuales entre febrero de 2021 y enero de 2022. Cada mes se colectaron tres frondas frescas de *Sargassum fluitans III* en la orilla del mar en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Las muestras fueron secadas al Sol. Se determinó el peso húmedo y seco de cada muestra.

Obtención de microplásticos: El esquema de procesamiento de muestras de sargazo para digestión de materia orgánica y obtención de micro plásticos se presenta en la figura 1. Se tomaron tres submuestras de sargazo de 5g cada una. Se colocó cada muestra en un vaso de precipitado al que se le adicionaron 50 ml de solución de peróxido de hidrogeno al 20% que cubriera la fronda por 48 horas a temperatura ambiente. El vaso se cubrió con papel aluminio para evitar la contaminación ambiental de MP. Posteriormente, se enjuagó la fronda con agua destilada para recuperar los MP adheridos. Los MP se cuantificaron tanto en la solución de digestión y enjuague de las frondas, como en la revisión óptica de las frondas.

Identificación y cuantificación de Microplásticos.

La abundancia de MP, se realizó utilizando un microscopio estereoscópico Leica (Motic SMZ-171) a 40 X de aumento. Los MP fueron clasificados en fibras, películas y esferas. Se contaron las partículas plásticas en el rango de tallas de 300-5000 μm (NOAA 2015), apoyándose para su revisión en una caja de Petri de vidrio con una cuadrícula en la parte inferior y realizando los conteos de 10 ml en 10 ml hasta revisar toda la solución. De la misma manera se procedió con las láminas de la fronda. El total de MP corresponde a la suma de los presentes en la solución de digestión y enjuague más los adheridos a las láminas de las frondas de sargazo. Este procedimiento permitió cuantificar y clasificar los MP por forma y tamaño. Para certificar que

todas las micro partículas sean MP y no fragmentos calcáreos/sílice se utilizó el análisis en Microscopía de barrido y análisis EDX.

Microscopía electrónica de barrido y análisis EDXS. Las partículas de MP fueron colocadas en un soporte metálico de cobre y metalizados por 45 s con Oro-paladio (Quorum Q150R) para su análisis en el microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-7600F). Se analizó la morfoestructura de las microfibras y sus fracturas y el nivel de desgaste y se identificó y cuantificó su composición química elemental.

Análisis estadístico. Se probó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro Wilks modificada a través del software Infostat. Debido a que los datos no presentaron normalidad y el tamaño de muestra fue pequeño ($n=3$), se realizó una prueba no paramétrica de intervalos de confianza Bootstrap con un remuestreo de 1000 repeticiones, con el cual se obtuvo la media y el intervalo de confianza (95% de confianza) para cada mes.

RESULTADOS

Abundancia de Microplásticos. Se registró una alta variación entre los meses en el porcentaje de microplásticos obtenidos de las frondas y el líquido de enjuague (Fig. 2). A pesar de que las frondas fueron enjuagadas vigorosamente previo al proceso de digestión de la materia orgánica para la extracción de MP, en las láminas del sargazo permanecieron adheridas microfibras en un porcentaje significativo (14-76%). Por lo anterior, para todos los meses se revisó la tanto la fase líquida como la totalidad de las láminas de las sub muestras de frondas de sargazo.

La mayor abundancia de MP se observó en marzo y abril de 2021, con concentraciones máximas de 13.6 y 17.9

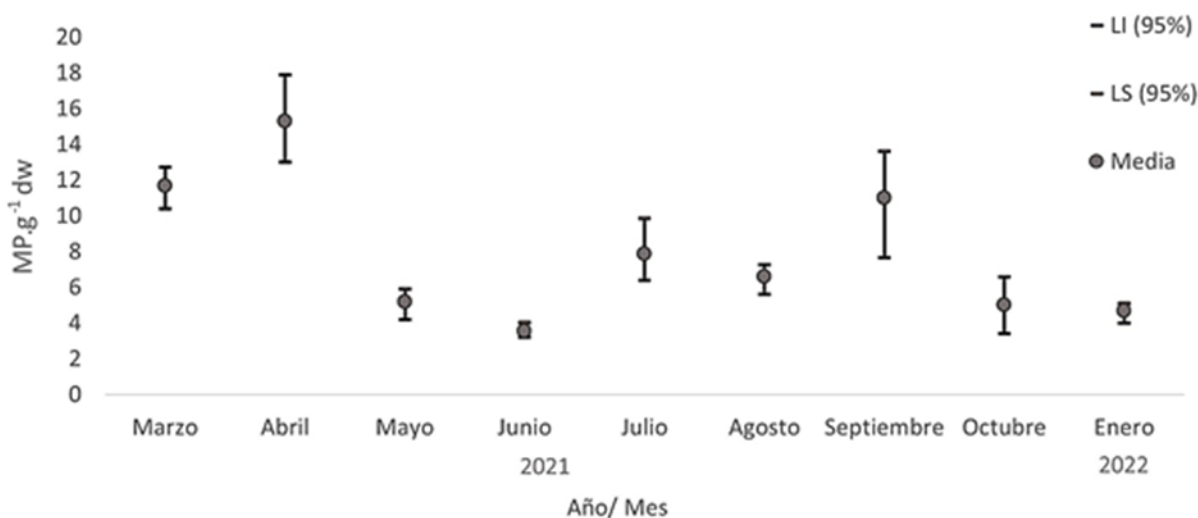


Figure 3. Abundancia mensual de micro plásticos en muestras de sargazo procedentes de la orilla del mar en la localidad de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Los valores corresponden a la media del número de micro plásticos (MP) por gramo de peso seco de sargazo (dw). Los intervalos de confianza al 95% fueron obtenidos mediante un remuestreo Bootstrap (rep: 1000).

MP.g^{-1} , respectivamente (Fig. 3). En septiembre del mismo año se registró un segundo pico en la abundancia de MP. Las menores abundancias de MP se observaron en mayo, junio y octubre de 2021 y enero de 2022, con valores promedio inferiores a 5 MP.g^{-1} (Fig. 3).

Formas y colores de los Microplásticos. Los MP registrados a lo largo del estudio consistieron de fibras y fragmentos, dominando las primeras en todos los meses, a excepción de octubre (Fig. 4). Por lo que respecta a los colores de los MP, la mayoría fueron fibras azules o transparentes (Fig. 5). La presencia del color negro fue alta únicamente en octubre (45%). Las fibras rojas y amarillas estuvieron presentes casi todos los meses, pero en porcentajes no mayores a 10% (Fig. 5).

Morfoestructura de microplásticos. El análisis de MP utilizando microscopía electrónica de barrido reveló la presencia de detalles de desgaste y rupturas (Fig. 6). En las figuras 6A y 6B se aprecian microfibras con detalles de rupturas y desgastes diversos en forma de láminas. En las figuras 6C y 6D, se observan microfibras con presencia de estructuras esféricas y en forma de bastón adheridas que por sus dimensiones podrían ser bacterias.

DISCUSIÓN

Todas las muestras analizadas de *Sargassum fluitans* III presentaron contaminación por MP. La cantidad máxima se registró en abril de 2021 con 17.9 MP.g^{-1} de sargazo seco. La concentración de MP en sargazo fue superior a la reportada en otros estudios en sedimentos, agua o especies marinas. Por ejemplo, para las playas de las Antillas menores, se reportó una media de 2.60 MP.g^{-1} ,

para las playas de Guatemala una media de 3 MP.g^{-1} (Mazariegos-Ortiz et al., 2020) y para las playas de Puerto Rico, de 1.7 MP.g^{-1} (Pérez-Alvelo et al., 2021). En China, se han reportado concentraciones de MP de $1.7 \pm 0.8 \text{ MP.g}^{-1}$ (peso húmedo) en otras especies de macroalgas (Feng et al., 2020) y de 3 MP.g^{-1} (peso seco) para el alga comercial nori (*Pyropia* spp.) (Li et al., 2020). Aunque es posible que la variación en las concentraciones de MP esté influenciada por el uso de diferentes metodologías, el hecho de que *S. fluitans* III sea una especie pelágica que se desplaza con las corrientes marinas, posiblemente favorece que acumule contaminantes, entre ellos los MP. La variación temporal en la concentración de MP en el sargazo podría estar relacionada con la intensidad del viento, ya que cuando este es más fuerte puede provocar la mezcla y redistribución vertical de las partículas de plástico en la columna de agua, observándose una relación inversa entre la velocidad del viento y la concentración de partículas plásticas (Kukulka et al., 2012). En la zona de estudio, la velocidad máxima de viento se registró en los meses de junio a agosto de 2021 (SAMMO-UNAM), con valores entre $22\text{-}26 \text{ m/s}$, y fue durante ese período que se registraron las menores concentraciones de MP en el sargazo. Contrariamente, de marzo a mayo, la velocidad del viento fue menor, entre $14\text{-}15 \text{ m/s}$, y fue cuando se registró la mayor concentración de MP en las muestras. Adicionalmente, Marino-Tapia et al. (2011), analizaron la transformación del oleaje en la laguna arrecifal de Puerto Morelos, encontrando que una baja intensidad del oleaje reduce la dispersión vertical y la velocidad de dispersión horizontal de partículas, lo que podría explicar un acumulación de MP. En estudios a futuro, sería conveniente analizar el gradiente de contaminación por MP del sargazo, desde mar afuera hasta la laguna arrecifal

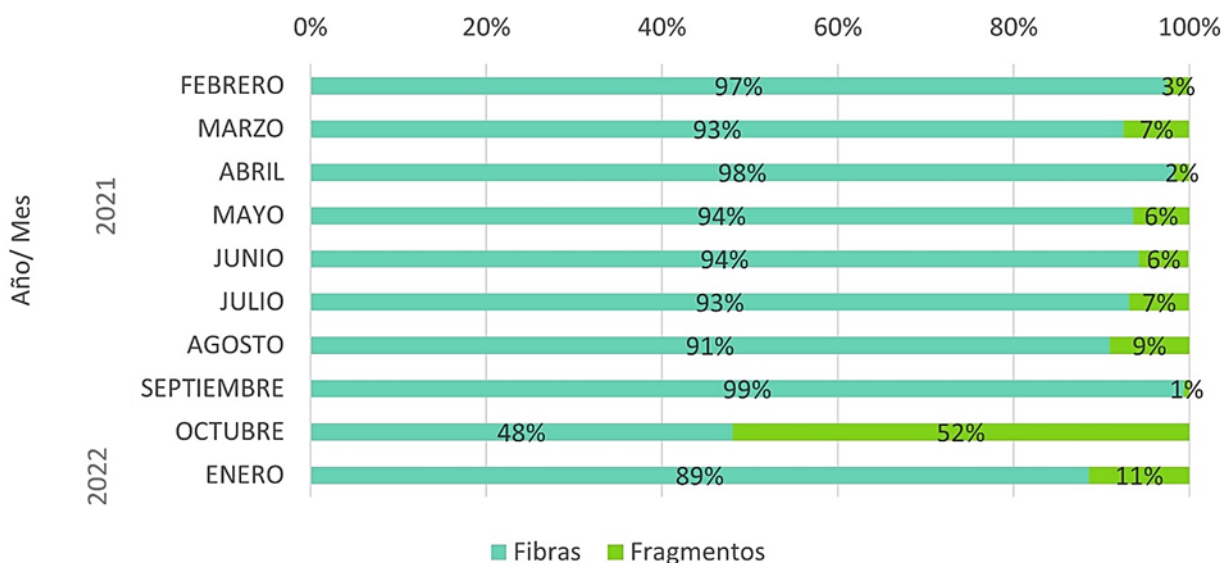


Figure 4. Abundancia relativa mensual de fibras y fragmentos de micro plásticos en muestras de sargazos procedentes de la orilla del mar en la localidad de Puerto Morelos, Quintana Roo, México (N = 3 por mes).

y en la playa. Esto debe de ir acompañado de un estudio en paralelo sobre la cantidad de MP en el agua marina y en los sitios de descarga de agua subterránea. Esto permitirá determinar si el sargazo se carga de los contaminantes en la laguna arrecifal o si llega a ésta contaminado por ellos, así como si los MP se desprende en la trayectoria de las masas de sargazo.

Por lo que respecta a la forma de los MP, en el presente estudio las fibras fueron las formas dominantes, con valores del 90%. Las fibras también se reportaron

como los MP dominantes (>95%) en seis playas arenosas de las Antillas menores (Bosker et al. 2018). Por el contrario, en dos playas del Caribe mexicano (Holbox y Playa del Carmen) los MP dominantes fueron los fragmentos (Alvarez-Zeferino et al. 2020). Sin embargo, en ese estudio se utilizó un tamiz de diámetro de malla de 1.13 mm, por lo que es altamente probable que perdieran las microfibras, que si bien pueden tener longitudes entre 1-5 mm, su diámetro por lo general es de 10-50 μm (Aranda et al. 2022).

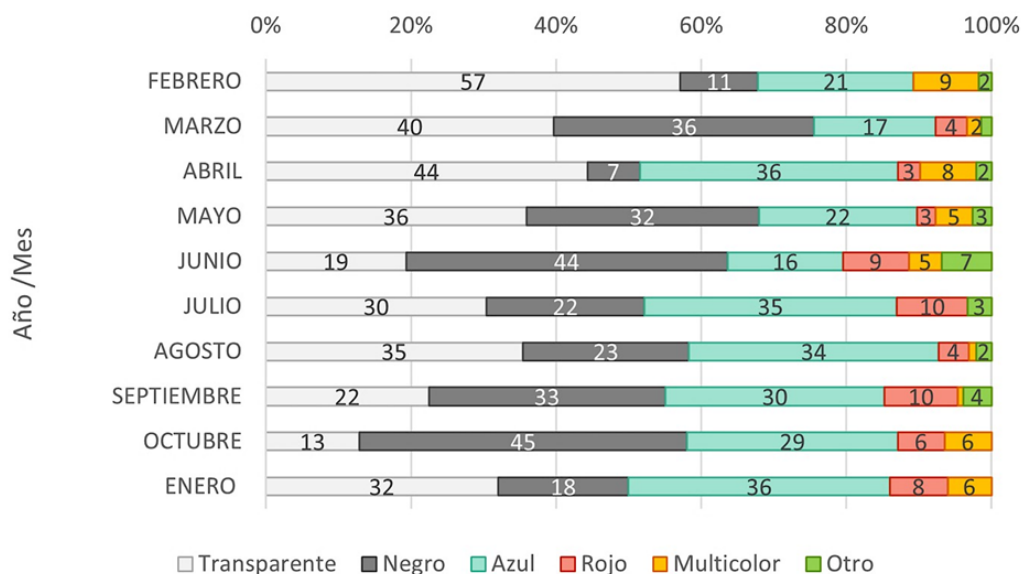


Figura 5. Porcentaje mensual de colores de los micro plásticos encontrados en muestras de sargazo procedentes de la orilla del mar en la localidad de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Los muestreos fueron realizados de Febrero a Octubre 2021 y enero 2022.

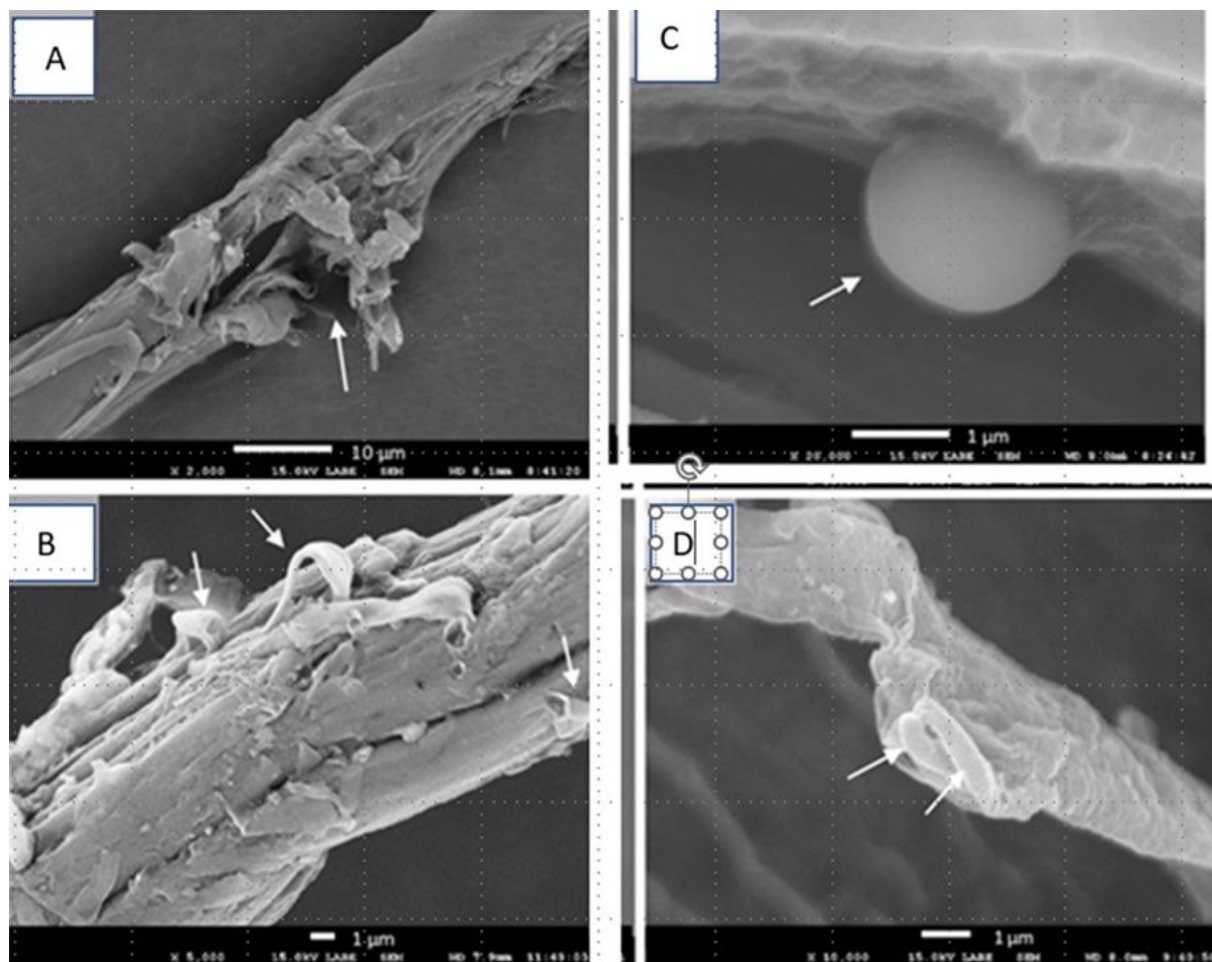


Figure 6. Imágenes de la morfoestructura de las microfibras de plástico obtenidas con un microscopio electrónico de barrido. A) Microfibra con detalles de fractura indicado por la flecha. B) Detalle del desgaste de una microfibra con forma laminar. C) Microfibra con objeto esférico adherido que podría ser una bacteria con diámetro de 2 μm . D) Microfibra con dos estructuras en forma de bastón de 4 μm .

La predominancia de microfibras encontradas en el presente estudio podría estar asociada a la falta de tratamiento de aguas residuales que descargan en la zona marina frente a Quintana Roo a través del acuífero. La contaminación por microfibras está vinculada al agua residual de lavado de ropa, mencionándose que se pueden liberar hasta 700,000 microfibras por 6 kg de ropa lavada en lavadora (Napper y Thompson, 2016). Las microfibras flotantes, debido a su amplia superficie y a su composición química, proveen de un sustrato duradero por lo que son recubiertas por un *biofilm* que se instala en semanas, funcionando éstas como un arrecife microbiano (Chubarenko et al., 2016; Dudek et al., 2020; Zettler et al., 2013).

La presencia de microplásticos y de metales pesados en el sargazo pelágico (Rodríguez- Martínez et al 2020) debe de tomarse en cuenta si se pretende valorizarlo, particularmente cuando los productos vayan a utilizarse con fines agrícolas o ganaderos. También debe estudiarse

el impacto de los MP que llegan con el sargazo a los ecosistemas costeros y debe de hacerse una disposición adecuada de estas algas para evitar contaminar del acuífero con MP.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Coley, Isabel, and J. Olivero-Verbel. 2015. "Microplastic Resin Pellets on an Urban Tropical Beach in Colombia." *Environmental Monitoring and Assessment* 187(7):435. doi: 10.1007/s10661-015-4602-7.
- Alvarez-Zeferino, J., Ojeda-Benítez, S., I, A. and Cruz-Salas, Martínez-Salvador, C., and A. Vázquez-Morillas. 2020. "Microplastics in Mexican Beaches." *Resources, Conservation and Recycling* 155. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104633.
- Aranda, Aldana, D., H. A. Oxenford, Medina, J., Delgado, G., Enríquez Díaz, M., Samano, C., Castillo Escalante, V., Bardet, M., Mouret, E. and C. Bouchon. 2022. "Widespread Microplastic Pollution

- across the Caribbean Sea Confirmed Using Queen Conch.” *Marine Pollution Bulletin* 178. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113582.
- Bosker, T., Guaita, L. and P. Behrens. 2018. “Microplastic Pollution on Caribbean Beaches in the Lesser Antilles.” *Marine Pollution Bulletin* 133:442–47. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.05.060.
- Candela, J. Tanahara, S., Crepon, T., Barnier, M., J. Sheinbaum. 2003. Yucatan Channel flow: Observations versus CLIPPER ATL6 and MERCATOR PAM models. *Journal of Geophysical Research* 108 (C12) <https://doi.org/10.1029/2003JC001961>
- Choi, J.S., Jung, Y-J. Hong, N-H., Hong, S.H., and J.W. Park. 2018. “Toxicological Effects of Irregularly Shaped and Spherical Microplastics in a Marine Teleost, the Sheepshead Minnow (*Cyprinodon Variegatus*).” *Marine Pollution Bulletin* 129(1):231–40. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.02.039.
- Chubarenko, I., A. Bagaev, M. Zobkov, and E. Esiukova. 2016. “On Some Physical and Dynamical Properties of Microplastic Particles in Marine Environment.” *Marine Pollution Bulletin* 108(1–2):105–12. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.04.048.
- Dudek, Kassandra L., Bianca N. Cruz, Beth Polidoro, and Susanne Neuer. 2020. “Microbial Colonization of Microplastics in the Caribbean Sea.” *Limnology and Oceanography Letters* 5(1):5–17. doi: 10.1002/lol2.10141.
- Feng Zhihua, Tao Zhang, Jiaxuan Wang, Wei Huang, Rui Wang, Juntian Xu, Guanghui Fu, and Guang Gao. 2020. “Spatio-Temporal Features of Microplastics Pollution in Macroalgae Growing in an Important Mariculture Area, China.” *Science of the Total Environment* 719. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137490.
- García-Sánchez Martha, Graham, Catherine, Vera, Elisa, Escalante-Mancera, Edgar, Álvarez-Filip, Lorenzo, and van Tussenbroek, Brigitta. I. 2020. “Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean”. *Aquatic Botany* 167: 103275. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103275>
- Godínez-Ortega, José Luis, Juan V. Cuatlán-Cortés, Juan M. López-Bautista, and van Tussenbroek, B. 2021. “A Natural History of Floating *Sargassum* Species (Sargasso) from Mexico.” in *Natural History and Ecology of Mexico and Central America*.
- Goss, Hayley, Jacob Jaskiel, and Rotjan, R. 2018. “*Thalassia Testudinum* as a Potential Vector for Incorporating Microplastics into Benthic Marine Food Webs.” *Marine Pollution Bulletin* 135:1085–89. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.08.024.
- Imhof, Hannes K., Jakub Rusek, Michaela Thiel, Justyna Wolinska and C. Laforsch,. 2017. “Do Microplastic Particles Affect *Daphnia Magna* at the Morphological, Life History and Molecular Level?” *PLOS ONE* 12 (11):e0187590. doi: 10.1371/journal.pone.0187590.
- Jeong, Chang-Bum, Hye-Min Kang, Min-Chul Lee, Duck-Hyun Kim, Jeonghoon Han, Dae-Sik
- Kukulka, T., G. Proskurowski, S. Morét-Ferguson, D. W. Meyer, and K. L. Law. 2012. “The Effect of Wind Mixing on the Vertical Distribution of Buoyant Plastic Debris.” *Geophysical Research Letters* 39(7):n/a-n/a. doi: 10.1029/2012GL051116.
- Li, Qiwei, Zhihua Feng, Tao Zhang, Cuizhu Ma, and Shi, H. 2020. “Microplastics in the Commercial Seaweed Nori.” *Journal of Hazardous Materials* 388. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122060.
- Marino-Tapia, I., Silva, R., Enriquez, C. Mendoza-Baldwin, E., Mazariegos-Ortiz, E., Rosales, MA., Carrillo-Ovalle, L., Pereira Cardoso, R., Costa Muniz, M. and R. Meigikos dos Anjos. 2020. “First Evidence of Microplastic Pollution in the El Quetzalito Sand Beach of the Guatemalan Caribbean.” *Marine Pollution Bulletin* 156. doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111220.
- Pérez-Alvelo, Kiani M., Eduardo M. Llegus, Janet M. Forestier-Babilonia, Camila v. Elías-Arroyo, Keisharie N. Pagán-Malavé, Guillermo J. Bird-Rivera, y Carlos J. Rodríguez-Sierra. 2021. “Microplastic Pollution on Sandy Beaches of Puerto Rico.” *Marine Pollution Bulletin* 164. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112010.
- Rochman, Chelsea M. 2013. “Plastics and Priority Pollutants: A Multiple Stressor in Aquatic Habitats.” *Environmental Science & Technology* 47(6):2439–40. doi: 10.1021/es400748b.
- Rodríguez-Martínez, R.E., Jordán-Dahlgren, E. and H.Chuanmin. 2022. “Spatio-temporal variability of pelagic *Sargassum* landings on the northern Mexican Caribbean”. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>
- Rodríguez-Martínez, Rosa E., Medina-Valmaseda, Alexis E., Blanchon, Paul, Monroy-Velázquez, Luz V., Almazán-Becerril, Antonio, Delgado-Pech, Bernardo, ... y García-Rivas, María C. 2019. “Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*”. *Marine Pollution Bulletin* 146:201–205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
- Rodríguez-Martínez, Rosa E., Ruiz-Rentería, Francisco, van Tussenbroek, Brigitta, Barba-Santos, Guadalupe, Escalante-Mancera, Edgar, Jordán-Garza, Guillermo, y Jordán-Dahlgren, Eric. 2010. “Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico”. *Revista de Biología Tropical* 58:23–43. ISSN 0034-7744.
- Rodríguez-Muñoz, Rodolfo, Aarón Israel Muñoz-Castillo, Jorge Iván Euán-Avila, Héctor Deanna, R and Webber, M. 2019. “Characterization of Microplastics in the Surface Waters of Kingston Harbour.” *Science of the Total Environment* 664:753–60. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.319.
- Rodríguez-Martínez RE, Roy PD, Torrescano-Valle N, Cabanillas-Terán N, Carrillo-Domínguez S, Collado-Vides L, García-Sánchez M, van Tussenbroek BI. 2020. Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018–2019. *PeerJ* 8:e8667 <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- van Tussenbroek, Brigitta I., Arana, Héctor A.H., Rodríguez-Martínez, Rosa E., Espinoza-Avalos, Julio, Canizales-Flores, Hazel M., González-Godoy, Carlos

- E., y Collado-Vides, Ligia 2017. “Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities”. *Marine Pollution Bulletin* 122(1-2):272–281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Wang, Mengqui, Hu, Chuanmin, Barnes, Brian B., Mitchum, Gary, Lapointe, Brian, y Montoya, Joseph P. 2019. “The great Atlantic *Sargassum* belt”. *Science* 365: 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Wright, Stephanie L., Richard C. Thompson, y Tamara S. Galloway. 2013. “The Physical Impacts of Microplastics on Marine Organisms: A Review.” *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 178:483–92. doi: 10.1016/j.envpol.2013.02.031.
- Xiao, Jie, Wang, Zongling, Song, Hongjun, Fan, Shiliang, Yuan, Chao, Fu, Mingzhu, ... y Hu, Chuanmin. 2020. “An anomalous bi-macroalgal bloom caused by *Ulva* and *Sargassum* seaweeds during spring to summer of 2017 in the western Yellow Sea, China”. *Harmful Algae* 93:101760. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2020.101760>
- Zettler, Erik R., Tracy J. Mincer, y Linda A. Amaral-Zettler. 2013. “Life in the ‘Plastisphere’: Microbial Communities on Plastic Marine Debris.” *Environmental Science and Technology* 47(13):7137–46. doi: 10.1021/es401288x.
- Zhang, Zhiwei, Hui Wu, Guyu Peng, Pei Xu, y Daoji Li. 2020. “Coastal Ocean Dynamics Reduce the Export of Microplastics to the Open Ocean.” *Science of the Total Environment* 713. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136634.