



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD MÉRIDA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS DEL MAR

**“Microplásticos y metales pesados en el sargazo de Puerto Morelos,
Quintana Roo, México”**

Tesis que presenta:

Tania Paulina Gil Cortés

Para obtener el Grado de:

Maestra en Ciencias en la especialidad de Biología Marina

Directora de Tesis: Dra. Luz María Dalila Aldana Aranda

Mérida, Yucatán

Octubre, 2022

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a la ciencia, con un deseo de que nunca se acabe esa apasionante curiosidad y búsqueda de la verdad en la humanidad.

RESUMEN

Hoy en día los microplásticos y el sargazo constituyen serios problemas ecológicos emergentes. Por un lado, los microplásticos son ubicuos, se han encontrado en especies marinas a las cuales provocan obstrucción en el sistema digestivo, desnutrición, tumoraciones, reducción de la capacidad reproductiva, entre otros efectos. Mientras que, el arribazón excesivo de sargazo provoca eutrofización, disminuye la cantidad de oxígeno y absorbe metales pesados provocando un impacto en especies y ecosistemas. El objetivo de este trabajo fue analizar la variación temporal de la presencia de microplásticos y metales pesados e identificar las características de los microplásticos del sargazo que arriba en la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo. Se cuantificó la presencia de los microplásticos y se identificó su forma y color con microscopía estereoscópica. Se identificó la presencia de metales pesados en el sargazo con Microscopía Electrónica de Barrido - espectroscopia de rayos X de Energía Dispersiva (SEM-EDS, por sus siglas en inglés). La mayor abundancia de microplásticos se encontró en abril y septiembre con un límite superior (LS) de 17.9 MP. g⁻¹ dw y 13.6 MP.g⁻¹ dw, respectivamente. Las menores abundancias se presentaron en junio 2021 y enero 2022 con LS 4 MP. g⁻¹ dw y 5.1 MP.g⁻¹ dw, respectivamente. Respecto a la proporción de colores, se observó que los microplásticos transparentes fueron los más abundantes de febrero a junio, con un pico de (47%) en marzo. De septiembre a enero, el color negro fue el predominante con su máxima en octubre (72%). El azul se encontró abundante con mayor presencia en agosto (33%). La forma predominante fue la fibra, con mayor presencia en abril (98%). El fragmento predominó en octubre (52%). En el análisis EDS se observó Cl, S, Al, Ti, Fe, Cu, Zn y As en las zonas desgastadas y rugosas de los microplásticos. Los elementos con presencia en todas las fibras fueron C, O, y Si. En los microplásticos se encontraron Al, S, Cl y trazas de Mg, Ca, Cu, Pb y As. En el sargazo se detectó en todos los meses C, O, S, Cl, K, Ca y en menor porcentaje P, Mg, N, Ni, Cu, Pd, Au, Pb, As y Hg.

ABSTRACT

Nowadays microplastics and sargasso are serious emerging ecological problems. On the one hand, microplastics are ubiquitous, they have been found in marine species to which they cause obstruction in the digestive system, malnutrition, tumors, reduced reproductive capacity, among other effects. Meanwhile, the excessive arrival of sargasso causes eutrophication, decreases the amount of oxygen, and absorbs heavy metals, causing an impact in species and ecosystems. The objective of this work was to analyze the temporal variation of the presence of microplastics and heavy metals, and to identify the characteristics of the microplastics of the sargassum that arrives on the coast of Puerto Morelos, Quintana Roo. The presence of microplastics was quantified and their shape and color were identified with stereoscopic microscopy. Heavy metals presence in sargassum were identified with Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray spectroscopy SEM-EDS. The highest abundance of microplastics was found in March and April, with an upper limit 17.9 MP. g⁻¹ dw and 13.6 MP.g⁻¹ dw respectively. In June 2021 and January 2022, the abundance was lower, with an upper limit of 4 MP. g⁻¹ dw and 5.1 MP.g⁻¹ dw. Regarding the proportion of colors, it was observed that transparent microplastics were the most abundant from February to June, with a peak of 47% in March. From September to January, black was the predominant color with maximum presence in October (72%). Blue was abundant with greater presence in August (33%). The predominant form was fiber with mayor presence in April (98%). Fragment was predominant in October (52%). In EDS analysis, Cl, S, Al, Ti, Fe, Cu, Zn, and As were observed in the worn and rough areas of the microplastics. The elements present in all the fibers were C, O, and Si. Al, S, Cl, Ti, Fe and traces of Mg, Ca, Cu, Pb and As were found. In sargasso, C, O, Na, S, Cl, K and Ca were detected in all months and in a lower percentage P, Mg, N, Ni, Cu, Pd, Au, Pb, As, and Hg.

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

Agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) Unidad Mérida, por permitirme llevar a cabo mis estudios de Maestría y el apoyo de sus instalaciones para la realización de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme una beca de tesis de Maestría CVU 1079631.

A la Dra. Dalila Aldana Aranda, en su calidad de directora por dirigir de mi tesis de maestría. Por su trabajo de asesora en las etapas de elaboración del protocolo de investigación y posteriormente en el análisis e interpretación de los análisis de estructura, ultra estructura y procesos de fragmentación de los microplásticos y en el sargazo bajo microscopia electrónica de barrido y sus análisis EDS. Agradezco el apoyo de equipo, materiales y reactivos del laboratorio de Biología y cultivo de moluscos bajo la dirección de la Dra. Aldana Aranda que permitieron realizar la presente tesis. Las múltiples sesiones de trabajo de análisis de resultados y sus aportaciones en la correcta interpretación permitieron estructurar la tesis.

Agradezco a los profesores investigadores miembros de mi comité de tesis, por parte del CINVESTAV IPN al Dr. Jorge Iván Euan Ávila y la Dra. Reyna Collí Dulá, profesores del Departamento Recursos del Mar. Como sínodo externo a la M. en C. Rosa Elisa Rodríguez Martínez de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, sus comentarios y sugerencias enriquecieron el contenido del presente trabajo. Así mismo, le agradezco por el apoyo brindado para la colecta sistemática mensual de las muestras de sargazo pelágico en Puerto Morelos, Quintana Roo, su secado, pesado y envío, cuyo costo de muestreo cubrió en su totalidad. De igual forma, agradezco su apoyo al brindarme datos de arribazones de sargazo de la zona de muestreo y por sus recomendaciones para el análisis de los resultados, dada su experiencia profesional con el sargazo.

A Víctor Castillo Escalante auxiliar de investigación del CINVESTAV IPN Unidad Mérida, en el Laboratorio de Biología y cultivo de moluscos por entrenamiento, capacitación, manejo e identificación de los microplásticos y procesamiento de las muestras. Por brindarme capacitación

técnica en el proceso de montaje de microplásticos para su posterior análisis en el microscopio electrónico, así como por su gran ayuda, consejos y calidez durante mi estancia en el laboratorio.

Al Dr. Víctor Rejón Moo por su apoyo en los análisis de microfibras de plástico en SEM y EDS del Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN; financiado por los proyectos FOMIX-Yucatán 2008-108160, CONACYT LAB-2009-01-123913, 292692, 294643, 188345 y 204822.

A la maestra en Ciencias Silvia Granados Puerto auxiliar de investigación del laboratorio de Química Marina del CINVESTAV IPN Unidad Mérida quien me brindó equipo, materiales y herramientas para el proceso de filtrado de diversas soluciones libres de partícula de microplásticas requeridas para la realización de esta tesis.

Con especial agradecimiento al profesor de estadística del departamento Recursos del Mar del CINVESTAV IPN, Dr. Jorge Luis Montero Muñoz por su apoyo profesional en el tipo de análisis estadístico sobre la abundancia de microplásticos y sobre el efecto del tamaño de la muestra que forman parte de esta tesis.

Al profesor investigador el Dr. José Quinatzin, por su apoyo en la interpretación de la imagen 15 B, D y F de posibles estructuras bacterianas.

A la Ing. Teresa Colás Marrufo auxiliar de investigación del laboratorio de Ictiología por brindar apoyo de materiales y equipo de laboratorio necesarios para la realización de la tesis.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Al personal del CINVESTAV por confiar en mi capacidad académica y permitirme realizar la maestría.

A la Dra. Ximena Renan Galindo por su gran amabilidad, apoyo y consejos durante mi maestría.

A Marisa quien siempre tuvo la mejor disposición a ayudar y resolver dudas sobre los trámites administrativos.

Al Dr. Jorge Euan Ávila por brindar amabilidad, consejos y guía en mi proceso académico.

Al todos los mis profesores por contribuir a mi formación académica.

Al Dr. Víctor Rejón Moo por sus amenas pláticas, su amabilidad y contribución en mi formación académica y personal.

A mis compañeras y amigas de laboratorio Pauline Sindou y Alexa Hernández por su amistad en tan corto tiempo y los buenos ratos que pasamos.

A mis compañeros de salón digital por el acompañamiento, risas, consejos y aportación en la maestría.

A mi familia quienes siempre me apoyaron, me brindaron su amor, confianza, sus consejos y sus felicitaciones en cada logro.

Finalmente me agradezco, por haber llegado hasta aquí. Por haber superado la adversidad, por continuar con esta pasión que es la ciencia.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	SARGAZO	1
1.1.1	CICLO DE VIDA DEL SARGAZO.....	1
1.1.2	IMPORTANCIA DEL SARGAZO	3
1.1.3	PROBLEMÁTICA DEL SARGAZO.....	4
1.1.1	USOS DEL SARGAZO.....	5
1.2	MICROPLÁSTICOS	5
1.3	METALES PESADOS.....	7
2.	ANTECEDENTES	8
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
4.	JUSTIFICACION Y APLICABILIDAD	12
5.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	12
6.	OBJETIVOS	12
	Objetivo General	12
	Objetivos específicos.....	13
7.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
7.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	13
7.2	COLECTA DE SARGAZO	14
7.3	PROCESAMIENTO DE MUESTRA.....	14
7.4	CUIDADOS DE CONTAMINACIÓN DE LA MUESTRA.....	16
7.5	ANÁLISIS ESTEREOSCÓPICO.....	17
7.6	ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	17
7.7	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	18
8.	RESULTADOS.....	18
8.1	ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS.....	18
8.2	FORMAS DE MICROPLÁSTICOS.....	21
8.3	PROPORCIÓN DE COLORES DE MICROPLÁSTICOS.....	23
8.4	MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN ESTERESCOPIO	25
8.5	MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN MEB	26
8.6	ANÁLISIS ELEMENTAL EDS EN MICROPLÁSTICOS.....	29
8.3	ANÁLISIS ELEMENTAL EDS EN SARGAZO	34

9.	DISCUSIÓN.....	40
9.1	ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS.....	40
9.2	FORMA DE MICROPLÁSTICOS.....	44
9.3	COLORES DE MICROPLÁSTICOS.....	45
9.4	MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN MEB	47
9.5	METALES PESADOS EN MICROPLÁSTICOS.....	47
9.6	METALES PESADOS EN SARGAZO	47
10.	CONCLUSIONES	48
11.	PERSPECTIVAS	49
	LITERATURA CITADA.....	50
	ANEXOS	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de elementos por espectroscopia de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) de microfibras en sargazo de Puerto Morelos. Datos presentados en porcentaje de peso seco.....	30
Tabla 2. Análisis de elementos EDS de láminas de sargazo del año 2021 y enero 2022 de Puerto Morelos. Datos presentados en media de porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3).	35
Tabla 3. Análisis de elementos de mayor preocupación ambiental en láminas de sargazo del año 2021 y enero 2022 de Puerto Morelos. Datos presentados en media de porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3).....	36
Tabla 4. Mapa de calor del análisis de elementos EDS de sargazo de Puerto Morelos 2021 y enero 2022. Valores máximos de cada mes presentados en porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3). 37	
Tabla 5. Tabla comparativa de la abundancia de microplásticos (MP.kg ⁻¹ dw) en el Caribe.	41
Tabla 6. Cantidad, forma y color de microplásticos encontrados en las muestras.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Corrientes que influyen el movimiento del sargazo del Mar de los Sargazos. Imagen tomada de (AOML Communications to Physical Oceanography, 2020).....	2
Figura 2. Registro de biomasa media mensual en el mar Caribe y Atlántico Central. Imagen tomada y modificada de (Wang et al., 2019).	3
Figura 3. Mapa representativo del área de estudio. Municipio Puerto Morelos, Quintana Roo. Marcador rojo señalando la zona de recolección de muestra para las coordenadas LN 20.868210 y LW -86.867139. Imagen tomada de (Google Earth, s.f.)	13
Figura 4. Esquema de procesamiento de muestra de sargazo. Incluyendo el proceso de digestión de materia orgánica y enjuague de sargazo.....	15
Figura 5. Abundancia de microplásticos en líquido derivado del enjuague de la muestra. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * p< 0.05, ** p<0.01.	19
Figura 6. Abundancia de microplásticos en fronda de sargazo. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * p< 0.05, ** p<0.01.....	19
Figura 7. Abundancia de microplásticos en muestra completa de sargazo. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * p< 0.05, ** p<0.01.....	20
Figura 8. Proporción de abundancia de microplásticos encontrados en líquido y fronda de la muestra.	21
Figura 9. Proporción de formas de los microplásticos en la muestra completa (líquido y fronda) de cada mes muestreado (n=3).	22
Figura 10. Proporción de formas de los microplásticos en cada mes en líquido derivado del enjuague. .	22
Figura 11. Proporción de formas de los microplásticos en cada mes en la fronda de sargazo.	23
Figura 12. Proporción de colores en porcentaje de microplásticos encontrados en sargazo para cada mes muestreado.	24
Figura 13. Microplásticos en sargazo observados a través del estereoscopio todas captadas con aumento 35x excepto imagen A que se observó a 8x. A y B micro fragmentos color negro. C y D microfibras representando diversidad de longitud. E microfibra multicolor azul – transparente. F microfibra color rojo. * Estipe, ◊ Lámina.....	25
Figura 14. Imágenes de la morfo estructura de microfibras capturadas a través de microscopio electrónico de barrido. Se observan distintas formas de desgaste. A y B) microfibra roja de marzo 2021. C y D) microfibra negra de marzo 2021. E y F) microfibra multicolor transparente-morado-rosa de febrero 2021. En la imagen A se observan oquedades que denotan desgaste, en la B se tienen deformidades y protuberancias, En la imagen C se aprecia una rotura transversal denotando un daño en la zona. En el recuadro D se presenta agrietamiento e indicios de partición debido al daño, en el E se muestran desprendimientos laminares a lo largo, en la imagen F se aprecia un desgaste superficial con un desprendimiento laminar longitudinal. Imágenes capturadas a 15 kV LABE.....	27
Figura 15. Imágenes de la morfo estructura y dimensión de microfibras de marzo 2021 capturadas a través de microscopio electrónico de barrido. A, C y E) microfibras completas con longitud de 1200 μm, 963 μm y 340 μm respectivamente. A y B) microfibra negra. C y D) microfibra azul. E y F) microfibra roja. En las microfotografías B y D se observa la morfo estructura de microfibras plásticas con severo desgaste en la	

cual fue posible observar la presencia de estructuras de otros microorganismos colonizando las microfibras, microfotografías de Dra. D. Aldana Aranda el 22 febrero 2022. En la microfotografía F se observa imagen de objeto similar a bacterias. Imágenes capturadas a 15 kV LABE.	28
Figura 16. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra negra de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.	31
.....	32
Figura 17. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra roja de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.	32
Figura 18. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra azul de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.	33
Figura 19. Análisis elemental de lámina de sargazo sin tratamiento previo. Tres análisis en una misma zona. A y B) Lámina de sargazo analizada. C) El primer punto analizado presenta altos picos de Cr y Fe presencia de Sr, As y Cu entre otros. D) El segundo punto de análisis presentó mayor presencia de Cd, Cl y K y ausencia de Fe y Cr. E) El tercer análisis presenta un pico elevado de Pb, S y K, ausencia de Fe y Cr y presencia de As, Sr, Mg, entre otros.	38
Figura 20. Análisis elemental de partícula de sargazo sin tratamiento previo. Tres análisis en una misma zona. A y B) Partícula de sargazo analizada. C) El primer punto analizado presenta altos picos de Cl y K, presencia de S, Na, Ni, entre otros y ausencia de Mg a comparación de los otros puntos. D) El segundo punto de análisis presentó mayor presencia de Na y menor de K. E) El tercero presenta un pico elevado de S y K, y menor presencia de Na y Cl.	39
.....	44
Figura 21. A) gráfico de abundancia de microplásticos en sargazo (datos de este trabajo), B) gráfico de biomasa de sargazo recolectado en la costa de Quintana Roo 2021-2022 (datos proporcionados por Mtra. Rosa Rodríguez Martínez del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Puerto Morelos, Quintana Roo).	44
Figura 22. Sargazo observado a través del microscopio óptico. A y B fronda procesada con materia orgánica eliminada. C, D y E microfibras observadas sobre sargazo procesado.....	59
Figura 23. Sargazo tratado con hidróxido de sodio y posteriormente con peróxido de hidrógeno.	60
Figura 24. Sargazo tratado con hidróxido de sodio y posteriormente con ácido clorhídrico.	60
Figura 25. Sargazo tratado con peróxido de hidrógeno colocado a 65°C en agitación por 48 h.	61
Figura 26. Sargazo tratado con peróxido de hidrógeno colocado a 65°C en agitación por 94 h.	61

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. ESTANDARIZACIÓN DE METODOLOGÍA	59
ANEXO 2. DATOS	62

1. INTRODUCCIÓN

1.1 SARGAZO

El sargazo es un alga marina multicelular, presenta estípites firmes los cuales sostienen láminas abundantes que conforman la fronda. Posee vejigas globulares llenas de gas, permitiendo que la planta se mantenga erguida en el caso que se encuentre sumergida y, a las especies pelágicas *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*, les permite que permanezcan a flote en la superficie en donde llevan a cabo todo su ciclo de vida. Si bien solo hay dos especies de sargazo pelágico, cada especie consta de varias formas morfológicas. Estas formas, también difieren en abundancia. La forma más común de *S. natans* es *S. natans I*, que se caracteriza por láminas y estipes pequeños y estrechos, y vejigas puntiagudas con la mitad de abundancia que las láminas. En contraste, *S. fluitans III*, la forma más común de *S. fluitans*, muestra ramificaciones de orden superior con foliación densa y vejigas típicamente más numerosas que las láminas (Martin, 2016).

1.1.1 CICLO DE VIDA DEL SARGAZO

La mayor concentración de sargazo pelágico solía estar en el Mar de los Sargazos, en el giro subtropical del atlántico norte, delimitado por distintas corrientes que lo rodeaban como la Corriente del Golfo en el borde occidental, la Corriente del Atlántico Norte en el norte, la Corriente de Canarias en el este y la Corriente Ecuatorial Atlántica de Norte en el sur (Fig. 1). Gracias a que el uso de satélites ha facilitado el estudio y el seguimiento de la distribución del sargazo, se conoce que las acumulaciones de sargazo en el Mar de los Sargazos pueden ser masivas, segregadas, distribuidas en pequeños parches, o en líneas extensas debido a la circulación de Langmuir. El sargazo proveniente del Mar de los Sargazos siempre ha llegado de forma intermitente a las costas del Caribe Mexicano y del Golfo de México. Según Godínez Ortega y colaboradores (2021), las algas de este mar eran transportadas hacia el sur debido a anomalías de alta presión, posteriormente introducidas en el Caribe a través de los Pasajes de Barlovento, Mona y Anegada, arrastrados por la Corriente de Yucatán y luego reingresaban al Mar de los Sargazos directamente a través del Estrecho de Florida o previamente podían pasar por un bucle en el Golfo de México. El sargazo se movía únicamente a través de esta gran área desde la primavera y principios del verano, y se dirigía hacia el Mar de los Sargazos durante el otoño y

principios del invierno. En 2011, se encontró una nueva área de concentración de sargazo en el Atlántico tropical del sur, cerca del Ecuador, la región de recirculación ecuatorial del norte (NERR por sus siglas en inglés) (Fig. 1) (AOML Communications to Physical Oceanography, 2020).

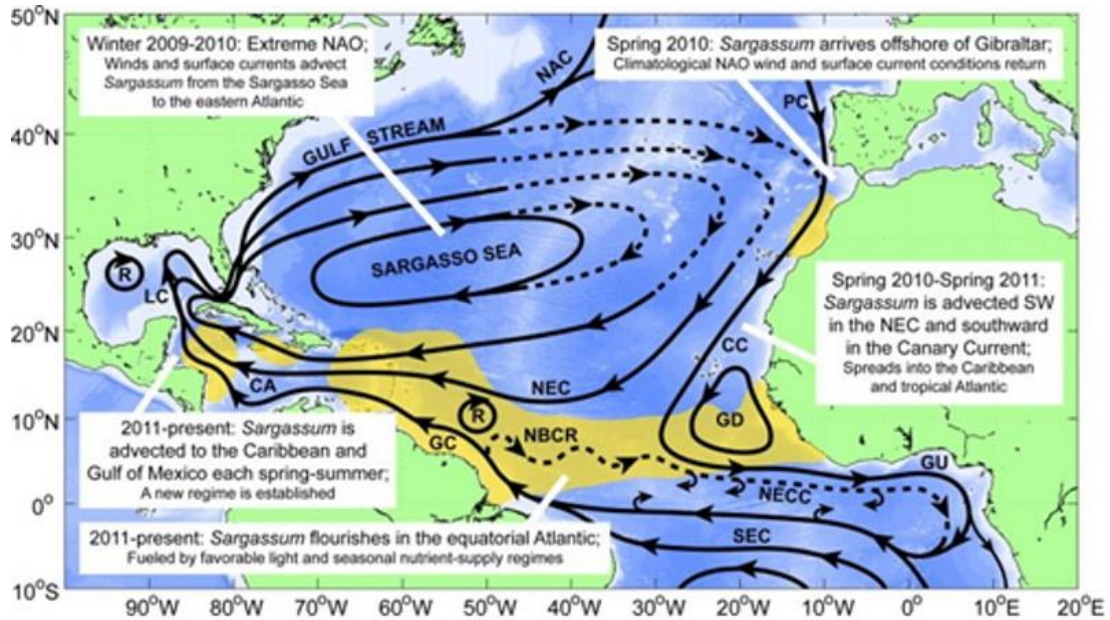


Figura 1. Corrientes que influyen el movimiento del sargazo del Mar de los Sargazos. Imagen tomada de (AOML Communications to Physical Oceanography, 2020).

Desde entonces, el sargazo se ha introducido intermitentemente en el sur del Caribe, para ser transportado hacia el norte por las corrientes del Caribe y Yucatán. Esta nueva área de concentración de sargazo en el NERR va desde la costa este de África hasta Brasil, a lo largo del Caribe y hacia el Golfo de México y ha sido denominada el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB) (Wang et al., 2019). En el mes de junio de 2018 se reportó un pico del GASB, el cual cubrió 6,000 km² con un estimado de 20 millones de toneladas de masa de algas, el mayor florecimiento de macroalgas registrado hasta momento (Fig. 2). La afluencia de sargazo al Caribe muestra patrones estacionales, ya que la contracorriente ecuatorial del norte disminuye desde enero hasta mayo; por lo tanto, el flujo superficial generado hacia el oeste transporta sargazo hacia el Mar Caribe Sur. Una vez liberado del NERR y transportado al Caribe, el sargazo fluye a través del Caribe y posiblemente del Golfo de México para terminar su viaje en el Mar de los Sargazos. Las masas pelágicas de sargazo arriban a las costas mexicanas después de su introducción al sur del

Caribe. Los vientos alisios del este y sureste transportan las masas de sargazo acumuladas en la corriente de Yucatán hacia la costa mexicana, inundando las playas con algas en intervalos estacionales desde marzo/abril hasta agosto/septiembre (Godínez-Ortega et al., 2021).

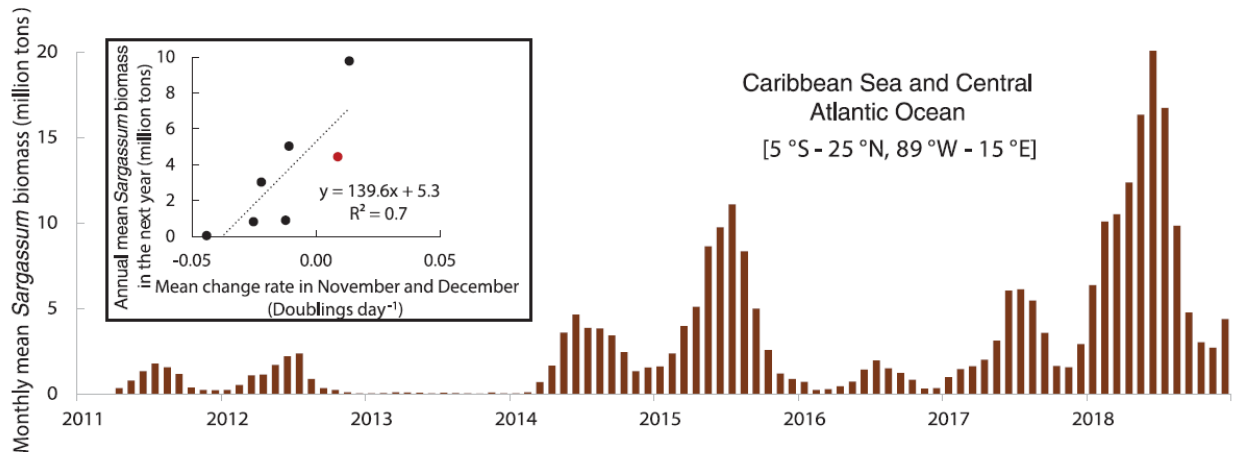


Figura 2. Registro de biomasa media mensual en el mar Caribe y Atlántico Central. Imagen tomada y modificada de (Wang et al., 2019).

1.1.2 IMPORTANCIA DEL SARGAZO

Las especies de sargazo pelágico son de gran importancia para muchas especies ya que sustenta una diversidad relativamente alta de especies ya sea en todo su ciclo de vida o para determinadas etapas. El mar de sargazo, ubicado en el Atlántico norte, funciona como hábitat primario para especies endémicas como el pez de los sargazos y otras especies bentónicas como cangrejos, camarones, caracoles, poliquetos, platelmintos y nudibranchios (Martin, 2016). El sargazo también es refugio temporal de diversas especies de peces, anguilas, etc. Para las tortugas marinas, actualmente amenazadas y en peligro de extinción, el sargazo representa un hábitat muy importante para su etapa juvenil (Witherington et al., 2012). Se ha registrado que ciertas aves marinas utilizan las acumulaciones de sargazo para descansar (Haney, 1986). Con la gran cantidad y diversidad de organismos marinos disponible en estas zonas, los predadores como atún, tiburones y pez vela se agregan en esta área para alimentarse. El sargazo es un ecosistema que se encuentra en peligro debido al constante tránsito de barcos de carga, “cosecha” comercial, derrames de petróleo y el calentamiento global, entre otros. En cantidades moderadas se ha visto que la llegada del sargazo a las costas puede incrementar la disponibilidad

de nutrientes funcionando como un fertilizante para las plantas costeras (Williams y Feagin, 2010) y también puede prevenir la erosión de las playas (Innocenti et al., 2018).

1.1.3 PROBLEMÁTICA DEL SARGAZO

Si bien la llegada de sargazo en cantidades moderadas puede ser benéfico para la costa, se ha reportado que su llegada en cantidades excesivas tiene efectos perjudiciales para los ecosistemas cercanos al evento. Los lixiviados y la materia orgánica particulada de las algas marinas tiñen el agua y consumen el oxígeno disuelto, esto provoca una disminución de luz e hipoxia afectando a los pastos marinos y corales. De igual forma provoca acumulación de materia orgánica en los sedimentos, aumenta la turbidez en el agua, causa erosión de las playas debido a malas prácticas de remoción de la materia e induce pérdida de praderas de pastos marinos cerca de la costa entre otros (Rodríguez-Muñoz et al., 2021; van Tussenbroek et al., 2017).

Según van Tussenbroek y colaboradores (2017), en el Caribe mexicano se han observado en ciertas zonas de arribazón excesiva de sargazo animales muertos entremezclados con el sargazo en descomposición, incluyendo peces, tortugas, pepinos de mar, poliquetos y langostas, los cuales se consideraron en el reporte muertos por anoxia. Asimismo, se encontró debajo del agua marrón, mortandad de pastos marinos debido a la reducción de luz y acumulación de materia orgánica. La presencia de este fenómeno puede contribuir de manera importante a la eutrofización de ambientes oligotróficos provocando altas cantidades de nitrógeno. Esto contribuye al deterioro de los arrecifes coralinos que soportan una alta biodiversidad, tienen gran importancia para la protección costera, soportan pesca comercial y de subsistencia, y son contribuyentes vitales a la economía del estado basada en el turismo (Rodríguez-Martínez et al., 2017).

En cuanto a las repercusiones que pueden tener las personas que se encuentren cercanas a la zona de arribazón, se ha reportado por parte del personal que trabajó en la limpieza la presencia de dolores de cabeza, náusea y problemas respiratorios, presumiblemente debido a la inhalación de gas de ácido sulfhídrico (H_2S). Exposición a niveles bajos pero crónicos de H_2S (100-1000 ppb) induce problemas del sistema nervioso, respiratorio, muscular y circulatorio, tal como se estableció en encuestas a personas en áreas industriales (Legator et al., 2001). Lamentablemente

no se realizaron mediciones de los niveles de este gas en la atmosfera durante la afluencia de sargazo. Además, es altamente corrosivo y ocasiona la descompostura de aparatos electrónicos y obscurecimiento de objetos de metal en las casas cercanas a la playa (Rodríguez-Martínez et al., 2017).

1.1.1 USOS DEL SARGAZO

El primer uso que se tiene registrado del sargazo fue de un físico portugués en 1578 quien lo ingirió crudo y lo cocinó para un tripulante con infección urinaria la cual mejoró con el alga (Acosta, 1578). Posteriormente en 1750, un naturalista holandés describió al alga como un buen remedio contra la retención de líquido de los riñones (Rumphius, 1750). En 1764, Jacques Valmont menciona que lo ingieren en ensaladas y presenta buenos efectos contra la retención de orina y el escorbuto (Valmont de Bomare, 1764). A partir del siglo veinte e inicios del siglo veintiuno, se realizaron diversos estudios tecnológicos e investigaciones en donde mencionan la utilidad del sargazo pelágico como biocombustible, así como para obtener polisacáridos, proteínas, alginatos y fucooidanos. También contribuye a la producción de productos farmacéuticos con fucooidanos (antiproliferativo, antiprotozoario, antioxidante, hepatoprotector, antileishmanial), para la elaboración de fertilizantes, cosméticos como tratamiento para el cabello, bioplásticos, biopolímeros, celulosa y otros productos como zapatos, ladrillos, papel, barnices y cartón, entre otros. También se ha reportado su uso para la biorremediación (Godínez-Ortega et al., 2021).

1.2 MICROPLÁSTICOS

Uno de los contaminantes de mayor presencia en nuestra vida diaria son los plásticos. La producción de estos ha incrementado de forma exponencial en los últimos años llegando en el 2019, a una producción anual de 368 millones de toneladas en todo el mundo (Plastic Europe, 2020). Los plásticos consisten en un conjunto de polímeros (polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), policarbonato (PC), metacrilato de polimetilo (PMMA), poliuretano (PU), etc.) y aditivos (estabilizadores, retardantes de llama, plastificantes, cargas y pigmentos) que les confieren ciertas características como flexibilidad, resistencia y color (Bergman et al., 2015; Hirt y Body-Malapel, 2020). Este material al

estar presente en múltiples objetos y ambientes se expone a diversos factores que lo degradan y fragmentan, como rayos UV, actividad microbiana (biodegradación), oxidación, desgaste mecánico por el movimiento de las olas y/u otros objetos. El lavado de los textiles compuestos por materiales plásticos propicia el desgaste y desprendimiento de partículas en forma de fibra (Aranda et al., 2022; Hirt y Body-Malapel, 2020). La degradación de los plásticos da origen a partículas de distintos tamaños: nanoplásticos ($\leq 0,1 \mu\text{m}$), microplásticos ($< 5 \text{ mm}$), mesoplásticos (0.5–5 cm), macroplásticos (5–50 cm) y megaplásticos ($> 50 \text{ cm}$) (Lebreton et al., 2018). También se pueden encontrar en distintas formas como perlas (en productos para el cuidado de la salud personal), pellets (preproducción de perlas de plástico), fibras (industria textil), espumas (industria alimentaria, embalaje) y fragmentos (degradación de plástico) (Hirt y Body-Malapel, 2020). Los microplásticos (MPs) pueden provenir de distintas fuentes. Se les denominan microplásticos primarios a aquellos que son creados de este tamaño para productos como cosméticos, juguetes y materiales abrasivos. En cambio, aquellos que se fragmentan de macroplásticos o se originan del desgaste de textiles (microfibras) son llamados microplásticos secundarios (Cole et al., 2011). Los microplásticos son un tipo de contaminación emergente que se encuentra en todos los ecosistemas, desde los polos hasta los trópicos. Hoy en día, debido a su ubicuidad, se han encontrado en diversos organismos (Alimba y Faggio, 2019) incluyendo los organismos marinos como peces, invertebrados, anfípodos, poliquetos, holoturoideos, equinodermos, entre otros (Wright et al., 2013). Asimismo, se ha reportado que los plásticos en el medio marino absorben contaminantes químicos presentes en el océano (por ejemplo, contaminantes orgánicos persistentes (COP) y metales) (Bergman et al., 2015). Por esto las Naciones Unidas y la Unión Europea informan que más del 50% de las composiciones plásticas son sustancias químicas peligrosas (Rochman, 2013). Diversos estudios han realizado análisis sobre la toxicidad que los MPs inducen en los organismos marinos. En 2017, Imhof y colaboradores detectaron alteraciones en la expresión de genes del organismo modelo *Daphnia magna* relacionados a respuestas de estrés tras la ingestión de microplásticos (Imhof et al., 2017). Jeong y colaboradores realizaron un estudio de toxicidad de nano y microplásticos de poliestireno en donde obtuvieron una alteración en la tasa de desarrollo, fecundidad y estrés oxidativo en el organismo *Paracyclopsina nana* (Jeong et al., 2017). En 2018 Choi y colaboradores detectaron

acumulación de microplásticos irregulares y con forma de esfera en el tracto digestivo de la especie *Cyprinodon variegatus* causándole distensión intestinal, así como estrés oxidativo celular y una disminución en la actividad conductual (Choi et al., 2018; Jeong y Choi, 2019). Asimismo, se ha visto que pueden provocar obstrucción en el sistema digestivo, desnutrición, disminución en la capacidad reproductiva e incluso la formación de tumores (Egbeocha et al., 2018).

1.3 METALES PESADOS

Las actividades antrópicas asociadas con la contaminación por metales incluyen la minería, la fundición, la combustión de combustibles fósiles, la liberación de desechos industriales, farmacéuticos y químicos, la eliminación incorrecta de desechos electrónicos y productos manufacturados, la producción de metales ferrosos y no ferrosos, el uso de pesticidas y fertilizantes, entre otros (Coração et al., 2020).

Los metales pueden estar disponibles para los organismos, ya que las variaciones en los parámetros biogeoquímicos como la salinidad, la temperatura, el pH, el potencial redox, el contenido de materia orgánica, la comunidad microbiana y las concentraciones de óxidos de hierro y manganeso pueden hacerlos accesibles a la cadena alimentaria (Bayen, 2012; Bryan y Langston, 1992). Por lo tanto, más allá de su concentración y especiación, la toxicidad de los metales traza está relacionada con las condiciones fisicoquímicas ambientales. Como los metales traza no son degradables, pueden persistir en el medio ambiente durante mucho tiempo (Nagajyoti et al., 2010). Muchos organismos marinos pueden bioacumular metales en sus tejidos y órganos a lo largo de su ciclo de vida (Ferreira et al., 2013; Nagajyoti et al., 2010). La biota marina transfiere metales a través de la cadena trófica, en un proceso conocido como biomagnificación (Bayen, 2012; Ferreira et al., 2013). Los metales dañan el ADN y los procesos enzimáticos de los organismos, afectando las funciones celulares y tisulares, provocando alteraciones en el crecimiento, la reproducción, el sistema inmunológico y el metabolismo, o incluso la muerte. Estos efectos a nivel individual, a su vez, se reflejan en los niveles de población y comunidad. Por tanto, los metales actúan como un factor perturbador en las comunidades naturales, disminuyendo la diversidad y favoreciendo a las especies oportunistas. En los seres

humanos, los metales pueden causar muchos efectos nocivos, incluidos los carcinógenos, mutágenos y neurotóxicos (Coração et al., 2020).

Debido a la gran abundancia de sargazo que llega a la costa y el riesgo que representan los microplásticos y metales pesados en los ecosistemas marinos, se plantea en este trabajo analizar la variación temporal de la abundancia de microplásticos y presencia de metales pesados en el sargazo que arriba en la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo; con el fin de contar con mejores bases en la toma de decisiones para el manejo, gestión y aprovechamiento de la macroalga.

2. ANTECEDENTES

2.1 MICROPLÁSTICOS EN EL CARIBE

Carpenter y Smith informaron por primera vez de desechos plásticos en el medio marino en 1972, al tomar muestras de la comunidad pelágica de *Sargassum* del oeste del Mar de los Sargazos. Atribuyeron su observación al vertido de desechos de las ciudades o por buques de carga y de pasajeros, y sugirieron que, con el aumento en la tasa de producción de plástico, combinado con malas prácticas de eliminación de desechos, los desechos plásticos se acumularán en el mar con el tiempo (Carpenter y Smith, 1972).

En Latinoamérica y el Caribe se ha reportado la presencia de microplásticos en diversos ambientes marinos. En 2015, Acosta Coley y Olivero Verley reportaron la presencia de microplásticos en una playa urbana en Cartagena, Colombia. Se colectaron muestras de pellets durante cinco meses. Encontraron que el color predominante en los pellets fue blanco, con superficies lisas y poca presencia de oxidación. Sin embargo, también se encontraron algunos con grietas y facilidad de fragmentación. La mayoría de los microplásticos analizados presentaron composición de polietileno seguido de polipropileno (Acosta-Coley y Olivero-Verbel, 2015).

En 2018, se realizó un estudio en la especie de pasto marino *Thalassia testudinum* en el atolón de Turneffe. Los investigadores tomaron la hoja de pasto marino, la analizaron visualmente y fotografiaron para identificar los microplásticos que pudiera contener. Encontraron que el 75%

de las hojas de pasto marino contenían microplásticos incrustados en su mayoría en forma de fibra (Goss et al., 2018).

Bosker y colaboradores en 2018 llevaron a cabo un estudio sobre la contaminación por microplásticos en las playas de cuatro islas de las Antillas Menores (Anguila, San Bartolomé, San Eustaquio y San Martín). En promedio, encontraron 261 ± 6 MP.kg⁻¹ de arena seca, con un máximo de 620 ± 96 MP.kg⁻¹ en San Martín. En ese estudio se encontró que más del 95% de los microplásticos fueron fibras (Bosker et al., 2018).

Por otro lado, en 2019, Deana Rose y Mona Webber realizaron una investigación sobre la abundancia, la distribución espacial y las características de los microplásticos de la superficie del agua del puerto Kingston en Jamaica. Se reportó que no hubo variabilidad espacial en la concentración de microplásticos. La mayor concentración fue de 5.73 partículas/m² (2,697,674.13 partículas/km²). Hubo predominancia de microfragmentos de 1 mm y 2.5 mm, con una composición de polietileno y polipropileno (Rose y Webber, 2019).

En México, Alvares Zaferino y colaboradores (2020) investigaron la abundancia de microplásticos en las playas. Para las costas de Quintana Roo se encontró una media de 66.9 ± 63.1 MP/m² en Holbox y 112.7 ± 82.7 MP/m² en Playa del Carmen. La forma más común encontrada en estas playas fue el fragmento, predominando el color blanco. La mayoría de los microplásticos recolectados en estas costas estuvieron compuestos de polietileno, polipropileno y poliestireno con ese orden de abundancia (Álvarez-Zeferino et al., 2020; Álvarez-Zeferino et al., 2020).

Finalmente, en 2022, Aranda y colaboradores realizaron un estudio sobre la abundancia de microplásticos en heces del caracol rosado (*Aliger gigas*) a lo largo del Gran Caribe. En esta investigación se reportó la mayor abundancia de MPs en Belice y el arrecife Alacranes en México con 270 ± 55 MP/individuo y 203 ± 29 MP/individuo, respectivamente. Mientras que, en Puerto Morelos, México se tuvo la menor abundancia con 43 ± 2 MP/individuo. Las microfibras de entre 1 y 1.5 mm fueron los microplásticos más comunes. Este estudio refleja, al menos en el ecosistema bentónico, una menor abundancia de microplásticos en Puerto Morelos a comparación de otras zonas del Gran Caribe (Aranda et al., 2022).

2.2 METALES PESADOS EN MICROPLÁSTICOS

Ashton y colaboradores (2010), expusieron pellets vírgenes de polietileno en un puerto del sureste de Inglaterra durante ocho semanas. Detectaron la absorción de los metales pesados Al, Fe, Mn, Cu, Pb, Zn y Ag provenientes del agua de mar (Ashton et al., 2010).

En 2012, Holmes y colaboradores analizaron la adsorción de metales en pellets de resina de polietileno recolectados en cuatro playas del suroeste de Inglaterra. Encontraron concentraciones medias de metales en el orden: Cr (44–430 µg/g) > Ni (40–131 µg/g) > Fe (41–97.8 µg/g) > Co (17.7–107 µg/g) > Cd (1.09–76.7 µg/g) > Al (16.9–55.8 µg/g) > Zn (0.299–23.3 µg/g) > Mn (1.16–20.5 µg/g) > Cu (0.064–1.32 µg/g), respectivamente. Se reporta que estas son concentraciones altas en comparación con los valores de referencia para estos metales en el ambiente marino (Holmes et al., 2012).

Brennecke y colaboradores, en 2016, analizaron los microplásticos como un vector de contaminación de metales pesados en el ambiente marino. En donde en un experimento controlado de 14 días, se utilizaron esferas vírgenes de poliestireno y fragmentos de PVC expuestos a luz solar. Estos dos tipos de microplásticos fueron expuestos a metales pesados derivados de lixiviados de una pintura antiincrustante aplicada a placas de sedimentación de cloruro de polivinilo (PVC). Se encontró que el Cu y Zn fueron absorbidos por los dos tipos de microplásticos (Brennecke et al., 2016).

En una investigación realizada por Mohsen y colaboradores en 2019, se examinaron ocho metales pesados en asociación con microplásticos aislados de ocho granjas diferentes en China. El rango de las concentraciones promedio de los metales en asociación con microplásticos fue el siguiente: As 0.35–2.89 mg/kg, Cd (0.058–0.99 mg/kg), Cr (4.43– 37.47 mg/kg), Cu (1.37–21.67 mg/kg), Mn (7.57–98.35 mg/kg), Ni (1.31–43.2 mg/kg), Pb (2.56–40.8 mg/kg) y Zn (16.44–1190 mg/kg) (Mohsen et al., 2019).

Recientemente, Catrouillet y colaboradores, caracterizaron microplásticos depositados en las playas de Guadalupe. Por medio de nuevas técnicas de lixiviación y digestión ácida, se identificaron los elementos Al, Zn, Ba, Cu, Pb, Cd, Mn y Cr como pigmentos y aditivos (Catrouillet et al., 2021) .

2.3 METALES PESADOS EN EL SARGAZO

En 2017, se realizó una investigación sobre la presencia de especies endémicas de sargazo en Trinidad y Tobago, también se evaluó su estado de contaminación por metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos con cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS, por sus siglas en inglés). En cuanto a los metales pesados, se determinaron las siguientes concentraciones medias en $\mu\text{g}/\text{g}^{-1}$ (peso seco): Cd (4.59), Cu (5.05), Fe (744.98), Mn (69.10), Ni (8.33), Pb (8.59) y Zn (24.30)(Seepersaud et al., 2018).

Rodríguez-Martínez y colaboradores realizaron un análisis de sargazo a lo largo del Mar Caribe Mexicano entre agosto de 2018 y junio de 2019 en el cual evaluaron 28 elementos en 63 muestras por medio de un analizador de fluorescencia de rayos X no destructivo (XRF). Se reportaron concentraciones detectables de Al, As, Ca, Cl, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Th, U, V y Zn, las cuales variaron a lo largo del tiempo y espacio. El rango de arsénico total fue 24 - 172 ppm (peso seco). Asimismo, se reportó que 86% de las muestras superaron el límite máximo de arsénico establecido para algas destinadas a la alimentación animal (40 ppm peso seco) (Rodríguez-Martínez et al., 2020).

En las Islas Turcas y Caicos, Milledge y colaboradores (2020) llevaron a cabo un estudio sobre tres morfotipos de sargazo (*S. natans VIII*, *S. natans I* y *S. fluitans III*), y por medio de espectrometría de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES, por sus siglas en inglés) detectaron la presencia de Al, As, Cd, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mg, P, K y Zn. Siendo Ca, Mg y K los elementos de mayor abundancia (Milledge et al., 2020).

Recientemente, en una investigación del 2021, se analizó la presencia de metales pesados en la biomasa de *S. natans* y *S. fluitans* que llegaron a las costas de República Dominicana durante el año 2019 por medio de la espectroscopía de absorción atómica de llama (EAAF). Las cuales reportan presencia de plomo, cromo, níquel, cobre, cadmio y el zinc en niveles considerados normales en tejido foliar (Tejada-Tejada et al., 2021).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la última década ha aumentado la cantidad y frecuencia de arribazones de sargazo en las costas del Caribe provocando un efecto negativo en la fauna local, como peces y crustáceos de importancia comercial (Rodríguez-Martínez et al., 2019). Su descomposición libera gas de ácido sulfhídrico que, al inhalarlo, pone en riesgo la salud de los habitantes y turistas costeros. Debido a esto, es imprescindible remover el sargazo antes de que arribe y darle una disposición final adecuada. Por otro lado, se sabe que el mar contiene diversos contaminantes como los microplásticos y metales pesados, los cuales pueden llegar al sargazo y perjudicar la salud de las personas que lo remueven de las costas. Debido a su versatilidad de usos, se debe tener una precisa y correcta caracterización del sargazo que arriba a las costas para poder garantizar la seguridad en todas las etapas del manejo de este recurso.

4. JUSTIFICACION Y APLICABILIDAD

Con el fin de contribuir a la caracterización del sargazo que arriba a las costas de Quintana Roo, se analizó el contenido de microplásticos y metales pesados. Esta información será de utilidad para contar con mejores bases en la toma de decisiones para su manejo, gestión y sobre todo en los potenciales usos para su aprovechamiento en diferentes áreas como el sector energético, farmacéutico, cosmético, agrícola, inclusive para la industria de alimentos y bebidas.

5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Hay microplásticos y metales pesados en el sargazo que arriba a las costas de Puerto Morelos, Quintana Roo?

¿Varía temporalmente la cantidad de microplásticos, así como la presencia de metales pesados que contiene el sargazo que arriba a las costas de Puerto Morelos?

6. OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar la variación temporal de la presencia de microplásticos y metales pesados e identificar las características de los microplásticos del sargazo que arriba en la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo durante el año 2021.

Objetivos específicos

- Detectar la presencia de los microplásticos en el sargazo, así como determinar su abundancia, forma y color.
- Identificar la presencia de metales pesados en el sargazo recolectado.
- Analizar la variación temporal de ambos contaminantes (microplásticos y metales pesados) en función de su abundancia y presencia respectivamente.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 ÁREA DE ESTUDIO

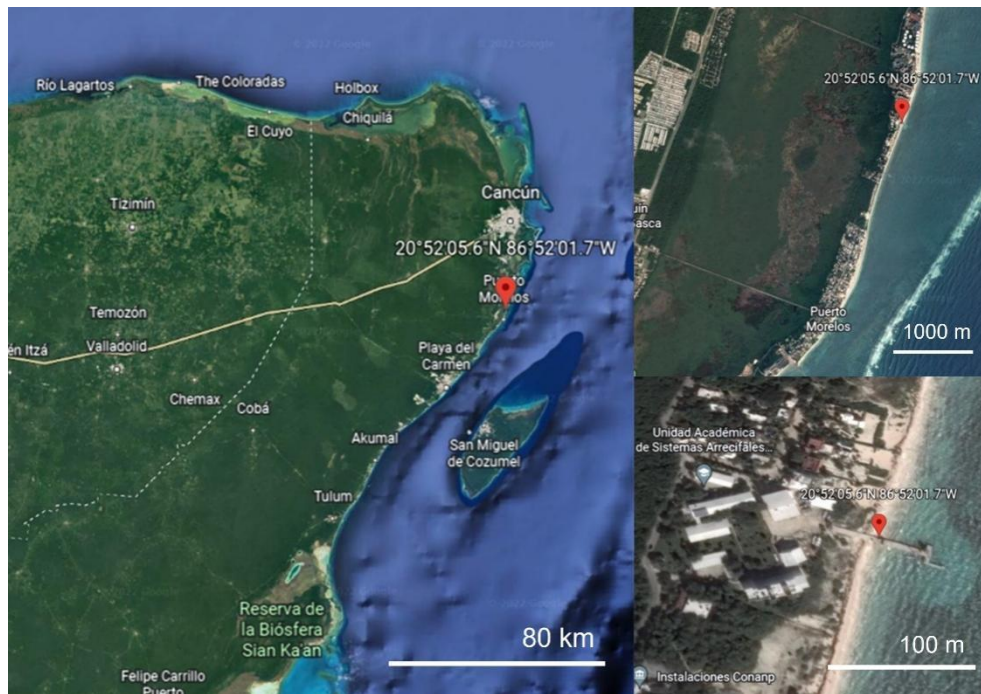


Figura 3. Mapa representativo del área de estudio. Municipio Puerto Morelos, Quintana Roo. Marcador rojo señalando la zona de recolección de muestra para las coordenadas LN 20.868210 y LW -86.867139. Imagen tomada de (Google Earth, s.f.)

El área de estudio se ubica en el municipio de Puerto Morelos, estado de Quintana Roo, México. Este municipio se encuentra entre las coordenadas aproximadas de 20° 56' y 20° 48' de latitud norte y 86° 50' y 86° 54' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,000 km². Presenta un clima cálido subhúmedo (INEGI, 2020). Colinda al sur con el municipio de Solidaridad, al norte con el de Benito Juárez, al oeste con el de Lázaro Cárdenas y al este con el mar Caribe,

es el segundo municipio menos poblado del estado después de Isla Mujeres con 26 mil 921 habitantes según los datos de INEGI 2020, (INEGI, 2020). Tiene temporada de lluvias que va desde mayo hasta octubre y su temporada de secas que comprende de octubre a mayo, siendo el mes de septiembre el más lluvioso, con un promedio de 239 mm de lluvia y marzo el que presenta menos precipitaciones, con 12 mm. Por otro lado, la temporada más ventosa abarca de octubre a mayo con velocidades de viento promedio de 9.8 km/h siendo enero el mes con mayor velocidad de vientos con un promedio de 12.7 km/h (Estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo, 2021).

7.2 COLECTA DE SARGAZO

La colecta del sargazo se realizó durante nueve meses. Mensualmente se tomaron muestras con frondas de *Sargassum fluitans III* en la playa ubicada frente a la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales en Puerto Morelos (LN 20.868210 y LW -86.867139), Quintana Roo, México (Fig. 3), para los meses de noviembre y diciembre no arribó sargazo en la zona por lo que no se tomaron muestras. Las muestras fueron depositadas en bolsas herméticas para su traslado y análisis. Las muestras colectadas de febrero, marzo y abril se congelaron y a partir de mayo fueron secadas al sol. Se obtuvo el peso húmedo de cada muestra. Este proceso fue llevado a cabo por la Mtra. Rosa Rodríguez Martínez de la unidad Académica de Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos debido a las restricciones de movilidad que provocó la pandemia Covid-19.

7.3 PROCESAMIENTO DE MUESTRA

Las muestras de Puerto Morelos se recibieron en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV) Unidad Mérida. Aquellas correspondientes a los meses de febrero, marzo y abril se recibieron en estado húmedo. Para secarlas, se colocaron en recipientes de vidrio templado, se ingresaron en un horno de secado BINDER modelo FD56 a 60° C por 48 h y posteriormente se aumentó la temperatura a 80°C por 24 h. Se recibieron 3 bolsas de sargazo (*Sargassum fluitans III*) por mes, las cuales, en conjunto, se consideraron como una muestra tamaño tres (n=3) debido a que fueron tomadas en el mismo momento y lugar. Se registró el peso seco (*dw* por sus siglas en inglés) de cada bolsa y se obtuvo una media de 22.4 ± 10.16 g *dw*. Se tomó 1 submuestra (réplica) de 5 g de cada bolsa.

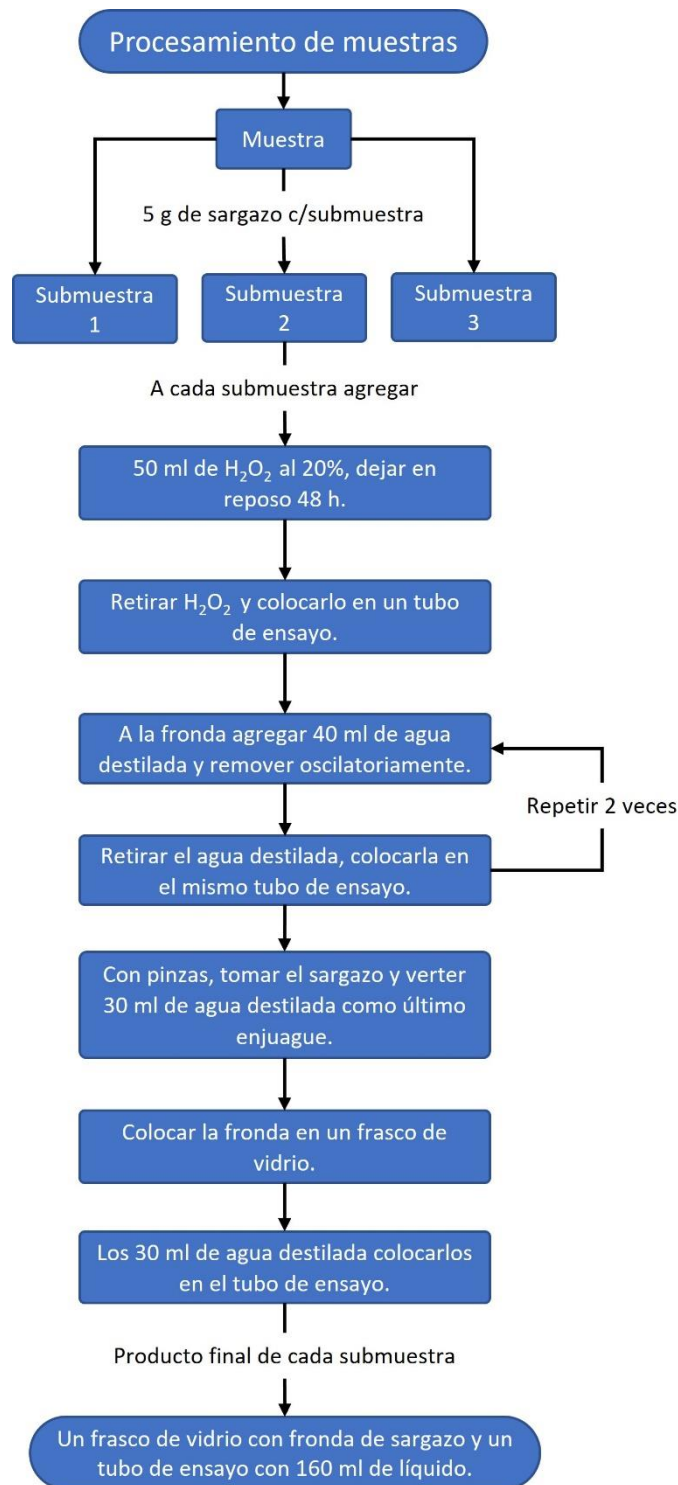


Figura 4. Esquema de procesamiento de muestra de sargazo. Incluyendo el proceso de digestión de materia orgánica y enjuague de sargazo.

Para facilitar la obtención de microplásticos, se planteó eliminar la materia orgánica y posteriormente enjuagar la fronda con agua destilada en donde se recuperarían los microplásticos. Para ello, cada submuestra se colocó en un vaso de precipitado, se agregó 50 ml de solución al 20% de peróxido de hidrogeno con agua destilada hasta cubrir la fronda. Se dejó en reposo a temperatura ambiente (22°C) durante 48 horas cubierto con papel aluminio para evitar la contaminación por microplásticos en el ambiente. Posteriormente se vació el líquido en un tubo de ensayo con tapa, se agregó 40 ml de agua destilada a la fronda, se removió oscilatoriamente y se vació al tubo, esto se realizó 2 veces. La fronda de sargazo fue retirada del vaso con pinzas metálicas, mientras se realizaba un enjuague final con 60 ml de agua destilada para obtener la totalidad de los MPs en una fase líquida. El líquido derivado del enjuague se vertió en un tubo de ensayo. Finalmente se obtuvieron 3 submuestras en donde de cada una, se obtuvieron 5 g de sargazo enjuagado (dw) y un tubo de ensayo con 50 ml de H₂O₂ + 110 ml del agua destilada (160 ml de líquido) donde se deseaban obtener los microplásticos (Fig. 4). Esta metodología fue probada y desarrollada en el laboratorio con pruebas previas reportadas en el anexo 1.

Para analizar el contenido de microplásticos en las muestras, se revisaron ambas partes, tanto la fronda como el líquido derivado el enjuague para verificar que no quedara ningún microplástico en el sargazo. Sin embargo, tras revisar la fronda que fue enjuagada, se cuantificaron un número considerable de microfibras adheridas a esta. Por lo que, se contempló el líquido y la fronda para la investigación.

7.4 CUIDADOS DE CONTAMINACIÓN DE LA MUESTRA

Para la manipulación y el procesamiento de las muestras, se tomaron medidas para evitar la contaminación cruzada por microplásticos. En el área de lavado del material de laboratorio, se utilizó únicamente una fibra natural como esponja (*Luffa*) y un jabón en barra biodegradable sin empaque. El agua para enjuagar el material se tomaba del grifo, se filtraba con 0.04 µm, se almacenaba en un matraz de 2 L y se colocaba una tapa de papel aluminio. Cada que se manipulaban las muestras se realizaba el lavado de manos. Todos los materiales que entraban en contacto con la muestra se lavaban previamente. De igual forma antes de colocar la muestra

en la caja Petri para la cuantificación, se revisaba que estuviera libre de cualquier microplástico no perteneciente a la muestra.

7.5 ANÁLISIS ESTEREOSCÓPICO

Se observaron y cuantificaron los microplásticos del sargazo por medio del estereomicroscopio Leica EZ4, se utilizaron los oculares 8x, 12.5x y 35x. Para esto, se utilizó una caja Petri la cual se lavó y revisó para asegurar que no contuviera microplásticos externos a la muestra. Con unas pinzas previamente lavadas, se tomaron pequeños fragmentos de fronda de sargazo para poder visualizar y contabilizar los microplásticos que este contenía. Cada vez que se visualizaba un MP, se registraba en un contador de células mecánico etiquetado por color de MP y se registraba la forma de los MPs en una libreta, de inmediato el MP se tomaba con herramientas con punta delgada, se depositaba en un frasco de vidrio tipo vial con agua destilada para no volver a contabilizar el mismo MP en la muestra. Esto se realizó múltiples veces hasta analizar la totalidad de cada submuestra. De la misma manera, del líquido derivado del enjuague se tomaron de 5 a 8 ml con una pipeta de vidrio graduada de 10 ml para contabilizar y observar los MPs fácilmente en la caja Petri a través del estereoscopio hasta analizar la totalidad del líquido (160 ml). Se registró la cantidad total, color y forma de los microplásticos para cada submuestra. Los microplásticos fueron identificados por el color que los componían, su forma y, en otros casos, por su nivel de fragilidad, ya que estos suelen presentar mayor resistencia que la materia orgánica tratada con peróxido de hidrógeno. Se identificaron como microplásticos aquellos de menos de 5 mm de diámetro.

7.6 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Se realizó un análisis con microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM), con espectrómetro de rayos X característicos (EDS, por sus siglas en inglés) marca JEOL modelo JSM-7601F. Se observó la morfo estructura de las microfibras, se analizó el nivel de desgaste y se identificaron los elementos que los componen. Para ello, a través del estereoscopio, se seleccionaron microfibras de distintos colores y longitudes para tener una muestra representativa, se colocaron en un plomo de 12 mm de diámetro con una cinta de carbono de doble cara. Posteriormente, se colocó el plomo en una caja Petri dentro de un desecador para

evitar que se humedezca la muestra hasta la fecha de análisis. Se hizo un recubrimiento de la muestra con 80% oro y 20% paladio con 50 segundos de metalización. Para la observación de las muestras se trabajó con una energía de 15 kV. Se visualizaron las muestras con imagen de electrones secundarios (SEI, por sus siglas en inglés) la cual provee de una imagen topográfica y posteriormente se trabajó con el modo electrón de retrodispersión de ángulo bajo (LAGE, por sus siglas en inglés) el cual provee imágenes de alta resolución de estructuras superficiales de las muestras. Para obtener firmas de composición elemental se utilizó el espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) con el software de identificación INCA Suite versión 4.15 de *Oxford Instruments*. Esta información se utilizó para detectar posibles microplásticos e identificar los elementos presentes en el sargazo.

7.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se probó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro Wilks modificado. Debido a que los datos no presentaron normalidad y a que se trabajó con un tamaño de muestra reducido ($n=3$), se realizó una prueba no paramétrica de intervalos de confianza Bootstrap con un remuestreo de 1,000 repeticiones en el cual se obtuvo la media y el intervalo de confianza (95% de confianza) para cada mes, esto realizado a través del software Infostat. La comparación estadística de los intervalos de confianza se basó en el método de (Satterthwaite, 1946; Welch, 1938) consultado en un artículo realizado por Cumming y Finch (Cumming y Finch, 2005).

8. RESULTADOS

8.1 ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS

Se puede apreciar en la figura 5, que el líquido de enjuague de la muestra denotó una mayor cantidad de microplásticos en marzo y abril con un límite superior (LS) de 9.6 y 13.3 MP.g⁻¹ dw, respectivamente. La abundancia disminuyó en los meses de mayo y junio, a continuación, se presentó un segundo aumento en el mes de julio LS 6.2 MP.g⁻¹ dw y disminuyó a partir de agosto, teniendo la mínima abundancia en enero 2022 con LS 1.5 MP.g⁻¹ dw.

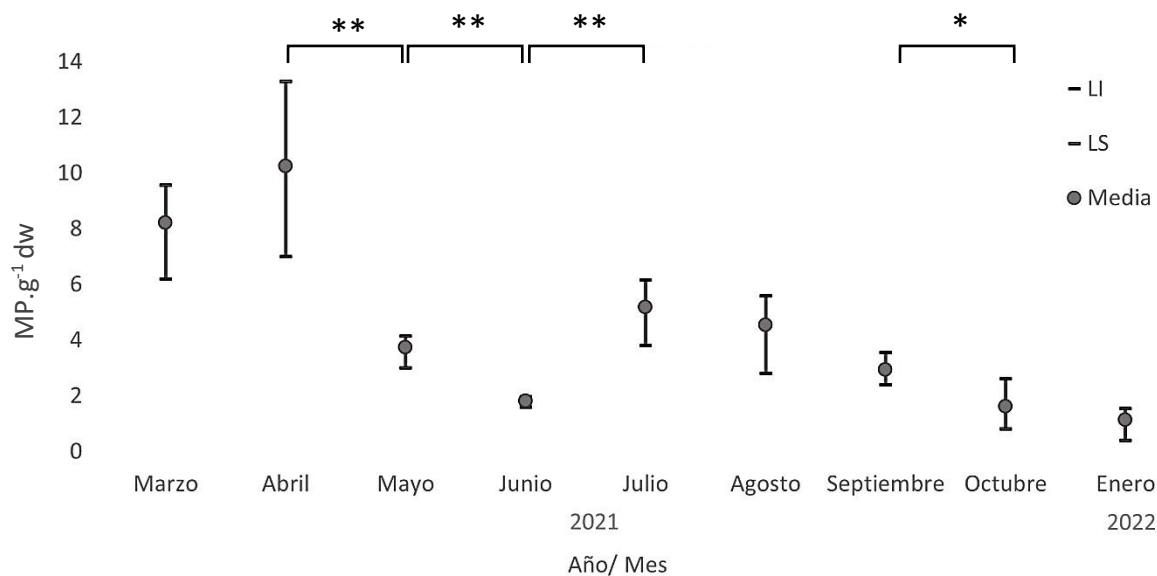


Figura 5. Abundancia de microplásticos en líquido derivado del enjuague de la muestra. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

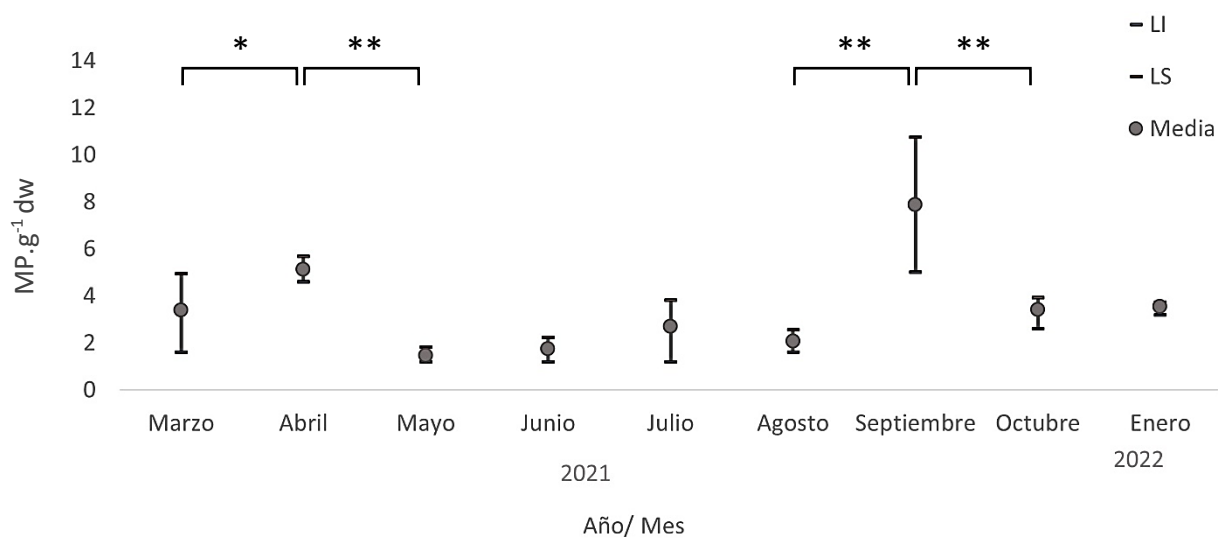


Figura 6. Abundancia de microplásticos en fronda de sargazo. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

Como se observa en la figura 6, en la fronda se encontró menor cantidad de microplásticos a comparación del líquido de enjuague de la muestra. El comportamiento de la abundancia se presenta oscilatorio ya que se tiene un pico de abundancia media en abril con LS 5.7 MP.g⁻¹ dw, esta disminuyó en mayo presentando la menor abundancia con LS 1.8 MP.g⁻¹ dw, y volvió a incrementarse a partir del mes de junio, presentando el pico más alto de abundancia en septiembre con LS 10.8 MP.g⁻¹ dw.

Tomando en cuenta la muestra completa (líquido y fronda) se obtuvo la mayor abundancia de microplásticos en los meses abril y septiembre con un límite superior de 17.9 MP.g⁻¹ dw y 13.6 MP.g⁻¹ dw, respectivamente. La menor abundancia se presentó en junio 2021 y enero 2022, con LS 4 MP.g⁻¹ dw y 5.1 MP.g⁻¹ dw respectivamente (Fig. 7).

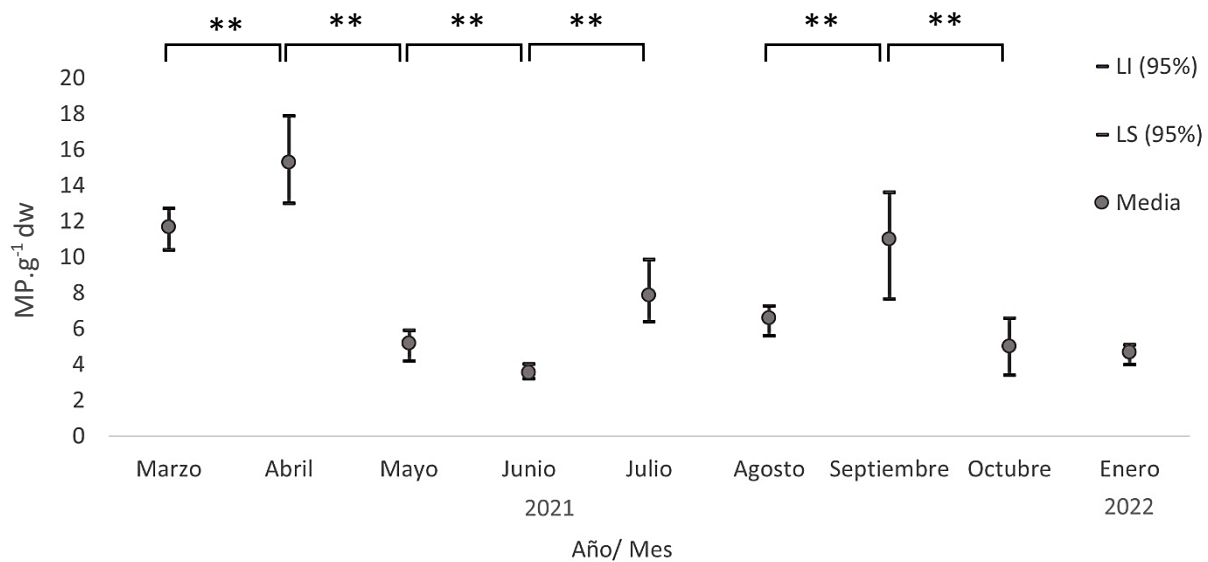


Figura 7. Abundancia de microplásticos en muestra completa de sargazo. Remuestreo Bootstrap rep: 1000, intervalos con 95% confianza (n=3). * p< 0.05, ** p<0.01.

Por otro lado, la proporción de cantidad de microplásticos encontrados en el líquido y en fronda fue registrada para cada mes (Fig. 8). En los meses de febrero a agosto del año 2021, se observa una mayor cantidad de MPs en el líquido, sin embargo, en los meses de septiembre y octubre de 2021 y enero 2022 predominó la cantidad de MPs encontrados en la fronda. En el mes de febrero

del 2021 se obtuvo la mayor proporción de microplásticos encontrados en el líquido con 86% y en enero del 2022 la menor proporción con 24%. Esto denota la importancia de revisar la totalidad de la muestra ya que para todas las muestras se encontró una proporción considerable de microplásticos adheridos a la fronda aun después del enjuague. Por lo que, los análisis de esta investigación se realizaron considerando la totalidad de la muestra.

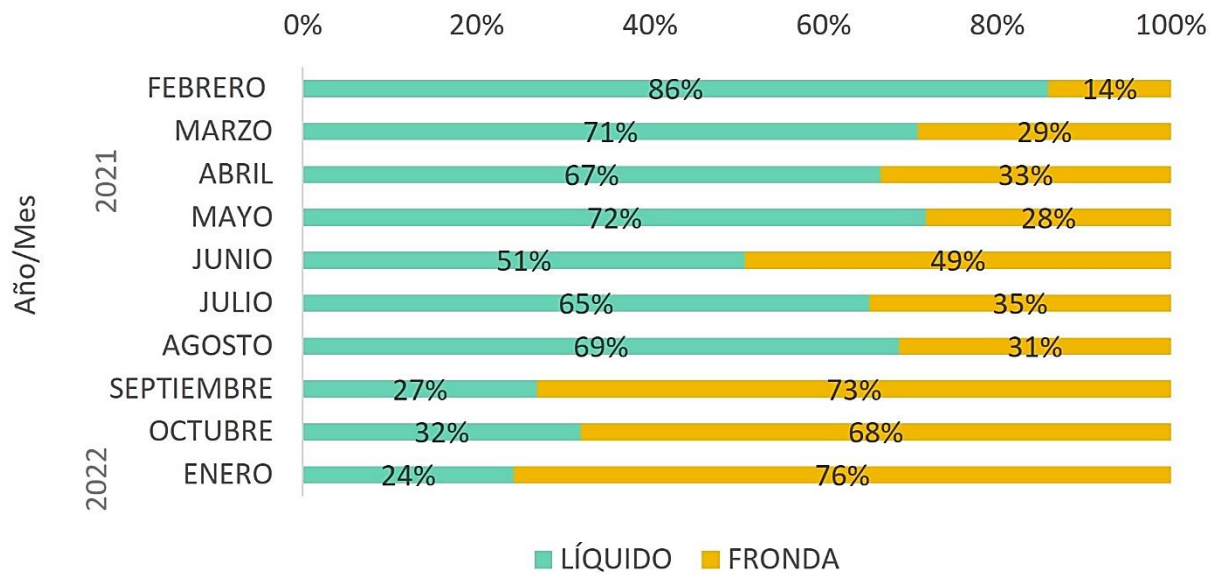


Figura 8. Proporción de abundancia de microplásticos encontrados en líquido y fronda de la muestra.

8.2 FORMAS DE MICROPLÁSTICOS

Las formas en las que se puede encontrar un microplástico son: fibra, fragmento, película, esfera y pellet. En este estudio, únicamente se encontraron microplásticos en forma de fibra y de fragmento. Se registraron sus cantidades y proporciones por mes muestreado (Fig. 9). Hubo una notable predominancia de los microplásticos con forma de fibra en todos los meses a excepción de octubre, en el cual se encontró mayor abundancia de microplásticos en forma de fragmento. Las microfibras alcanzaron la mayor proporción en septiembre con 99% y la menor en octubre con 48%. Sin embargo, en 8 de los 10 meses analizados, la proporción de microplásticos en forma de fibra fue mayor a 90%.

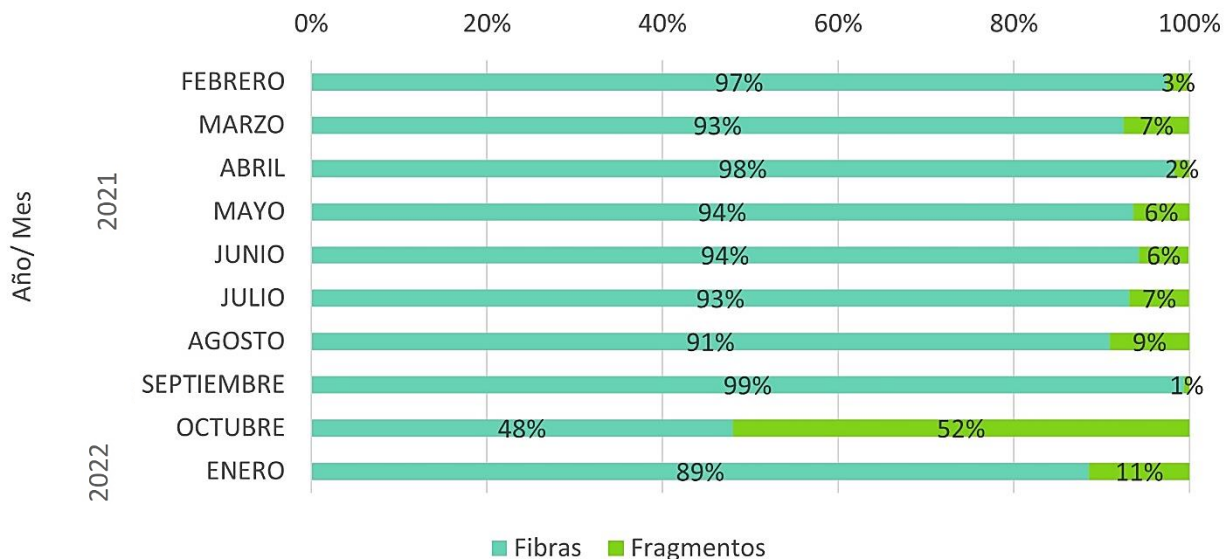


Figura 9. Proporción de formas de los microplásticos en la muestra completa (líquido y fronda) de cada mes muestreado (n=3).

De igual forma se registraron las proporciones de formas de MPs encontrados en el líquido y fronda de la muestra. En el líquido (Fig. 10) hubo predominancia de la forma de fibra, en 9 de los 10 meses se encontró una proporción mayor o igual a 88%. En septiembre se presentó (100%) de fibras. Sin embargo, en octubre predominó la proporción de microplásticos en forma de fragmentos (67%).

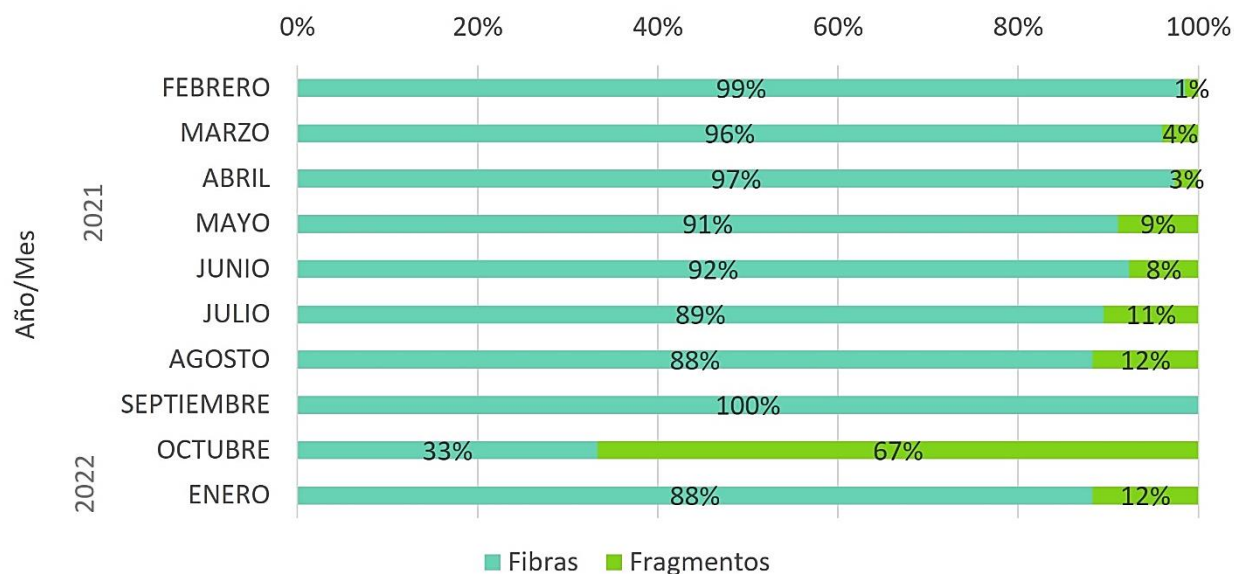


Figura 10. Proporción de formas de los microplásticos en cada mes en líquido derivado del enjuague.

En cuanto a la proporción de formas en la fronda, se observó predominancia de microfibras en todos los meses, la mayoría con una proporción mayor o igual a 84% con presencia máxima en abril, mayo y julio con 100%. No obstante, en octubre disminuyó la proporción de microplásticos en forma de fibra a 55% (Fig. 11).

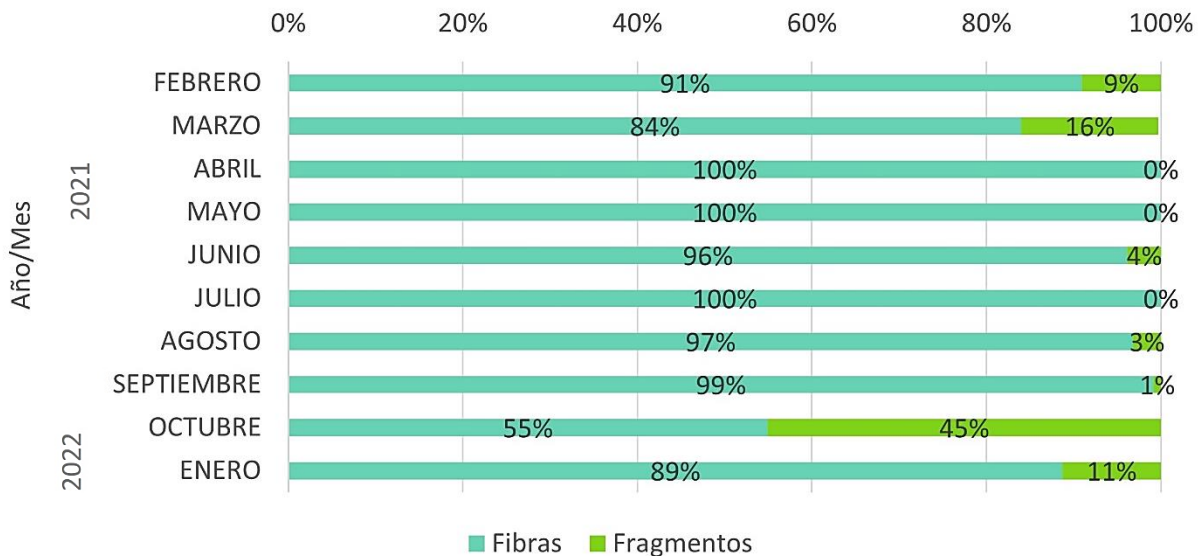


Figura 11. Proporción de formas de los microplásticos en cada mes en la fronda de sargazo.

8.3 PROPORCIÓN DE COLORES DE MICROPLÁSTICOS

Otra característica de los microplásticos que se registró fue el color. Los colores que se encontraron fueron: transparente, azul, negro, rojo, blanco, violeta, gris, verde, café, rosa, naranja, dorado, plateado y amarillo. También se observaron fibras con más de un color a las cuales se les denominó “multicolor”. La mayoría de estas fibras estaban compuestas por azul y transparente, sin embargo, se encontraron otras con combinación de colores: rosa-transparente-morado, rojo-transparente-negro, entre otras. Se observó una clara predominancia de los colores transparente, azul, negro y rojo por lo que se redujo la escala de colores colocando los microplásticos color gris como “negros”, los rosas se incluyeron en los rojos y los demás colores se clasificaron como “otros” (Fig. 12). El transparente, negro y azul estuvieron presentes en todos los meses. De febrero a mayo predominó el transparente con una proporción máxima

en febrero con 57%, a partir de junio disminuyó su predominancia teniendo una presencia mínima de 13%. La presencia del color negro fue alta, teniendo una proporción máxima en octubre (45%) y una mínima en febrero (11%). El color azul se encontró en abundancia con una proporción máxima de 36% en los meses de abril 2021 y enero 2022 y una mínima de 16% en el mes de junio. El color rojo estuvo presente en todos los meses excepto en febrero, tuvo una proporción mínima de 3% en mayo y una máxima de 10% en los meses de julio y septiembre. Las fibras multicolor estuvieron presentes en todos los meses excepto en julio, teniendo su máxima proporción en febrero con 9%.

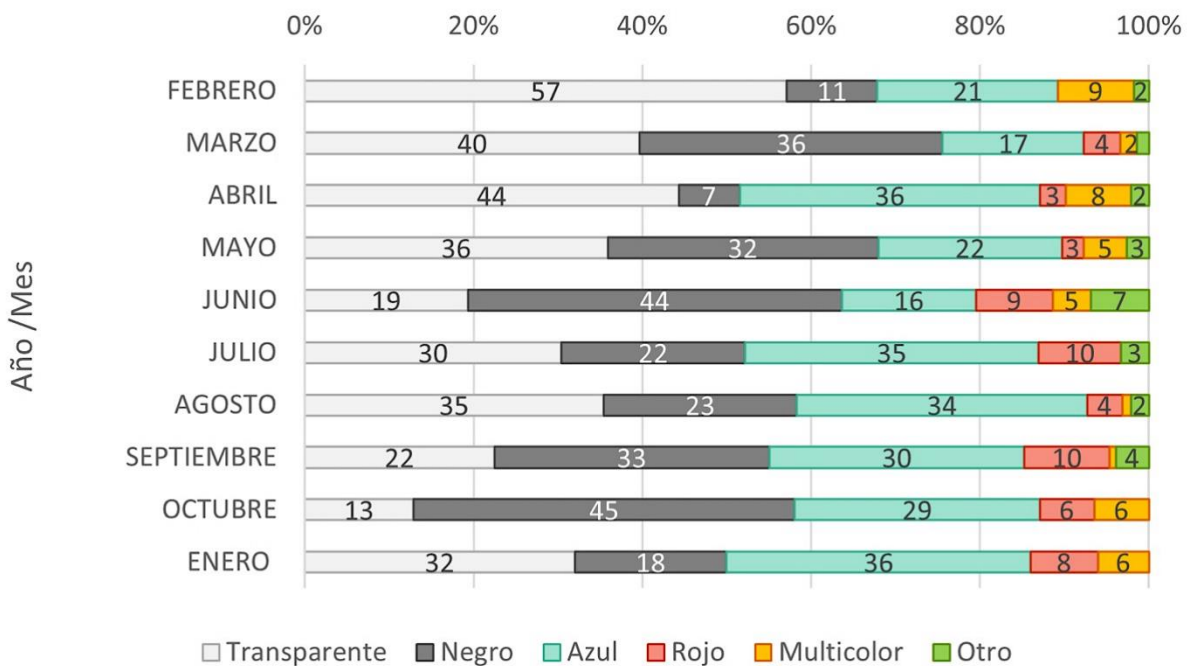
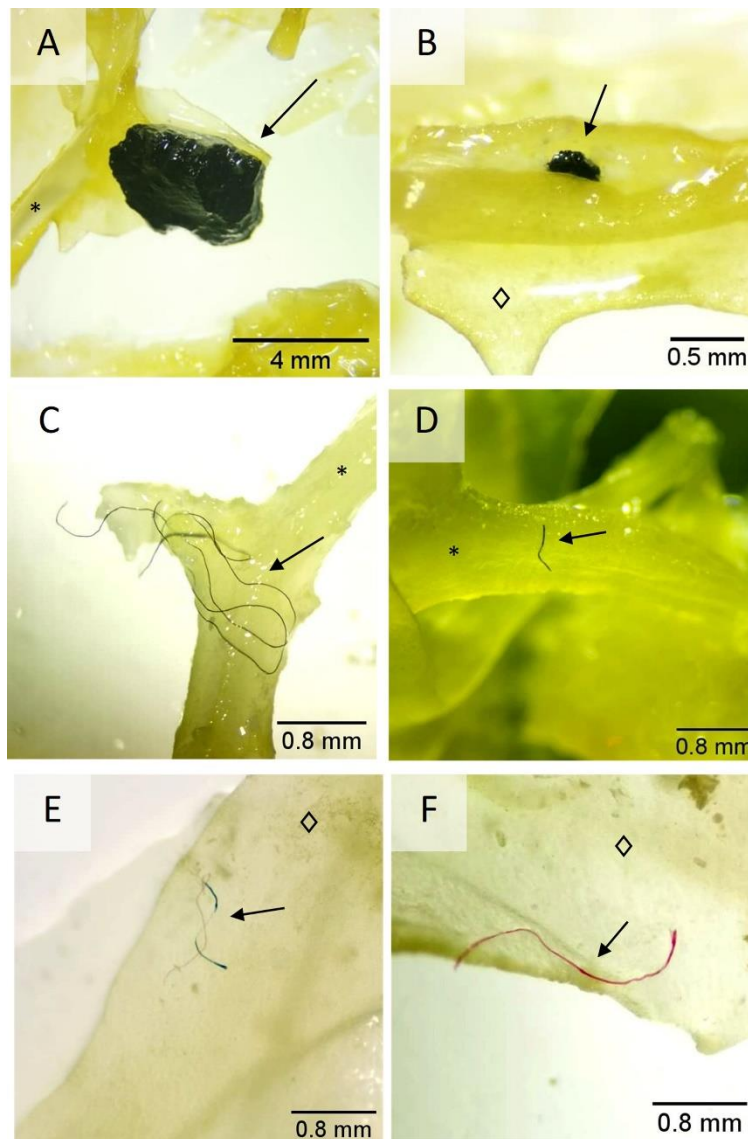


Figura 12. Proporción de colores en porcentaje de microplásticos encontrados en sargazo para cada mes muestreado.

8.4 MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN ESTEREOSCOPIO



*Figura 13. Microplásticos en sargazo observados a través del estereoscopio todas captadas con aumento 35x excepto imagen A que se observó a 8x. A y B micro fragmentos color negro. C y D microfibras representando diversidad de longitud. E microfibra multicolor azul – transparente. F microfibra color rojo. * Estipe, ◊ Lámina.*

A través del estereoscopio se observó la presencia de microplásticos y se registró su forma y color. En la figura 13 A y B se observan micro fragmentos color negro sobre el sargazo. Estos micro fragmentos presentaron en algunas ocasiones fragmentación debido a la manipulación lo

que denota su fragilidad debido al desgaste. De igual forma, se encontraron una gran variedad de tamaños de fibras. En la imagen 13 C, se encuentran largas microfibras color negro sobre el estipe del sargazo. Por otro lado, se encontraron microplásticos más pequeños, <1 mm como se muestra en la imagen 13 D. En 13 E se puede apreciar un microplástico enrollado multicolor (azul-transparente) sobre una lámina de sargazo. En la última imagen 13 F se encuentra una microfibra color rojo la cual, al presentar fibras más pequeñas en el extremo derecho, denota un alto estado de desgaste.

8.5 MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN MEB

En la figura 14, se observan imágenes tomadas a través del microscopio electrónico de barrido MEB. En esta figura se aprecian distintos tipos de desgaste de los microplásticos. En la imagen 14 A se muestra un extremo de la fibra con oquedades que denotan un desgaste en la zona. Por otro lado, en la figura 14 B se tiene otro extremo en donde presenta deformidad, distintas figuras se extienden a partir de la punta: fibras secundarias, una protuberancia y abultamientos en la zona. En la 14 C, se presenta una zona media de una microfibra en donde hay un alto nivel de desgaste debido a que se tiene una ruptura transversal parcial de esta. La figura 14 D muestra oquedades longitudinales de la fibra que denotan un nivel de desgaste considerable. El recuadro 14 E, presenta una zona media de una fibra donde se muestran desprendimientos laminares a lo largo. En la imagen 14 F, se aprecia un desgaste superficial con un desprendimiento laminar longitudinal.

En la figura 15 en la columna izquierda (A, C y E) se observan las microfibras completas. La microfibra A tiene de largo 1200 μm . En el recuadro B, se encuentra un objeto adherido a esta microfibra, el cual puede una bacteria esférica cocoide típica con diámetro aproximado de 2 μm . En el recuadro 15 C se encuentra otra microfibra con una longitud de 963 μm , en esta se encontraron otros objetos deformados con forma esférica representados en la imagen 15 D. Estos también pueden ser bacterias cocoides con diámetro aproximado de 2 μm . Finalmente, la tercera microfibra presenta una longitud de 340 μm en donde se encontraron dos objetos adheridos con una morfología de bastón asemejando bacterias bacilares (Fig. 15 F). Sin embargo, se tienen que realizar estudios específicos para confirmar la presencia de estos microorganismos.

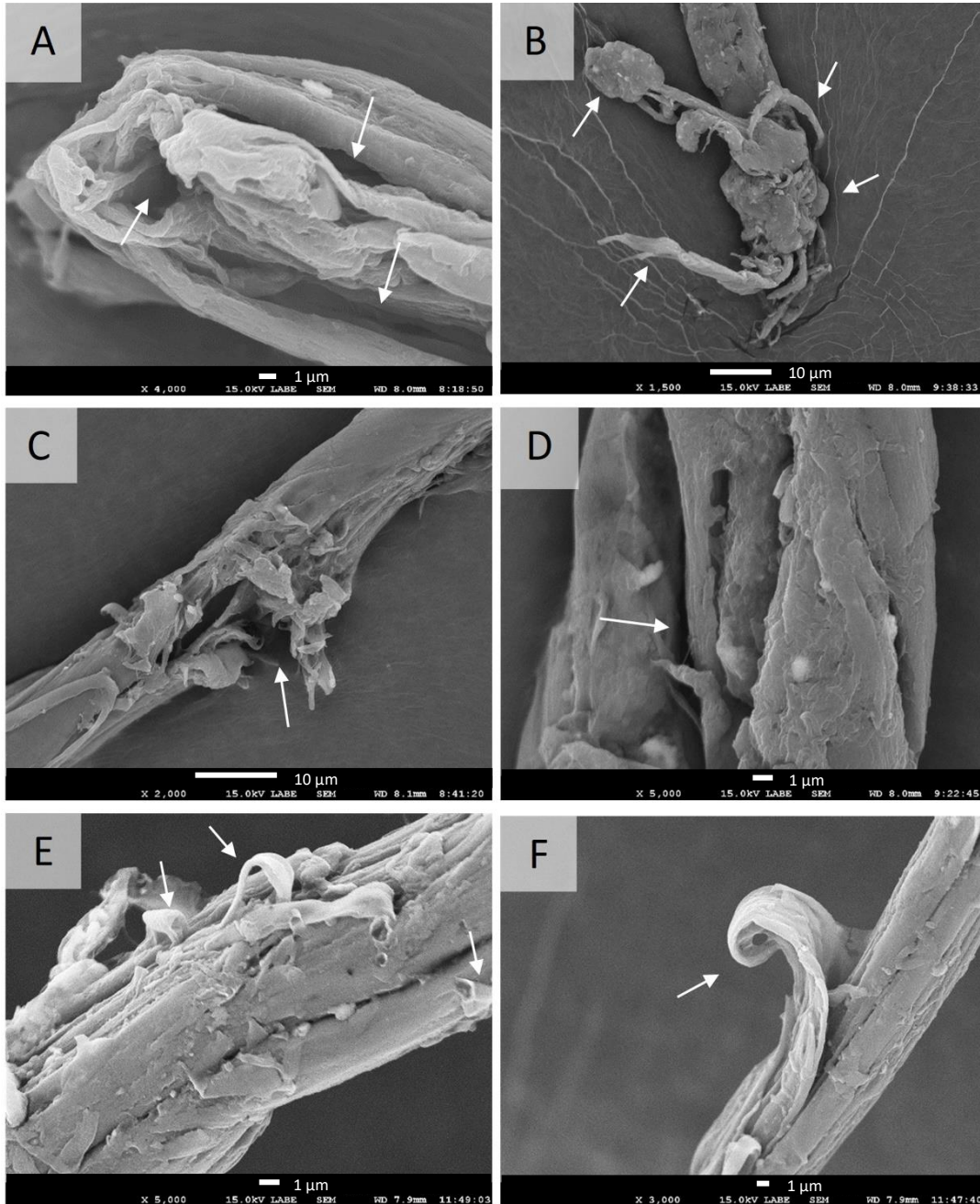


Figura 14. Imágenes de la morfo estructura de microfibras capturadas a través de microscopio electrónico de barrido. Se observan distintas formas de desgaste. A y B) microfibra roja de marzo 2021. C y D) microfibra negra de marzo 2021. E y F) microfibra multicolor transparente-morado-rosa de febrero 2021. En la imagen A se observan oquedades que denotan desgaste, en la B se tienen deformidades y protuberancias, En la imagen C se aprecia una rotura transversal denotando un daño en la zona. En el recuadro D se presenta agrietamiento e indicios de partición debido al daño, en el E se muestran desprendimientos laminares a lo largo, en la imagen F se aprecia un desgaste superficial con un desprendimiento laminar longitudinal. Imágenes capturadas a 15 kV LABE.

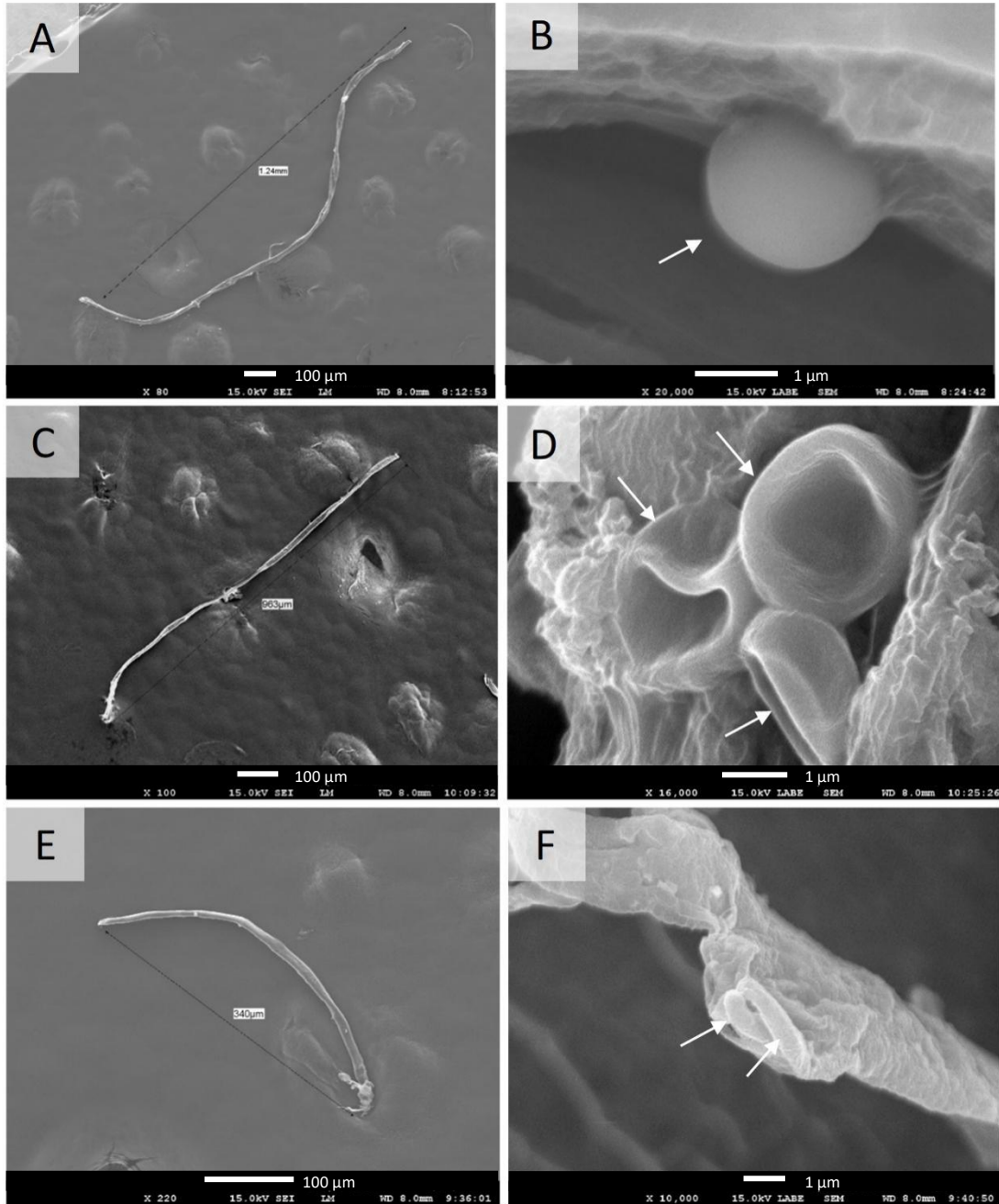


Figura 15. Imágenes de la morfo estructura y dimensión de microfibras de marzo 2021 capturadas a través de microscopio electrónico de barrido. A, C y E) microfibras completas con longitud de 1200 μm , 963 μm y 340 μm respectivamente. A y B) microfibra negra. C y D) microfibra azul. E y F) microfibra roja. En las microfotografías B y D se observa la morfo estructura de microfibras plásticas con severo desgaste en la cual fue posible observar la presencia de estructuras de otros microorganismos colonizando las microfibras, microfotografías de Dra. Aldana Aranda el 22 febrero 2022. En la microfotografía F se observa imagen de objeto similar a bacterias. Imágenes capturadas a 15 kV LABE.

8.6 ANÁLISIS ELEMENTAL EDS EN MICROPLÁSTICOS

Se analizó el contenido de elementos de las microfibras por medio de SEM- EDS. Como se observa en la tabla 1, todas las fibras analizadas tuvieron un contenido considerable de carbón, oxígeno y, en menor cantidad, silicio con un rango de 67 – 83, 11 – 29 y 0.1 – 1.7 respectivamente representado en porcentaje de peso (dw%). También se observó presencia de Mg, Al, Ca, Cl, S, Ti, Fe y trazas de Cu, Pb, Zn y As.

Por otra parte, se obtuvieron análisis elementales en zonas lisas y rugosas de microfibras de distintos colores. En la figura 16 se tiene el análisis de una microfibra color negro, de la cual se obtuvo información de un extremo de la fibra (A y B) y de una parte central dañada (C y D), en ambos casos se analizó una zona lisa (A, C) y una zona rugosa (B, D). En las zonas lisas se encontró C, O, Si, Ca y Pb, y en las zonas rugosas en donde se notó un mayor desgaste, hubo además Mg, Al, y S.

En la figura 17, se analizó la microfibra color rojo. Para esta fibra, se observó un punto liso (A) y 3 rugosos (B, C y D). Para la zona lisa se detectó C, O, Si, S y Cl y en las zonas rugosas se detectó también Mg, Ca, Al, Ti, Fe, Cu, Zn y As.

Asimismo, se analizó una microfibra color azul (Fig. 18) en la cual se analizaron dos partes lisas (A y C) y dos partes rugosas (B y D). En la punta de la fibra (A y B), de la zona lisa (A), se detectó C, O, Mg, Al, Si y Ca. En una zona más rugosa se detectó C, O, Al, Si y Cl. Por otro lado, en una parte de la microfibra donde presentaba alto nivel de desgaste (C y D), en una zona lisa (C) se detectó C, O, Si, Cu y As, y en una zona rugosa (D) también se detectó Al, Ca, Pb y niveles más altos de Cu.

Tabla 1. Análisis de elementos por espectroscopia de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) de microfibras en sargazo de Puerto Morelos. Datos presentados en porcentaje de peso seco.

# Fibra	Color	Punto de análisis	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Ti	Fe	Cu	Pb	Zn	As
1	Negro	1	76.7	21.3	0.09	ND	1.2	0.03	ND	0.7	ND	ND	ND	0.02	ND	ND
1	Negro	2	75.11	24.4	ND	ND	0.28	ND	ND	0.19	ND	ND	ND	0.02	ND	ND
1	Negro	3	72.57	27.06	ND	ND	0.15	0.05	ND	0.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	Negro	4	75.25	23.83	0.07	ND	0.42	0.14	ND	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	Negro	5	74.91	24.15	ND	ND	0.56	ND	ND	0.37	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1	Negro	6	72.66	25.94	0.07	0.06	0.96	ND	ND	0.3	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	Rojo	1	75.37	23.93	ND	ND	0.42	0.06	0.21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	Rojo	2	79.86	19.18	ND	ND	0.49	0.12	0.2	ND	ND	ND	0.06	ND	0.08	0.01
2	Rojo	3	67.15	28.65	0.09	0.11	1.67	0.21	0.2	1.82	0.08	ND	ND	ND	ND	ND
2	Rojo	4	78.97	11.27	0.13	0.16	1.06	0.19	0.22	1.3	0.13	6.52	0.04	ND	ND	ND
3	Azul	1	74.95	24.77	ND	0.04	0.21	ND	0.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	Azul	2	73.55	24.61	0.14	0.19	1.33	ND	ND	0.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3	Azul	3	73.58	26.11	ND	ND	0.28	ND	ND	ND	ND	ND	0.02	ND	ND	0.01
3	Azul	4	83.46	15.27	ND	0.11	0.88	ND	ND	0.19	ND	ND	0.06	0.03	ND	ND
3	Azul	5	76.14	23.67	ND	ND	0.19	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

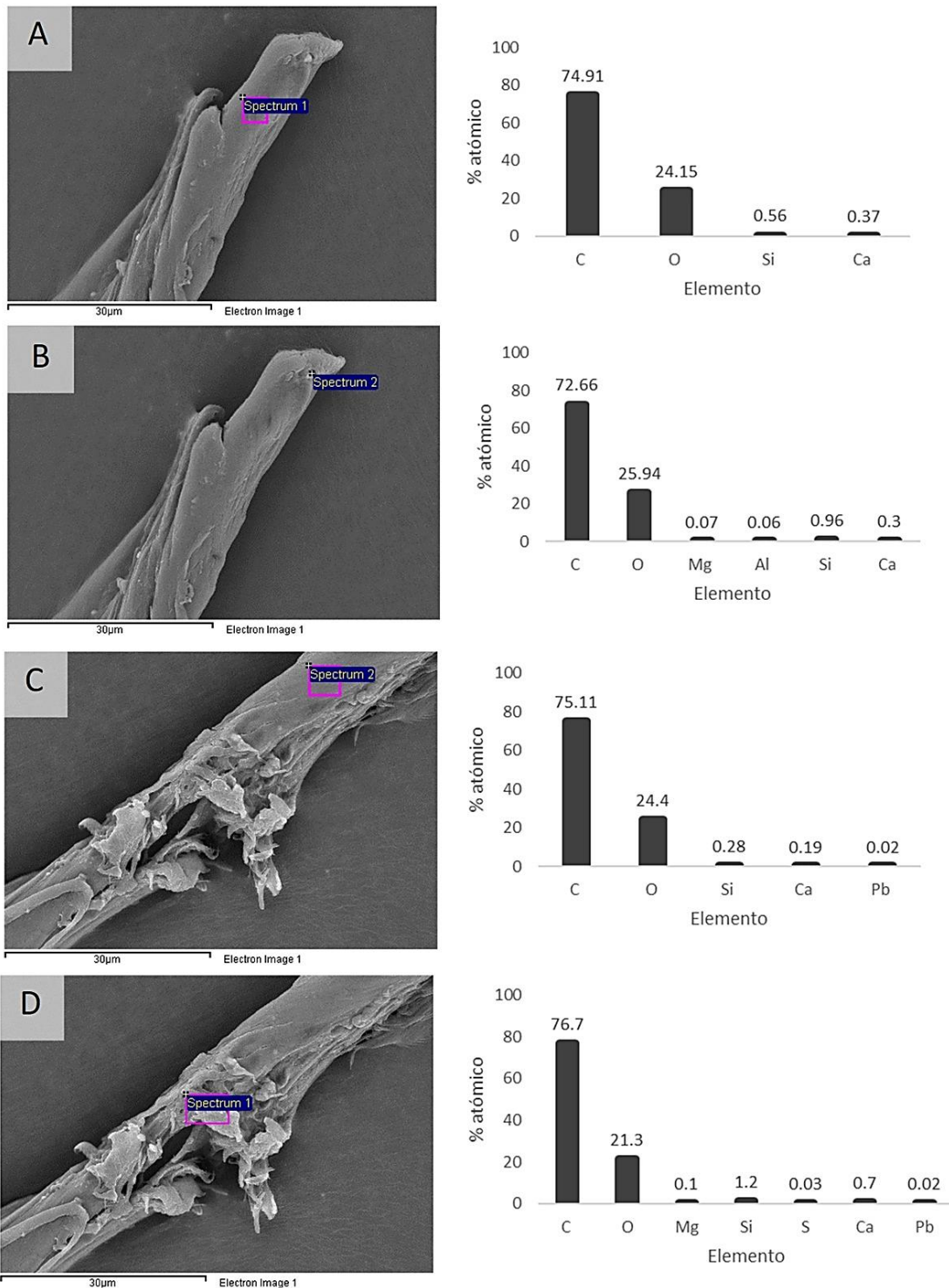


Figura 16. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra negra de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.

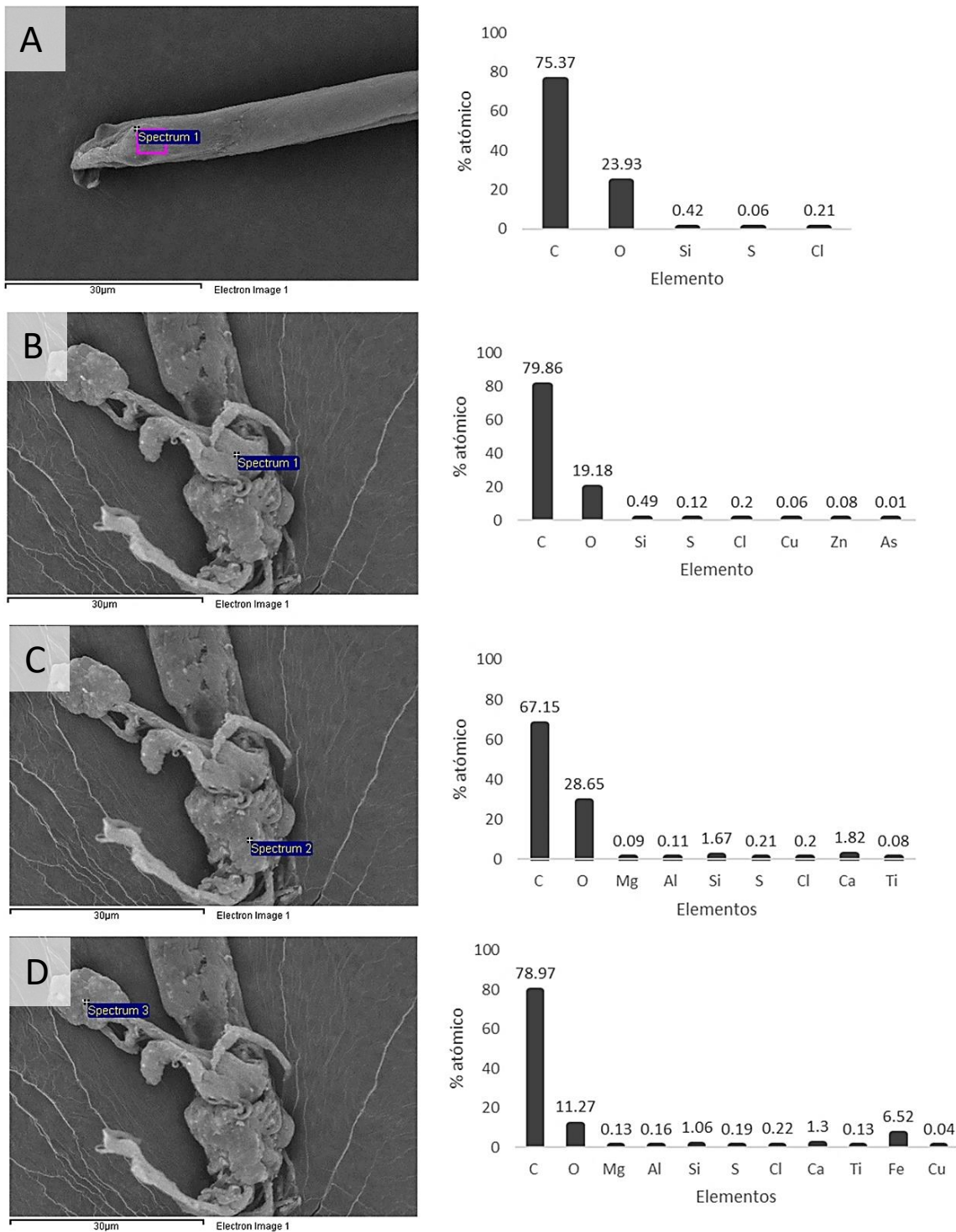


Figura 17. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra roja de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.

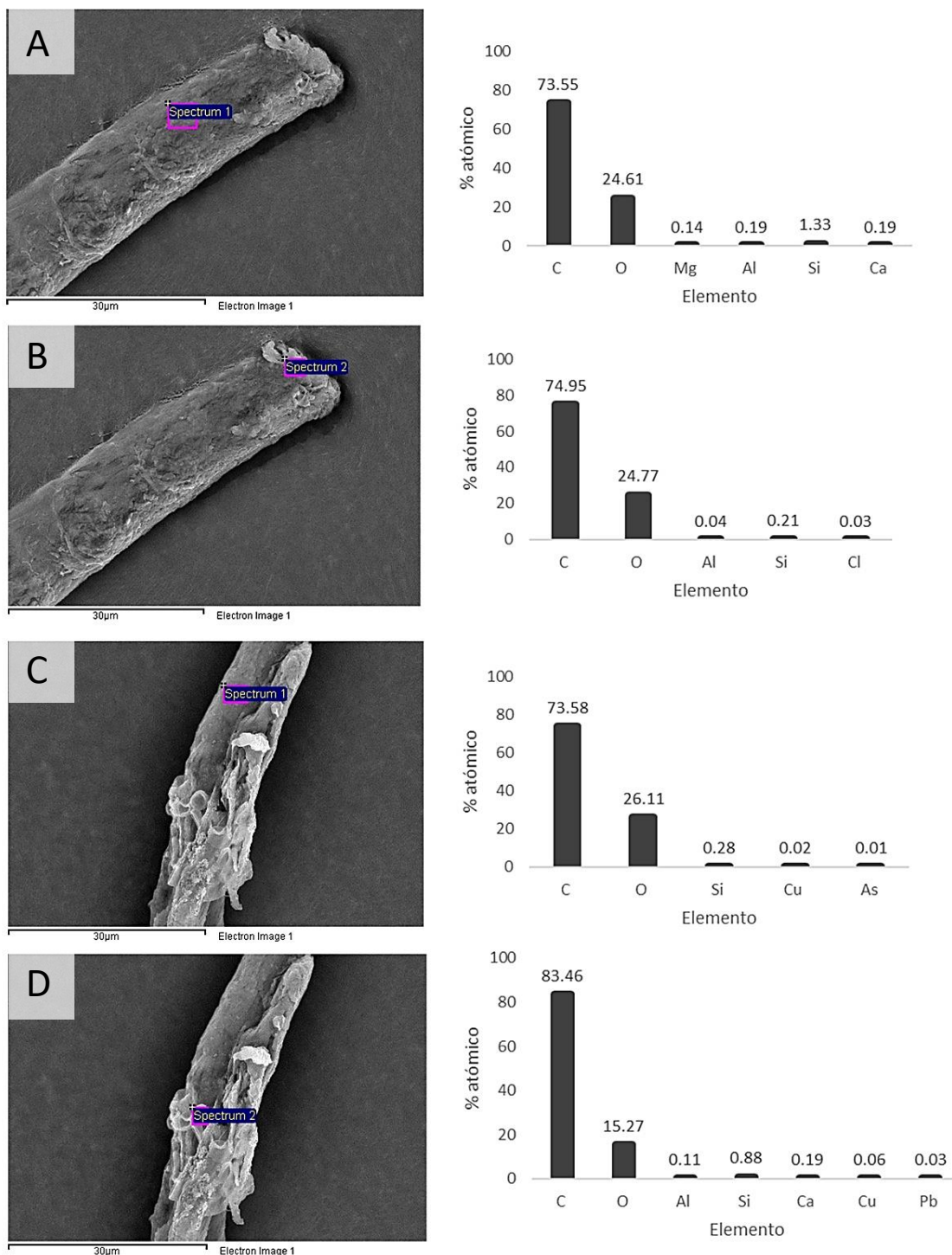


Figura 18. En columna izquierda se tienen imágenes tomadas con el MEB de microfibra azul de marzo 2021 y en columna derecha su análisis elemental EDS en porcentaje atómico.

8.3 ANÁLISIS ELEMENTAL EDS EN SARGAZO

Las láminas de sargazo examinadas por SEM-EDS, presentaron para todos los meses porcentajes considerables de C, O, Cl, K y en menor cantidad Mg. Por otro lado, el sargazo presentó altos niveles de Cl y K, también niveles detectables de S, Ni, Cu, As, Hg y Pb.

Para poder visualizar los cambios de presencia de elementos a lo largo del tiempo se realizó un mapa de calor en donde se observa con tonos rojos los porcentajes más altos del año y en verde los más bajos. Los niveles más altos de Mg se presentan en los meses de febrero, abril y octubre. Para el azufre (S) el nivel más alto (4.59%) se observó en febrero. A partir del mes de julio, los niveles de cloro y potasio se presentaron altos a comparación de los primeros meses. El Ni tuvo niveles detectables en febrero y marzo, sin embargo, en mayo presentó su porcentaje más alto 0.89%. El Cu estuvo presente en febrero, mayo y septiembre teniendo su mayor presencia en junio con 0.96%. También se detectó As y Hg en julio con niveles de 1.3 y 7.88 % respectivamente. El plomo únicamente fue detectado en marzo con 1.32%.

Se realizó un análisis de los elementos detectados en lámina de sargazo y en partículas de polvo derivado de la trituración de la macroalga. En la imagen 19 se observan tres análisis puntuales realizados en una zona. En todos los puntos se encuentran presentes Cl, C, K y Na. En el primer punto analizado (Fig.19 C), distinguen los elementos presentes Cr, Fe y Cu. En el segundo punto de análisis se detectaron los elementos Cu, Cd y Pb, así como mayor presencia de Cl. En el tercer punto (Fig.19 E) se observaron picos altos de Pb y S y presencia de As, Sr, Rb, Mg y Th.

En la figura 20 se tienen tres análisis elementales realizados en una partícula de polvo de sargazo. En los tres análisis se detectó Cl, C, K, Ca, O, Ni, Na y S. En el primer punto analizado presenta picos altos de Cl y K y ausencia de Mg a comparación de los otros puntos. El segundo punto de análisis presentó mayor presencia de Na y menor de K (Fig. 20 D). El tercero presenta un pico elevado de S y K, y menor presencia de Na y Cl.

Tabla 2. Análisis de elementos EDS de láminas de sargazo del año 2021 y enero 2022 de Puerto Morelos. Datos presentados en media de porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3).

Elemento químico	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Enero
C	21.53 \pm 6.19	19.6 \pm 0.95	28.31 \pm 16.92	8.77 \pm 3.66	29 \pm 1.2	6.8 \pm 8.95	25.3 \pm 13.68	14.95 \pm 11.58	12.39 \pm 13.97	2.91 \pm 4.39
O	21.69 \pm 5.61	6.29 \pm 0.48	12.41 \pm 3.32	10.38 \pm 2.88	16.25 \pm 7.68	4.95 \pm 3.84	12.72 \pm 9.44	7.99 \pm 6.08	13.27 \pm 9.63	6.02 \pm 2.3
Mg	0.41 \pm 0.19	0.28 \pm 0.09	0.52 \pm 0.06	0.17 \pm 0.19	0.29 \pm 0.26	0.06 \pm 0.11	0.18 \pm 0.17	0.39 \pm 0.09	0.44 \pm 0.2	0.24 \pm 0.07
S	2.78 \pm 1.57	0.36 \pm 0.46	0.78 \pm 0.06	1.34 \pm 0.73	1.7 \pm 0.23	0.78 \pm 0.53	1.26 \pm 1.09	0.7 \pm 0.83	1.09 \pm 0.31	1.1 \pm 0.26
Cl	20.99 \pm 6.5	36.55 \pm 1.96	24.74 \pm 8.59	35.25 \pm 1.99	24.92 \pm 10	41.72 \pm 4.31	27.27 \pm 11.49	23.61 \pm 20.05	31.11 \pm 11.98	40.9 \pm 0.92
K	17.73 \pm 3.08	21.73 \pm 7.85	13.84 \pm 6.41	28.81 \pm 4.4	9.94 \pm 4.34	32.19 \pm 5.22	16.98 \pm 19.77	17.22 \pm 13.76	30.07 \pm 12.27	34.82 \pm 2.28
Ca	1.48 \pm 0.81	0.65 \pm 0.25	1.31 \pm 0.3	0.19 \pm 0.19	0.7 \pm 0.28	0.28 \pm 0.29	0.54 \pm 0.32	0.84 \pm 0.4	1 \pm 0.67	0.42 \pm 0.18
Ni	0.17 \pm 0.19	0.2 \pm 0.18	ND	0.39 \pm 0.46	0.06 \pm 0.11	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.18 \pm 0.31	ND	ND	0.17 \pm 0.29	0.32 \pm 0.55	ND	0.07 \pm 0.12	0.11 \pm 0.18	ND	ND
As	ND	0.06 \pm 0.1	ND	0.06 \pm 0.1	ND	0.43 \pm 0.75	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	0.23 \pm 0.39	ND	ND	ND	2.63 \pm 4.55	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	0.78 \pm 0.69	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

Tabla 3. Análisis de elementos de mayor preocupación ambiental en láminas de sargazo del año 2021 y enero 2022 de Puerto Morelos. Datos presentados en media de porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3).

Elemento químico	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Enero
Cu	0.18 \pm 0.31	ND	ND	0.17 \pm 0.29	0.32 \pm 0.55	ND	0.07 \pm 0.12	0.11 \pm 0.18	ND	ND
As	ND	0.06 \pm 0.1	ND	0.06 \pm 0.1	ND	0.43 \pm 0.75	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	0.23 \pm 0.39	ND	ND	ND	2.63 \pm 4.55	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	0.78 \pm 0.69	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

Tabla 4. Mapa de calor del análisis de elementos EDS de sargazo de Puerto Morelos 2021 y enero 2022. Valores máximos de cada mes presentados en porcentaje de peso seco (\pm desviación estándar) (n=3).

Elemento químico	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Enero
S	4.59	0.88	0.84	1.98	1.84	1.39	2.31	1.61	1.44	1.36
Cl	28.24	38.30	30.36	37.41	36.35	46.21	40.50	41.74	40.55	41.64
K	21.29	30.15	19.25	32.82	14.67	37.33	39.66	32.9	39.08	37.18
Ni	0.38	0.36	ND	0.89	0.19	ND	ND	ND	ND	ND
Cu	0.54	ND	ND	0.50	0.96	ND	0.21	0.32	ND	ND
As	ND	0.17	ND	0.17	ND	1.30	ND	ND	ND	ND
Hg	ND	0.68	ND	ND	ND	7.88	ND	ND	ND	ND
Pb	ND	1.32	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

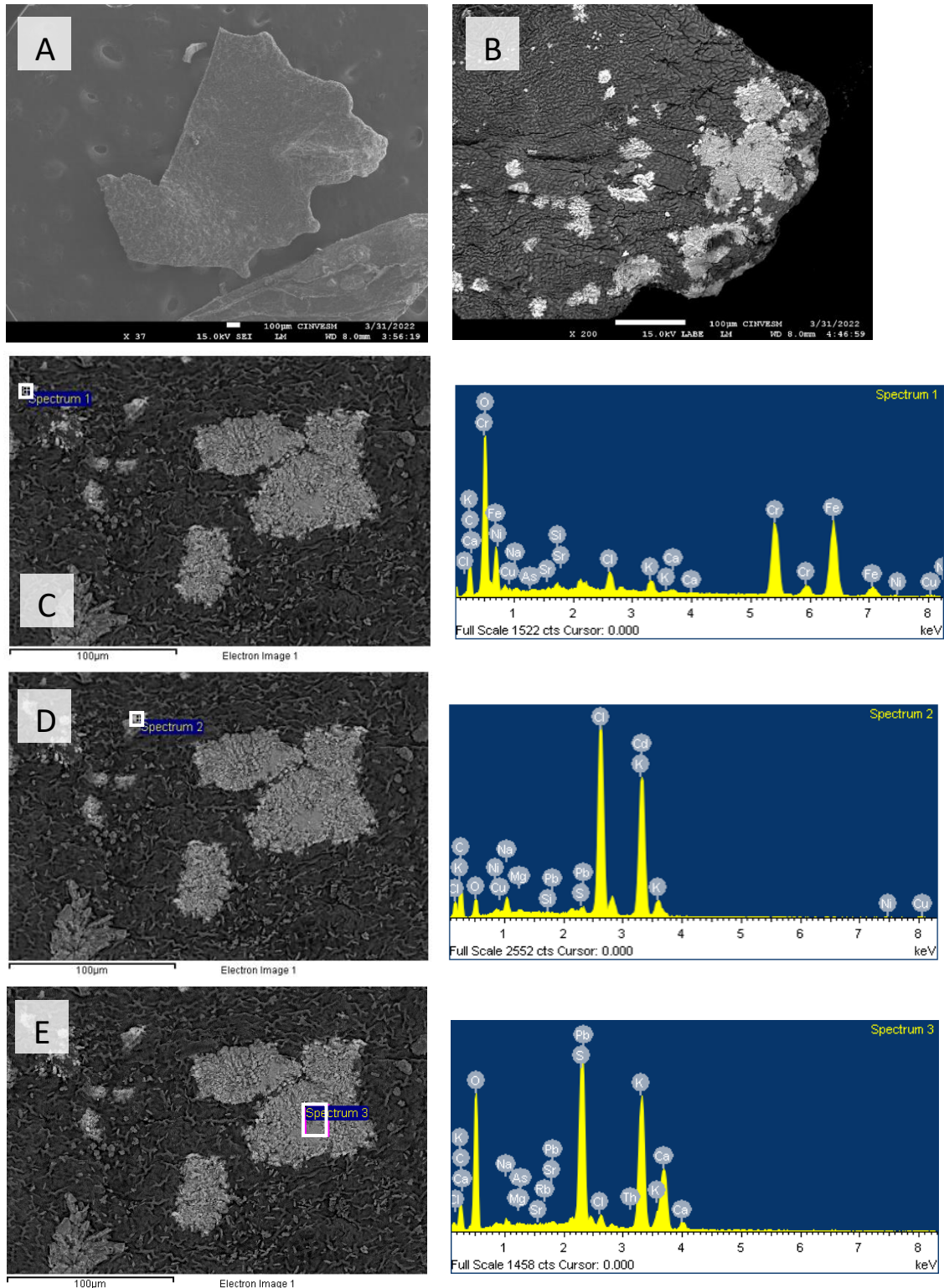


Figura 19. Análisis elemental de lámina de sargazo sin tratamiento previo. Tres análisis en una misma zona. A y B) Lámina de sargazo analizada. C) El primer punto analizado presenta altos picos de Cr y Fe presencia de Sr, As y Cu entre otros. D) El segundo punto de análisis presentó mayor presencia de Cd, Cl y K y ausencia de Fe y Cr. E) El tercer análisis presenta un pico elevado de Pb, S y K, ausencia de Fe y Cr y presencia de As, Sr, Mg, entre otros.

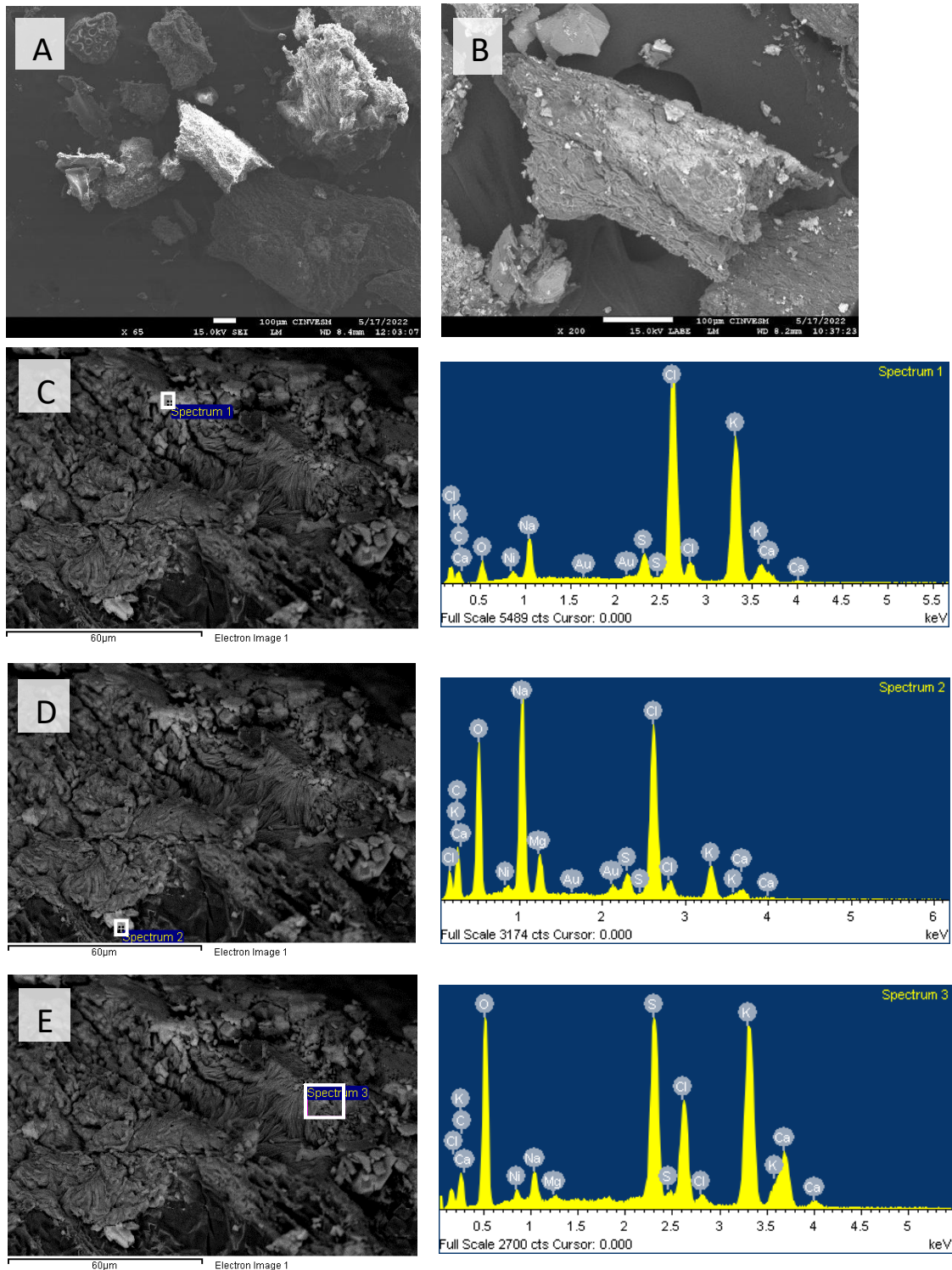


Figura 20. Análisis elemental de partícula de sargazo sin tratamiento previo. Tres análisis en una misma zona. A y B) Partícula de sargazo analizada. C) El primer punto analizado presenta altos picos de Cl y K, presencia de S, Na, Ni, entre otros y ausencia de Mg a comparación de los otros puntos. D) El segundo punto de análisis presentó mayor presencia de Na y menor de K. E) El tercero presenta un pico elevado de S y K, y menor presencia de Na y Cl.

9. DISCUSIÓN

9.1 ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS

Con base en la primera pregunta de investigación, se encontraron microplásticos en todas las muestras de sargazo, tanto en la fronda como en la parte líquida. La cantidad máxima fue en abril 2021 con 17.9 MP.g^{-1} dw de sargazo, lo que equivaldría a casi 18,000 microplásticos por kilogramo de sargazo seco. Esta cifra es muy superior a la que han reportado otros estudios en sedimentos, agua o en algunas especies marinas (Tabla 5). En un trabajo realizado en playas de las Antillas menores las cuales se encuentran cercanas al Giro Subtropical del Atlántico Norte con altos niveles de microplásticos, se obtuvo una máxima de $260 \pm 96 \text{ MP.kg}^{-1}$ (Bosker et al., 2018). En la playa Quetzalito de Guatemala en 2020, reportan un promedio de 30 MP.kg^{-1} (Mazariegos-Ortíz et al., 2020). En Puerto Rico se estudiaron seis playas del norte en donde se encontró un máximo de 17 MP.kg^{-1} (Pérez-Alvelo et al., 2021). Los datos obtenidos en esta investigación también resaltan al compararlos con estudios de macroalgas en China. Uno de ellos evaluó la cantidad de microplásticos en maricultura durante periodos de cultivo activos y periodos de cultivo inactivos, en donde encontraron mayor concentración de MPs en periodos activos con un promedio de $170 \pm 80 \text{ MP.kg}^{-1}$ peso húmedo (Feng et al., 2020). En otro estudio donde se evaluaron MPs en cultivo de alga comercial nori (*Pyropia spp.*), se hallaron hasta 300 MP.kg^{-1} peso seco (Li et al., 2020). Uno de los factores que puede contribuir a la diferencia en la abundancia de microplásticos es la falta de homogeneidad metodológica en cuanto al tamaño de tamiz, ya que, al tamizar con un tamaño de poro más grande, se descartan gran cantidad de MPs de menor tamaño. De igual forma, esta variación puede relacionarse con la naturaleza del sitio muestreado y/o el organismo estudiado. Las playas arenosas están expuestas al viento y la radiación solar, las microfibras fácilmente se secan y vuelan por su ligereza. En cuanto a las algas en maricultivos, estas se mantienen en un mismo sitio, por lo que las corrientes marinas hacen un recambio de agua lo que evita la acumulación de microplásticos. En cambio, debido a que *S. fluitans III* es una macroalga pelágica, flota y se mueve con las corrientes superficiales acumulando en sus láminas y estructuras contaminantes, como microplásticos, que se encuentren a flote.

Tabla 5. Tabla comparativa de la abundancia de microplásticos (MP.kg⁻¹dw) en el Caribe.

País	Año	Tipo de estudio	Abundancia de MPs	Referencia
Antillas Menores	2018	Playa	261± 6 **	(Bosker et al., 2018)
Colombia	2019	Manglar	2873 *	(Garcés-Ordóñez et al., 2019)
Guadalupe	2019	Arrecife coralino	10,400 *	(Sandre et al., 2019)
Guatemala	2020	Playa	30 *	(Mazariegos-Ortíz et al., 2020)
Puerto Rico	2021	Playa	17 *	(Pérez-Alvelo et al., 2021)
Mexico	2022	Organismo (sargazo)	17,900 *	Este estudio

* Valor máximo, ** Media y desviación estándar

En el presente trabajo se observó una variación temporal en la abundancia de microplásticos en el sargazo, con picos de mayor abundancia en abril y septiembre y menor cantidad en junio y enero. Un estudio realizado en Corsica, Francia, analizó la variación anual de microplásticos neustónicos durante un año (2011-2012) en el cual presenta mayor abundancia de microplásticos en abril y septiembre y menor abundancia en enero (Collignon et al., 2014).

Los cambios en la abundancia de MPs a lo largo del tiempo se pueden deber a cambios en la fuerza del viento. Se ha reportado que el viento provoca un aumento en la mezcla y redistribución vertical de las partículas de plástico en las capas superiores de la columna de agua (Collignon et al., 2012). En una investigación en donde analizan el efecto de la mezcla del viento en la distribución vertical de desechos plásticos flotantes, encontraron una relación inversa entre la velocidad del viento y la concentración de partículas plásticas en la superficie del mar en el Giro Subtropical del Atlántico Norte (Kukulka et al., 2012). En Puerto Morelos, la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales reportó un aumento en la fuerza del viento en junio y agosto del 2021 con 87.1 y 95.8 km/h respectivamente lo que pudo provocar una disminución en la concentración de microplásticos en estos meses. A su vez, se registró una disminución en la fuerza del viento en abril, julio y septiembre del mismo año 48.6, 48.2 y 55.8 km/h (Unidad Académica de Sistemas

Arrecifales, Puerto Morelos 2022), mismos meses en los que se encontró mayor concentración de microplásticos. Esto se relaciona con un estudio en donde se investigó la dispersión de partículas microplásticas suspendidas y flotantes en los mares de China Oriental (ECS) y mares adyacentes. Utilizaron un modelo numérico acoplado que incluía un módulo de seguimiento de partículas de Lagrange. Se reportó que los microplásticos suspendidos en la columna de agua son mayormente influenciados por las corrientes marinas, mientras que los microplásticos flotantes son mayormente influenciados por el viento (Zhang et al., 2020). Esto puede explicar los resultados obtenidos. Considerando que en el presente estudio se analizó sargazo pelágico, la dispersión de esta macroalga y los microplásticos puede estar mayormente influenciada por el viento cuando se encuentra cercana a las costas y mayormente influenciada por corrientes cuando se encuentra en el océano.

En un estudio realizado en el Caribe, durante la época seca (noviembre y diciembre), los vientos fuertes aceleraron las corrientes superficiales al sur de las Antillas cerca de las costas venezolanas, generando corrientes superficiales con velocidades altas, que se unieron a la corriente del Caribe, comportamiento que no se observó durante la época húmeda (agosto y septiembre) (Posada Jaramillo, 2019). La baja velocidad de corriente observada en los meses de agosto y septiembre puede evitar la distribución vertical de los microplásticos de la superficie, ocasionando una mayor presencia de microplásticos en estos meses.

En un estudio realizado en Puerto Morelos por Franklin (2015), utilizando un modelo numérico, encontró que el arreglo de olas era relativamente uniforme a lo largo de la laguna arrecifal para densidades de energía de olas baja, e incrementaba con un incremento en la densidad de energía de las olas. Asimismo, analizó el efecto de la rugosidad del arrecife en oleaje, y reportó que, a mayor rugosidad en la estructura coralina, se reduce la altura de la ola incidente por un 67-70%. En la cresta arrecifal, la energía en la frecuencia máxima disminuye sustancialmente cuando rompen las olas, asociado con una reducción en la altura de las olas y la transferencia de energía a frecuencias más altas y bajas, particularmente a frecuencias de infragravedad. Debido a que en Puerto Morelos se encuentra parte de la barrera arrecifal “Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental”, puede disminuir la fuerza de las olas entrantes a la costa, influyendo en la abundancia de microplásticos que provengan del océano u otras costas. Para determinar esto se

deberán realizar más estudios. En conjunto, el comportamiento del oleaje el cual es afectado por mareas, el viento, la corriente de Yucatán, así como el efecto de la rugosidad característica del arrecife de la zona, son variables que se deben tener en cuenta para el análisis del posible origen de los microplásticos.

Marino-Tapia y colaboradores (2011) analizaron la transformación del oleaje en la zona arrecifal de Puerto Morelos bajo condiciones de huracán, mencionan que se registró una propagación de olas originadas principalmente el Mar Caribe producidas por vientos dominantes y, un pequeño porcentaje del norte generadas por las tormentas de invierno provenientes del Golfo de México. El 90% de las observaciones mostró una altura de ola relativamente baja ($<1\text{m}$) y periodos de ola cortos ($<8\text{ s}$) indicando que se originan de mares locales. Partiendo de esto, una baja intensidad en el oleaje de las costas de Puerto Morelos como se ha reportado puede reducir la dispersión vertical y disminuir la velocidad de dispersión horizontal provocando un acumulamiento de microplásticos en esta zona. Siendo así, la intensidad del viento el factor que puede estar teniendo mayor influencia en la variación temporal de concentración de microplásticos en las costas de Puerto Morelos. Son necesarios más estudios para poder entender el movimiento y distribución de microplásticos de la zona.

En las Figuras 21 A y B se observa la abundancia de microplásticos encontrados en sargazo que arriba en las costas de Puerto Morelos en el tiempo y en el otro el volumen de sargazo removido de la playa en 7.3 km entre Punta Nizuc y Punta Brava, Quintana Roo. Al comparar ambas gráficas, se puede observar una relación casi inversamente proporcional de la biomasa de sargazo recolectada y la abundancia de microplásticos en el sargazo. Cuando se tiene presencia de mayor abundancia de sargazo en un lugar con cantidades constantes de MPs, es de esperarse que se encuentren menor número de MPs en el sargazo ya que estos se distribuirían en una mayor cantidad de macroalga. Sin embargo, esta relación se debe analizar a mayor profundidad en estudios futuros.

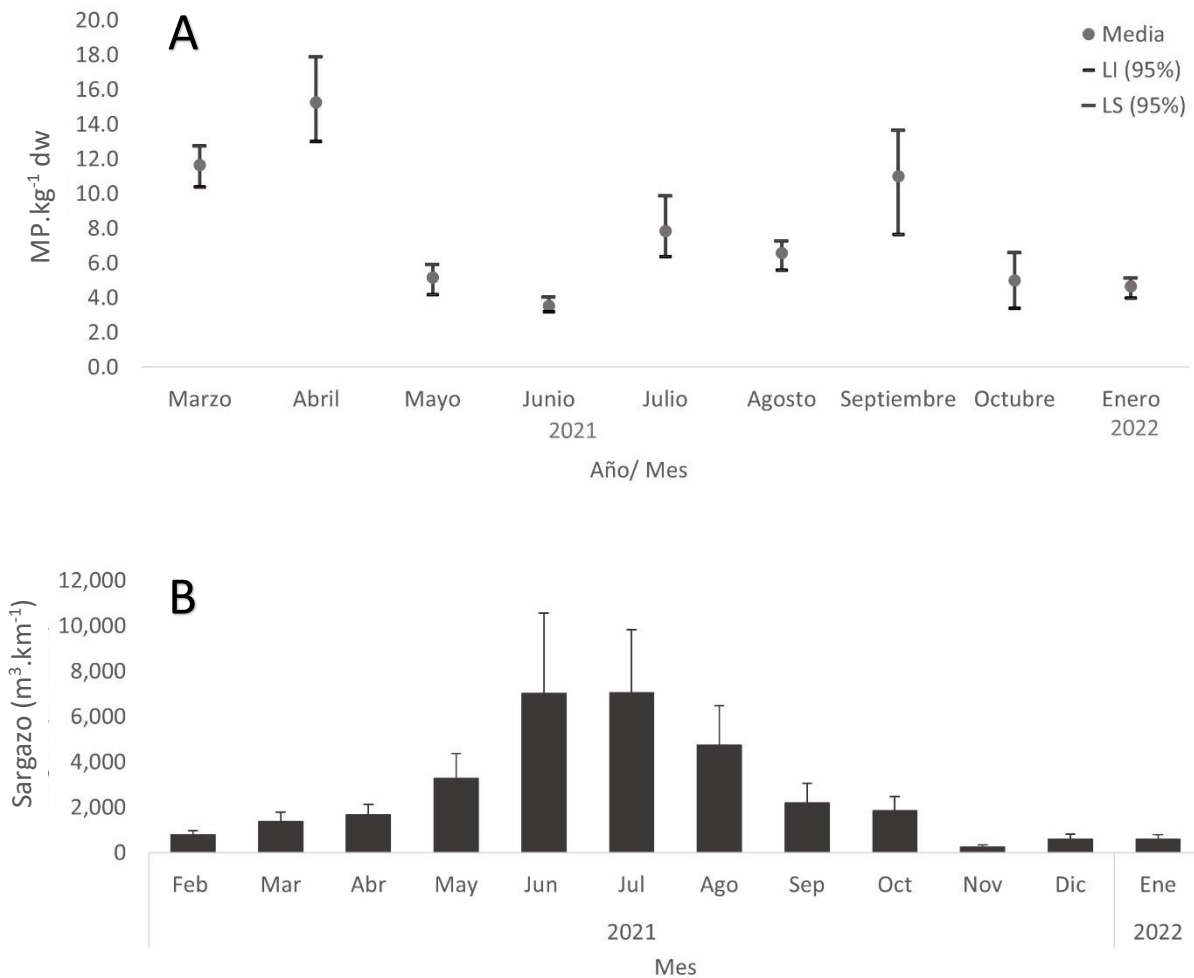


Figura 21. A) gráfico de abundancia de microplásticos en sargazo (datos de este trabajo), B) gráfico de biomasa de sargazo recolectado en la costa de Quintana Roo 2021-2022 (datos proporcionados por Mtra. Rosa Rodríguez Martínez del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Puerto Morelos, Quintana Roo).

9.2 FORMA DE MICROPLÁSTICOS

En cuanto a la forma de los microplásticos encontrados en esta investigación predominaron las fibras en la mayoría de los meses, con más del 90%. En 16 playas arenosas de Dubái, se reportó una mayor abundancia de microfibras (Aslam et al., 2020), al igual en un trabajo de presencia de MPs en hojas de pasto marino (*Thalassia testudinum*), con predominancia de microfibras (Goss et al., 2018). Por otro lado, en una investigación realizada en seis playas arenosas de las Antillas menores reportan mayor cantidad de microfibras (>95%). Sin embargo, en un estudio realizado

en el Mar Caribe mexicano en playas de Holbox y Playa del Carmen, Quintana Roo, se encontró mayor presencia de fragmentos (Alvarez-Zeferino et al., 2020), cabe mencionar que estos autores utilizaron un tamizador con un tamaño de poro mayor (1.13 mm) para la extracción de los MPs. Posteriormente, colocaron el sedimento en solución saturada de sodio y tomaron con unas pinzas los MPs observados a simple vista. Esto puede explicar el resultado que obtuvieron ya que, el diámetro de las microfibras es menor a 1.13 mm y son mayormente identificadas por estereoscopio.

Se ha reportado que una fuente importante de contaminación por microfibras es la descarga de agua de las lavadoras de ropa, mencionan que en una lavada de 6 kg de ropa se pueden liberar hasta 700,000 fibras (Napper y Thompson, 2016). La predominancia de microfibras encontradas en este estudio puede deberse a la falta de tratamiento de aguas residuales descargadas por zonas urbanas que descargan al mar a través de los ríos subterráneos, en las costas del Caribe. Fahrenfeld y colaboradores mencionan que cierto tipo de morfologías de MP como las microfibras derivadas de textiles son mayormente asociadas con descargas de aguas residuales (Fahrenfeld et al., 2019). Sin embargo, no se debe descartar que los MPs pueden provenir de otras áreas. Esto se debe comprobar en futuros estudios.

9.3 COLORES DE MICROPLÁSTICOS

En este estudio se observó una alta diversidad de colores en los microplásticos, con predominancia del transparente, negro y azul con proporciones máximas de 57%, 45% y 36% respectivamente. Sin embargo, no se observó ningún patrón de variación en el tiempo. En un estudio realizado en las playas del Caribe mexicano reportan el color blanco como predominante (23%), seguido de los colores azul (17%), verde (17%) y amarillo (16%) (Alvarez-Zeferino et al., 2020). En playas de Dubái, reportan la predominancia del color azul (26.5%), seguido del verde (16.9%), blanco (16.7%), negro (14.8%) y rojo (11.7%) (Aslam et al., 2020). También, en el presente estudio, se observaron fibras “multicolor”. La mayoría de estas fibras estaban compuestas por azul y transparente. En algunos artículos como (Seng et al., 2020) mencionan como criterio de identificación de MPs en forma de fibra deben tener un color y grosor uniforme por toda la estructura. Sin embargo, en este trabajo se observaron distintos colores y diámetros

que componen una misma microfibr, esta última característica dependía del nivel de desgaste. De igual forma, en una investigación que se está realizando actualmente donde se analizan los MPs de los cenotes de Yucatán, se han encontrado MPs multicolor, en su mayoría azul con transparente al igual que el presente estudio. Esta evidencia enmarca a que la causa sea las aguas residuales de las lavadoras provenientes de las zonas urbanas. Dada la combinación de colores y la ropa más frecuentemente utilizada en la región, estas fibras multicolor pueden originarse de las prendas compuestas de mezclilla como los *jeans*. Estos datos se deberán corroborar en estudios futuros.

Además, los colores de los MPs pueden ser una característica útil para identificar fuentes potenciales de microplásticos y contaminación potencial durante la preparación de la muestra (Fahrenfeld et al., 2019). Los microplásticos transparentes generalmente se pueden derivar de plásticos desechables como: bolsas, vasos y botellas de plástico. Asimismo, es probable que los microplásticos de color se originen a partir de una variedad de productos de plástico con una larga vida útil. Debido a que el color no es permanente y pueden ocurrir procesos de decoloración por factores naturales del medio en el que se encuentre expuesto y en el proceso de preparación de la muestra, la discusión del color para deducir el tipo u origen de los microplásticos debe ser cautelosa (Andrady, 2017; Yang et al., 2021).

Por otro lado, la literatura sugiere que hay especies marinas que tienen mayor tendencia a ingerir microplásticos de ciertos colores. En un estudio realizado en Chile, en el cangrejo real se observó una preferencia de ingestión de microplásticos color azul (Andrade y Ovando, 2017). En otro estudio realizado en el oeste del Canal de la Mancha encontró que el 83% de los microplásticos ingeridos por las larvas de peces también eran azul (Steer et al., 2017). Además, se encontró que las muestras de heces de foca tenían microplásticos negros, transparentes, rojos y azules (Nelms et al., 2018). La investigación sugiere que algunos de los peces vendidos comercialmente, que se alimentan de zooplancton, son más propensos a comer microplásticos de color blanco, beige y amarillo que se asemejan a sus presas (Aslam et al., 2020; Shaw y Day, 1994).

9.4 MORFOLOGÍA DE MICROPLÁSTICOS EN MEB

En esta investigación, se observaron en las imágenes SEM objetos esféricos y alargados que asemejan el tamaño y morfología de bacterias cocoides y bacilos. Este hallazgo no es de extrañarse ya que, en la superficie marina, se encuentra una gran abundancia de microorganismos al igual que microplásticos flotantes. Las microfibras flotantes, debido a su amplia superficie dada su masa, y a su composición química, proveen de un sustrato más duradero que otros de origen natural. Estos son recubiertos por un *biofilm* en una escala de tiempo corta que ronda de los 6 a 8 meses funcionando como un “arrecife microbiano” (Chubarenko et al., 2016; Dudek et al., 2020; Zettler et al., 2013).

9.5 METALES PESADOS EN MICROPLÁSTICOS

En el análisis de presencia de metales pesados en microplásticos se encontraron diversos elementos como: Al, Cl, Ti, Fe, Cu, Pb, Zn, As. En 2015, Brennecke y colaboradores realizaron un estudio de 14 días en donde se examinó la capacidad de absorción de Cu y Zn de los microplásticos. Se probó una interacción significativa entre estos metales pesados y los microplásticos (Brennecke et al., 2016). Un trabajo realizado en playas del suroeste de Inglaterra se halló la presencia de Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd y P, las capacidades de adsorción fueron mayores para los gránulos varados que para los gránulos vírgenes. (Holmes et al., 2012). En otro estudio realizado en seis granjas de cultivo de pepino de mar en China, se encontraron presentes diversos metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn) en microplásticos encontrados en sedimentos y en la pared corporal de pepinos de mar (Mohsen et al., 2019). Diversos estudios sugieren que los plásticos pueden representar un vehículo importante para el transporte de metales en el medio marino.

9.6 METALES PESADOS EN SARGAZO

En este estudio se encontró la presencia de macroelementos esenciales para las plantas como C, O, Ca, Mg, K, S y otros microelementos como Cl, Cu y Ni los cuales se presentan normalmente en bajas cantidades, sin embargo, si se encuentran en altas cantidades pueden ser tóxicos.

Rodríguez-Martínez et al. (2020) realizaron un estudio semejante en el Caribe mexicano donde reportan la presencia de C, O, Cl, K y en menor cantidad Mg, de igual forma presentaron altos niveles de Cl y K, así como niveles detectables de S, Fe, Cu, As y Pb (Rodríguez-Martínez et al.,

2020). Similar a lo que reporta Rodríguez-Martínez y colaboradores, en los resultados obtenidos en la investigación presente, se encontró la presencia de elementos de preocupación ambiental como el As y Pb, así como Hg el cual no había sido reportado por el estudio mencionado anteriormente. Estos elementos fueron detectados en bajos porcentajes por lo que se recomienda realizar análisis cuantitativos complementarios para conocer las concentraciones en las que se pueden encontrarse en el sargazo. Por otro lado, se presentaron altos porcentajes de peso de K y Cl a partir de julio 2021 (Tabla 4), estos elementos pueden estar presentes en forma de cloruro de potasio. Este compuesto es el fertilizante potásico más extensamente utilizado debido a su bajo costo, está compuesto por 50-52% K (60-63% K₂O) y 45-47% Cl (International Plant Nutrition Institute (IPNI), s.f.). No obstante, la presencia de este fertilizante en el sargazo debe ser confirmado en estudios futuros.

En el análisis elemental en lámina (Fig. 19) se puede observar mayor variación entre puntos ya que se encuentra una mayor distancia entre ellos a comparación del análisis en la partícula de sargazo (Fig. 20). Este método detecta la presencia de elementos en la superficie de la macroalga en zonas puntuales. Para obtener más información sobre el objeto estudiado se pueden analizar mayor número de puntos y/o complementar con un análisis de química analítica.

10. CONCLUSIONES

En el presente estudio se reporta por primera vez la presencia de microplásticos en el sargazo pelágico. Estos estuvieron presentes en todas las muestras recolectadas. El sargazo tiene la capacidad de concentrar en mayor medida los microplásticos al compararlo con la biomasa de otras especies. Por otro lado, a nivel temporal, la variación de abundancia no fue uniforme, presentó mayor abundancia en primavera y otoño y una menor abundancia en verano e invierno. Hubo una notable predominancia de microplásticos en forma de fibra y mayor presencia de los colores transparente, negro y azul. El análisis elemental de microplásticos presentó mayor cantidad de elementos en las zonas más rugosas/desgastadas de los filamentos y en microfibras de color rojo. De igual forma, se detectó la presencia de arsénico y metales pesados como Cu, Pb y Hg en el sargazo.

La presencia de microplásticos y metales pesados en el sargazo se debe tener en cuenta para la implementación de este recurso en otros sectores, así como sus efectos en diversas especies y el ecosistema. Estos contaminantes representan un riesgo para los ecosistemas marinos incluyendo el arrecife coralino, pastos marinos y diversas especies locales, así como para los habitantes de las zonas costeras y consumidores de recursos marinos. Para disminuir la contaminación por microplásticos, se deben tomar planes de acción que reduzca la producción y el consumo de plásticos, en especial de un solo uso, mejorar la disposición final de los residuos, fomentando el reciclaje, y tener un mejor control de tratamiento de aguas residuales. De igual forma se debe recolectar el sargazo antes de que arribe a las costas para evitar el impacto que tiene en el ecosistema costero.

11. PERSPECTIVAS

Para comprender mejor la dinámica y origen de los microplásticos, se recomienda aumentar el número de muestras, así como analizar la variación temporal y espacial de la abundancia de microplásticos de diversas costas del Gran Caribe. Asimismo, se recomienda analizar la composición química de los microplásticos para comprender mejor el origen de estos. Se debe investigar con mayor profundidad la relación entre la biomasa de sargazo que arriba a la costa y la cantidad de MPs que contiene. Para tener una mejor perspectiva del origen de las microfibras del ecosistema marino, se recomienda realizar análisis de diversas prendas y las microfibras que desprenden y realizar las comparaciones correspondientes. De igual forma, se recomienda llevar a cabo un análisis para confirmar la presencia del compuesto cloruro de potasio el cual puede ser un fertilizante que sobre estimule el crecimiento de esta macroalga en etapas de su ciclo de vida posteriores a la arribazón en las costas del Caribe. Con el fin de mejorar la metodología, se recomienda filtrar los microplásticos para tener un tamaño de MP específico y poder realizar comparaciones con otros estudios que incluyen este procedimiento. Finalmente, para obtener más información sobre los elementos que contiene el sargazo, se deben realizar análisis elementales cuantitativos como fluorescencia de rayos X, espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés), espectroscopía de absorción atómica de llama (EAAF, por sus siglas en inglés), entre otros.

LITERATURA CITADA

Acosta, C. (1578). *Tractado de las drogas, y medicinas de las Indias Orientales*. (M. de Victoria, Ed.). Impresor de su Magestad.

Acosta-Coley, Isabel, y Jesus 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.

Alimba, Chibuisi Gideon, y Caterina Faggio. 2019. "Microplastics in the Marine Environment: Current Trends in Environmental Pollution and Mechanisms of Toxicological Profile." *Environmental Toxicology and Pharmacology* 68:61–74. doi: 10.1016/j.etap.2019.03.001.

Alvarez-Zeferino, Juan Carlos, Sara Ojeda-Benítez, Arely Areanely Cruz-Salas, Carolina Martínez-Salvador, y Alethia Vázquez Morillas. 2020. "Dataset of Quantification and Classification of Microplastics in Mexican Sandy Beaches." *Data in Brief* 33:106473. doi: 10.1016/j.dib.2020.106473.

Alvarez-Zeferino, Juan Carlos, Sara Ojeda-Benítez, Arely Areanely Cruz-Salas, Carolina Martínez-Salvador, y Alethia Vázquez-Morillas. 2020. "Microplastics in Mexican Beaches." *Resources, Conservation and Recycling* 155. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104633.

Andrade, Claudia, y Fernanda Ovando. 2017. "First Record of Microplastics in Stomach Content of the Southern King Crab *Lithodes Santolla* (Anomura: Lithodidae), Nassau Bay, Cape Horn, Chile." *Anales Del Instituto de La Patagonia* 45(3):59–65. doi: 10.4067/S0718-686X2017000300059.

Andrady, Anthony L. 2017. "The Plastic in Microplastics: A Review." *Marine Pollution Bulletin* 119(1):12–22. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.01.082.

AOML Communications to Physical Oceanography. 2020. "Chasing Sargassum: New Insights on Coastal Sargassum Invasions." Retrieved August 22, 2022 (<https://www.aoml.noaa.gov/news/chasing-sargassum/>).

Aranda, Dalila Aldana, Hazel A. Oxenford, Jairo Medina, Gabriel Delgado, Martha Enríquez Díaz, Citlali Samano, Víctor Castillo Escalante, Marion Bardet, Eve Mouret, y Claude Bouchon. 2022. "Widespread Microplastic Pollution across the Caribbean Sea Confirmed Using Queen Conch." *Marine Pollution Bulletin* 178. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113582.

Ashton, Karen, Luke Holmes, y Andrew Turner. 2010. "Association of Metals with Plastic Production Pellets in the Marine Environment." *Marine Pollution Bulletin* 60(11):2050–55. doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.07.014.

Aslam, Huda, Tarig Ali, Md Maruf Mortula, y Atta G. Attaelmanan. 2020. "Evaluation of Microplastics in Beach Sediments along the Coast of Dubai, UAE." *Marine Pollution Bulletin* 150. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110739.

Bayen, Stéphane. 2012. "Occurrence, Bioavailability and Toxic Effects of Trace Metals and Organic Contaminants in Mangrove Ecosystems: A Review." *Environment International* 48:84–101. doi: 10.1016/j.envint.2012.07.008.

Belmonte Serrato, F., A. Romero Días, F. Alonso Sarría, J. Moreno Brotóns, and S. Rojo López. 2010. "Afección de Suelos Agrícolas Por Metales Pesados En Áreas Limítrofes a Explotaciones Mineras Del Sureste de España."

Bergman, Melanie, Lars Gutow, y Michael Klages. 2015. *Marine Anthropogenic Litter*. edited by M. Bergmann, L. Gutow, and M. Klages. Cham: Springer International Publishing.

Bosker, Thijs, Lucia Guaita, y Paul 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.

Brennecke, Dennis, Bernardo Duarte, Filipa Paiva, Isabel Caçador, y João Canning-Clode. 2016. "Microplastics as Vector for Heavy Metal Contamination from the Marine Environment." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178:189–95. doi: 10.1016/j.ecss.2015.12.003.

Bryan, G. W., y W. J. Langston. 1992. "Bioavailability, Accumulation and Effects of Heavy Metals in Sediments with Special Reference to United Kingdom Estuaries: A Review." *Environmental Pollution* 76(2):89–131. doi: 10.1016/0269-7491(92)90099-V.

Carpenter, Edward J., y K. L. Smith. 1972. "Plastics on the Sargasso Sea Surface." *Science* 175(4027):1240–41. doi: 10.1126/science.175.4027.1240.

Catrouillet, Charlotte, Mélanie Davranche, Imane Khatib, Corentin Fauny, Aurélie Wahl, y Julien Gigault. 2021. "Metals in Microplastics: Determining Which Are Additive, Adsorbed, and Bioavailable." *Environmental Science: Processes and Impacts* 23(4):553–58. doi: 10.1039/d1em00017a.

- Choi, Jin Soo, Youn-Joo Jung, Nam-Hui Hong, Sang Hee Hong y June-Woo 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, y 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.
- Cole, Matthew, Pennie Lindeque, Claudia Halsband, y Tamara S. Galloway. 2011. "Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review."
Marine Pollution Bulletin 62(12):2588–97. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- Collignon, Amandine, Jean Henri Hecq, François Galgani, France Collard, y Anne Goffart. 2014. "Annual Variation in Neustonic Micro- and Meso-Plastic Particles and Zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica)."
Marine Pollution Bulletin 79(1–2):293–98. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.11.023.
- Collignon, Amandine, Jean Henri Hecq, François Galgani, Pierre Voisin, France Collard, y Anne Goffart. 2012. "Neustonic Microplastic and Zooplankton in the North Western Mediterranean Sea."
Marine Pollution Bulletin 64(4):861–64. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.01.011.
- Coração, Amanda Cunha De Souza, Fernanda Silva Dos Santos, Jorge Andrés Duarte Duarte, Erick Alves Pereira Lopes-Filho, Joel Campos De-Paula, Leandro Machado Rocha, Natascha Krepsky, Sorele Batista Fiaux, y Valéria Laneuville Teixeira. 2020. "What Do We Know about the Utilization of the Sargassum Species as Biosorbents of Trace Metals in Brazil?"
Journal of Environmental Chemical Engineering 8(4):103941. doi: 10.1016/j.jece.2020.103941.
- Dudek, Cassandra L., Bianca N. Cruz, Beth Polidoro, y Susanne Neuer. 2020. "Microbial Colonization of Microplastics in the Caribbean Sea."
Limnology and Oceanography Letters 5(1):5–17. doi: 10.1002/lol2.10141.
- Egbeocha, CO, S. Malek, CU Emenike, y P. Milow. 2018. "Feasting on Microplastics: Ingestion by and Effects on Marine Organisms."
Aquatic Biology 27:93–106. doi: 10.3354/ab00701.
- Estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo. 2021. "Datos Históricos Meteorológicos de 2021 En El Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo." Retrieved July 12, 2022

(<https://es.weatherspark.com/h/y/146174/2021/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2021-en-el-Aeropuerto-Internacional-%C3%81ngel-Albino-Corzo-M%C3%A9xico#Figures-Summary>).

Fahrenfeld, N. L., Georgia Arbuckle-Keil, Nasrin Naderi Beni y Shannon L. Bartelt-Hunt. 2019. "Source Tracking Microplastics in the Freshwater Environment." *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 112:248–54. doi: 10.1016/j.trac.2018.11.030.

Feng, Zhihua, Tao Zhang, Jiaxuan Wang, Wei Huang, Rui Wang, Juntian Xu, Guanghui Fu, y 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.

Ferreira, Micheli da Silva, Eliane Teixeira Mársico, Carlos Adam Conte Junior, Aguinaldo Nepomuceno Marques Júnior, Sergio Borges Mano, y Sergio Carmona de São Clemente. 2013. "Contaminação Por Metais Traço Em Mexilhões Perna Perna Da Costa Brasileira." *Ciência Rural* 43(6):1012–20. doi: 10.1590/S0103-84782013005000062.

Franklin, Gemma Louise. 2015. "Effects of Roughness on Wave-Dominated Coral Reef Environments." Tesis doctoral, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Mexico.

Godínez-Ortega, José Luis, Juan v. Cuatlán-Cortés, Juan M. López-Bautista, y Brigitta I. van Tussenbroek. 2021. "A Natural History of Floating Sargassum Species (Sargasso) from Mexico." in *Natural History and Ecology of Mexico and Central America*.

Google Earth. s.f. "Península de Yucatán [Mapa Online]." Retrieved August 22, 2022 (<https://earth.google.com/web/@20.31963826,-87.59911022,-175.26389718a,616723.59047703d,35y,0h,0t,0r>).

Goss, Hayley, Jacob Jaskiel, y Randi Rotjan. 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.

Haney, J. Christopher. 1986. "Seabird Patchiness in Tropical Oceanic Waters: The Influence of Sargassum 'Reefs.'" *The Auk* 103(1):141–51. doi: 10.1093/auk/103.1.141.

Hirt, Nell, y Mathilde Body-Malapel. 2020. "Immunotoxicity and Intestinal Effects of Nano- and Microplastics: A Review of the Literature." *Particle and Fibre Toxicology* 17(1):57. doi: 10.1186/s12989-020-00387-7.

Holmes, Luke A., Andrew Turner, y Richard C. Thompson. 2012a. "Adsorption of Trace Metals to Plastic Resin Pellets in the Marine Environment." *Environmental Pollution* 160(1):42–48. doi: 10.1016/j.envpol.2011.08.052.

Holmes, Luke A., Andrew Turner, y Richard C. Thompson. 2012b. "Adsorption of Trace Metals to Plastic Resin Pellets in the Marine Environment." *Environmental Pollution* 160:42–48. doi: 10.1016/j.envpol.2011.08.052.

Imhof, Hannes K., Jakub Rusek, Michaela Thiel, Justyna Wolinska y Christian 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.

Innocenti, Rachel A., Rusty A. Feagin, y Thomas P. Huff. 2018. "The Role of Sargassum Macroalgal Wrack in Reducing Coastal Erosion." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 214:82–88. doi: 10.1016/j.ecss.2018.09.021.

International Plant Nutrition Institute (IPNI). s.f. "Cloruro de Potasio." *Fuentes de Nutrientes Específicos* 3. Retrieved August 24, 2022 ([http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/\\$FILE/NSS-ES-03.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/A48F7C5B42D2D6BF85257BBA0059A849/$FILE/NSS-ES-03.pdf)).

Jeong, Chang-Bum, Hye-Min Kang, Min-Chul Lee, Duck-Hyun Kim, Jeonghoon Han, Dae-Sik Hwang, Sami Souissi, Su-Jae Lee, Kyung-Hoon Shin, Heum Gi Park y Jae-Seong Lee. 2017. "Adverse Effects of Microplastics and Oxidative Stress-Induced MAPK/Nrf2 Pathway-Mediated Defense Mechanisms in the Marine Copepod Paracyclopsina Nana." *Scientific Reports* 7(1):41323. doi: 10.1038/srep41323.

Jeong, Jaeseong y Jinhee Choi. 2019. "Adverse Outcome Pathways Potentially Related to Hazard Identification of Microplastics Based on Toxicity Mechanisms." *Chemosphere* 231:249–55. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.003.

Kukulka, T., G. Proskurowski, S. Morét-Ferguson, D. W. Meyer, y 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.

Lebreton, L., B. Slat, F. Ferrari, B. Sainte-Rose, J. Aitken, R. Marthouse, S. Hajbane, S. Cunsolo, A. Schwarz, A. Levivier, K. Noble, P. Debeljak, H. Maral, R. Schoeneich-Argent, R. Brambini, y J. Reisser. 2018. "Evidence That the Great Pacific Garbage Patch Is Rapidly Accumulating Plastic." *Scientific Reports* 8(1):4666. doi: 10.1038/s41598-018-22939-w.

- Legator, Marvin S., Chantele R. Singleton, Debra L. Morris, y Donna L. Philips. 2001. "Health Effects from Chronic Low-Level Exposure to Hydrogen Sulfide." *Archives of Environmental Health: An International Journal* 56(2):123–31. doi: 10.1080/00039890109604063.
- Li, Qipei, Zihua Feng, Tao Zhang, Cuizhu Ma, y Huahong Shi. 2020. "Microplastics in the Commercial Seaweed Nori." *Journal of Hazardous Materials* 388. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122060.
- Marino-Tapia, Ismael, Rodolfo Silva, Cecilia Enriquez, Edgar Mendoza-Baldwin, Edgar Escalante-Mancera, y Francisco Ruiz-Rentería. 2011. "WAVE TRANSFORMATION AND WAVE-DRIVEN CIRCULATION ON NATURAL REEFS UNDER EXTREME HURRICANE CONDITIONS." *Coastal Engineering Proceedings* 1(32):28. doi: 10.9753/icce.v32.waves.28.
- Martin, Llindsay Margaret. 2016. "Pelagic Sargassum and Its Associated Mobile Fauna in the Caribbean, Gulf of Mexico, and Sargasso Sea." Master's Thesis, National Science Foundation.
- Mazariegos-Ortíz, Carlos, María de los Ángeles Rosales, Leonel Carrillo-Ovalle, Renan Pereira Cardoso, Marcelo Costa Muniz, y Roberto 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.
- Milledge, John James, Supattra Maneein, Elena Arribas López, y Debbie Bartlett. 2020. "Sargassum Inundations in Turks and Caicos: Methane Potential and Proximate, Ultimate, Lipid, Amino Acid, Metal and Metalloid Analyses." *Energies* 13(6). doi: 10.3390/en13061523.
- Mohsen, Mohamed, Qing Wang, Libin Zhang, Lina Sun, Chenggang Lin, y Hongsheng Yang. 2019. "Heavy Metals in Sediment, Microplastic and Sea Cucumber *Apostichopus Japonicus* from Farms in China." *Marine Pollution Bulletin* 143:42–49. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.025.
- Nagajyoti, P. C., K. D. Lee, y T. V. M. Sreekanth. 2010. "Heavy Metals, Occurrence and Toxicity for Plants: A Review." *Environmental Chemistry Letters* 8(3):199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8.
- Napper, Imogen E., y Richard C. Thompson. 2016. "Release of Synthetic Microplastic Plastic Fibres from Domestic Washing Machines: Effects of Fabric Type and Washing Conditions." *Marine Pollution Bulletin* 112(1–2):39–45. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.025.
- Nelms, Sarah E., Tamara S. Galloway, Brendan J. Godley, Dan S. Jarvis, y Penelope K. Lindeque. 2018. "Investigating Microplastic Trophic Transfer in Marine Top Predators." *Environmental Pollution* 238:999–1007. doi: 10.1016/j.envpol.2018.02.016.

ÖĞÜTÜCÜ, Gamze, Gülce ÖZDEMİR, Zeynep ACARARICIN, and Ahmet AYDIN. 2021. "Trend Analysis of Lead Content in Roadside Plant and Soil Samples in Turkey." *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences* 18(5):581–88. doi: 10.4274/tjps.galenos.2021.45389.

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.

Plastic Europe. 2020. "Plastics – the Facts 2020." *PlasticEurope* 1–64. Retrieved August 24, 2022 (<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>).

Posada Jaramillo, Federico. 2019. "MODELO HIDRODINÁMICO Y DE OLEAJE DEL MAR CARIBE DELFT CARIBE." Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

Revis, N. W., T. R. Osborne, G. Holdsworth, and C. Hadden. 1990. "Mercury in Soil: A Method for Assessing Acceptable Limits." *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 19(2):221–26. doi: 10.1007/BF01056090.

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., A. E. Medina-Valmaseda, P. Blanchon, L. V. Monroy-Velázquez, A. Almazán-Becerril, B. Delgado-Pech, L. Vásquez-Yeomans, V. Francisco, y M. C. García-Rivas. 2019. "Faunal Mortality Associated with Massive Beaching and Decomposition of Pelagic Sargassum." *Marine Pollution Bulletin* 146(October 2018):201–5. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.015.

Rodríguez-Martínez, Rosa E., Priyadarsi D. Roy, Nuria Torrescano-Valle, Nancy Cabanillas-Terán, Silvia Carrillo-Domínguez, Ligia Collado-Vides, Marta García-Sánchez, y Brigitta I. van Tussenbroek. 2020. "Element Concentrations in Pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019." *PeerJ* 2020(2). doi: 10.7717/peerj.8667.

Rodríguez-Martínez, Rosa Elisa, Brigitta van Tussenbroek, y Eric Jordán-Dahlgren. 2017. "Afluencia Masiva de Sargazo Pelágico a La Costa Del Caribe Mexicano (2014-2015)." *FloreCIMINETOS Algaes Nocivos En México* (December 2016):438.

Rodríguez-Muñoz, Rodolfo, Aarón Israel Muñiz-Castillo, Jorge Iván Euán-Avila, Héctor Hernández-Núñez, David Sergio Valdés-Lozano, Reyna Cristina Collí-Dulá, y Jesús Ernesto Arias-González. 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. doi: 10.1016/j.rsma.2021.102005.

Rose, Deanna, y Mona Webber. 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.

Rumphius, G. E. (1750). *Herbarium amboinense*. 6.

Satterthwaite, F. E. 1946. “An Approximate Distribution of Estimates of Variance Components.” *Biometrics Bulletin* 2(6):110. doi: 10.2307/3002019.

Seepersaud, Mohindra A., Antonio Ramkissoon, Savita Seecharan, Yomica L. Powder-George, y Faisal K. Mohammed. 2018. “Environmental Monitoring of Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Sargassum Filipendula and Sargassum Vulgare along the Eastern Coastal Waters of Trinidad and Tobago, West Indies.” *Journal of Applied Phycology* 30(3):2143–54. doi: 10.1007/s10811-017-1372-3.

Seng, Nicholas, Samantha Lai, Jenny Fong, Muhammad Faiq Saleh, Clement Cheng, Zi Yu Cheok, y Peter A. Todd. 2020. “Early Evidence of Microplastics on Seagrass and Macroalgae.” *Marine and Freshwater Research* 71(8):922–28. doi: 10.1071/MF19177.

Shaw, David G., y Robert H. Day. 1994. *Colour-and Form-Dependent Loss of Plastic Micro-Debris from the North Pacific Ocean*. Vol. 28.

Steer, Madeleine, Matthew Cole, Richard C. Thompson, y Penelope K. Lindeque. 2017. “Microplastic Ingestion in Fish Larvae in the Western English Channel.” *Environmental Pollution* 226:250–59. doi: 10.1016/j.envpol.2017.03.062.

Tejada-Tejada, Pamela, Yaset Rodríguez-Rodríguez, Luis Enrique Rodríguez de Francisco, Omar Paíno-Perdomo, y Carlos José Boluda. 2021. “Lead, Chromium, Nickel, Copper and Zinc Levels in Sargassum Species Reached the Coasts of Dominican Republic during 2019: A Preliminary Evaluation for the Use of Algal Biomass as Fertilizer and Animal Feeding.” *Tecnología y Ciencias Del Agua* 12(3). doi: 10.24850/J-TYCA-2021-03-04.

Valmont de Bomare, J. C. (1764). *Dictionnaire raisonné universal d’histoire naturelle*.

van Tussenbroek, Brigitta I., Héctor A. Hernández Arana, Rosa E. Rodríguez-Martínez, Julio Espinoza-Avalos, Hazel M. Canizales-Flores, Carlos E. González-Godoy, M. Guadalupe Barba-Santos, Alejandro Vega-Zepeda, y Ligia Collado-Vides. 2017. “Severe Impacts of Brown Tides Caused by Sargassum Spp. on near-

Shore Caribbean Seagrass Communities.” *Marine Pollution Bulletin* 122(1–2):272–81. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.06.057.

Unidad Académica de Sistemas Arrecifales Puerto Morelos. 2022. “Gráficas de Datos Promedio Mensuales Puerto Morelos, Quintana Roo. México 2017- 2022.” Retrieved July 19, 2022 (https://sammo.icmyl.unam.mx/sammo_graf_mrl.php).

Wang, Mengqiu, Chuanmin Hu, Brian B. Barnes, Gary Mitchum, Brian Lapointe, y Joseph P. Montoya. 2019. “The Great Atlantic Sargassum Belt.” *Science* 365(6448):83–87. doi: 10.1126/science.aaw7912.

Welch, B. L. 1938. “The Significance of the Difference Between Two Means When the Population Variances Are Unequal.” *Biometrika* 29(3/4):350. doi: 10.2307/2332010.

Williams, Amy, y Rusty Feagin. 2010. “Sargassum as a Natural Solution to Enhance Dune Plant Growth.” *Environmental Management* 46(5):738–47. doi: 10.1007/s00267-010-9558-3.

Witherington, B., S. Hirma, y R. Hardy. 2012. “Young Sea Turtles of the Pelagic Sargassum-Dominated Drift Community: Habitat Use, Population Density, and Threats.” *Marine Ecology Progress Series* 463:1–22. doi: 10.3354/meps09970.

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.

Yang, Ling, Yulan Zhang, Shichang Kang, Zhaoqing Wang y Chenxi Wu. 2021. “Microplastics in Freshwater Sediment: A Review on Methods, Occurrence, and Sources.” *Science of The Total Environment* 754:141948. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141948.

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.

ANEXOS

ANEXO 1. ESTANDARIZACIÓN DE METODOLOGÍA

Se probaron distintos métodos de procesamiento del sargazo para facilitar la obtención y observación de los microplásticos. Para realizar las pruebas de procesamiento, se utilizó una muestra “ensayo” colectada el 29 de septiembre del 2020 en altamar en el municipio Benito Juárez de Quintana Roo, México. Con el fin de eliminar la materia orgánica que impide la visualización de los microplásticos se utilizaron diferentes métodos digestivos:

1. Se realizó un proceso de digestión con peróxido de hidrogeno, solución altamente oxidante. Se ejecutaron 3 pruebas iniciales con concentraciones de 7, 15 y 22 % con agua destilada, se dejaron en reposo a temperatura ambiente por 48 horas. Las pruebas con H₂O₂ mostraron una disminución de la materia orgánica después de las 48 h presentando una tonalidad clara amarillenta (ilustración 3 A y B). La prueba que presentó mejor digestión fue con una concentración de 22%. De esta forma se lograron identificar microfibras sobre la fronda de sargazo (Fig. 22 C, D y E).

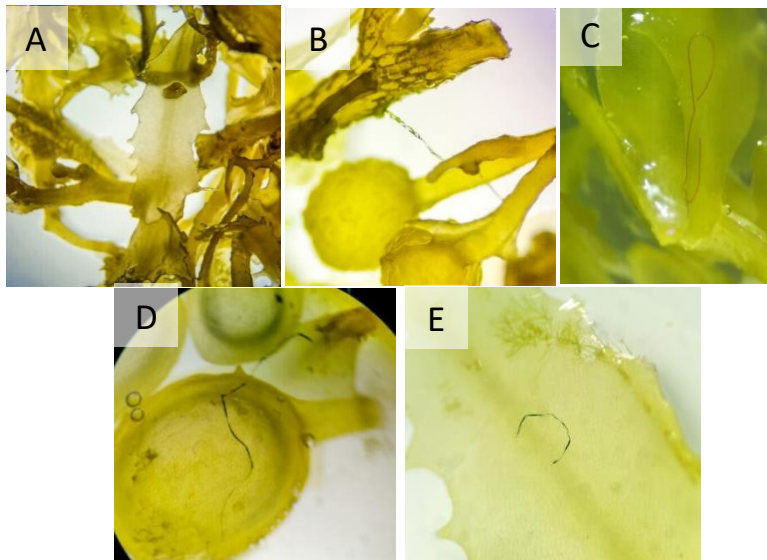


Figura 22. Sargazo observado a través del microscopio óptico. A y B fronda procesada con materia orgánica eliminada. C, D y E microfibras observadas sobre sargazo procesado.

2. Por otro lado, se utilizó hidróxido de sodio como una base fuerte para la eliminación de la materia orgánica. Se colocó 10 g de sargazo en un vaso de precipitado, se vertió 100 ml de agua destilada, se dejó en agitación en una parrilla magnética y posteriormente se le agregó 10 g de NaOH. Se dejó a temperatura ambiente en agitación media durante una hora, al no observar ningún cambio aparente, se retiró la solución y se agregó 40 ml de H_2O_2 al 30%, se dejó en reposo a temperatura ambiente por 48 horas. El sargazo rápidamente se tornó amarillo claro transparente y comenzó a espumar como se observa en la figura 23. Se dejó en reposo a temperatura ambiente durante 48 horas.



Figura 23. Sargazo tratado con hidróxido de sodio y posteriormente con peróxido de hidrógeno.

3. Con el fin de desintegrar el sargazo para obtener una solución líquida, se continuó procesando una muestra de sargazo previamente tratada con H_2O_2 al 20%. A 10 g de este sargazo se le agregó 100 ml de agua de llave filtrada y 10 ml de ácido clorhídrico HCL, se dejó en agitación magnética media por 10 minutos. más tarde la fronda tomó una tonalidad verde oscuro traslucido (Fig. 24).



Figura 24. Sargazo tratado con hidróxido de sodio y posteriormente con ácido clorhídrico.

4. Posteriormente continué con las pruebas con peróxido de hidrógeno, ahora con agitación y calor. Tomé 10 g de sargazo sin previo tratamiento, agregué 80 ml de peróxido de hidrógeno al 30%, lo dejé en agitación nivel 6 a 65°C por 48 horas. Se tornó transparente, la materia orgánica fue removida en su totalidad (Fig. 25).



Figura 25. Sargazo tratado con peróxido de hidrógeno colocado a 65°C en agitación por 48 h.

5. Coloqué 50 g de sargazo en un matraz, agregué peróxido de hidrogeno al 13% y lo dejé en agitación nivel 6 a 65°C por 94 horas. Se encontró totalmente líquida, con baja viscosidad, sin sólidos aparentes, alta turbidez, con una coloración blanca y ligeramente verdosa como se muestra en la figura 26. Esta muestra se pasó por un filtro para separar los posibles microplásticos, sin embargo, no logró pasar con facilidad el líquido a través del filtro por lo que se optó por analizar la muestra sin desintegrar la fronda de sargazo haciendo la selección de microplásticos de forma manual.



Figura 26. Sargazo tratado con peróxido de hidrógeno colocado a 65°C en agitación por 94 h.

ANEXO 2. DATOS

Tabla 6. Cantidad, forma y color de microplásticos encontrados en las muestras

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Febrero	A	L	Transparente	Fibra	31
Febrero	A	L	Azul	Fibra	9
Febrero	A	L	Negro	Fibra	18
Febrero	A	L	Negro	Fragmento	1
Febrero	A	L	Rojo	Fibra	3
Febrero	A	L	Multicolor	Fibra	5
Febrero	A	F	Transparente	Fibra	1
Febrero	A	F	Azul	Fibra	3
Febrero	A	F	Negro	Fibra	6
Febrero	A	F	Otros	Fragmento	1
Marzo	A	L	Transparente	Fibra	35
Marzo	A	L	Azul	Fibra	8
Marzo	A	L	Negro	Fibra	1
Marzo	A	L	Rojo	Fibra	3
Marzo	A	L	Otros	Fibra	2
Marzo	A	F	Transparente	Fibra	1
Marzo	A	F	Azul	Fibra	8
Marzo	A	F	Negro	Fibra	6
Marzo	A	F	Multicolor	Fibra	1
Marzo	B	L	Transparente	Fibra	18
Marzo	B	L	Azul	Fibra	6
Marzo	B	L	Negro	Fibra	1
Marzo	B	L	Negro	Fragmento	4
Marzo	B	L	Rojo	Fibra	1
Marzo	B	L	Otros	Fibra	1
Marzo	B	F	Transparente	Fibra	3
Marzo	B	F	Azul	Fibra	4
Marzo	B	F	Negro	Fibra	7
Marzo	B	F	Negro	Fragmento	7
Marzo	B	F	Negro	Esfera	1
Marzo	B	F	Rojo	Fibra	1
Marzo	B	F	Multicolor	Fibra	2
Marzo	B	F	Otros	Fibra	2
Marzo	C	L	Transparente	Fibra	26
Marzo	C	L	Azul	Fibra	6
Marzo	C	L	Negro	Fibra	7
Marzo	C	L	Negro	Fragmento	1
Marzo	C	L	Rojo	Fibra	2
Marzo	C	L	Multicolor	Fibra	1

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Marzo	C	L	Otros	Fibra	1
Marzo	C	F	Azul	Fibra	3
Marzo	C	F	Negro	Fibra	3
Marzo	C	F	Negro	Fragmento	1
Marzo	C	F	Rojo	Fibra	1
Abril	A	L	Transparente	Fibra	24
Abril	A	L	Azul	Fibra	10
Abril	A	L	Azul	Fragmento	1
Abril	A	L	Negro	Fibra	5
Abril	A	L	Rojo	Fragmento	1
Abril	A	L	Otros	Fibra	3
Abril	A	F	Transparente	Fibra	3
Abril	A	F	Azul	Fibra	8
Abril	A	F	Negro	Fibra	8
Abril	A	F	Rojo	Fibra	1
Abril	A	F	Multicolor	Fibra	2
Abril	A	F	Otros	Fibra	1
Abril	B	L	Transparente	Fibra	39
Abril	B	L	Azul	Fibra	10
Abril	B	L	Azul	Fragmento	1
Abril	B	L	Negro	Fibra	11
Abril	B	L	Rojo	Fibra	4
Abril	B	L	Multicolor	Fibra	9
Abril	B	F	Transparente	Fibra	2
Abril	B	F	Azul	Fibra	15
Abril	B	F	Negro	Fibra	5
Abril	B	F	Rojo	Fibra	1
Abril	B	F	Multicolor	Fibra	1
Abril	C	L	Transparente	Fibra	16
Abril	C	L	Azul	Fibra	8
Abril	C	L	Negro	Fibra	4
Abril	C	L	Rojo	Fibra	4
Abril	C	L	Multicolor	Fibra	2
Abril	C	L	Multicolor	Film	1
Abril	C	F	Transparente	Fibra	2
Abril	C	F	Azul	Fibra	16
Abril	C	F	Negro	Fibra	9
Abril	C	F	Rojo	Fibra	2
Abril	C	F	Otros	Fibra	1
Mayo	D	L	Transparente	Fibra	11
Mayo	D	L	Azul	Fibra	1
Mayo	D	L	Azul	Fragmento	2

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Mayo	D	L	Negro	Fibra	4
Mayo	D	L	Negro	Fragmento	2
Mayo	D	L	Rojo	Fibra	1
Mayo	D	F	Azul	Fibra	5
Mayo	D	F	Negro	Fibra	3
Mayo	D	F	Rojo	Fibra	1
Mayo	D	F	Multicolor	Fibra	1
Mayo	E	L	Transparente	Fibra	9
Mayo	E	L	Azul	Fibra	6
Mayo	E	L	Negro	Fibra	3
Mayo	E	L	Negro	Fragmento	1
Mayo	E	L	Rojo	Fibra	1
Mayo	E	F	Transparente	Fibra	1
Mayo	E	F	Negro	Fibra	2
Mayo	E	F	Rojo	Fibra	2
Mayo	E	F	Multicolor	Fibra	1
Mayo	F	L	Transparente	Fibra	7
Mayo	F	L	Azul	Fibra	2
Mayo	F	L	Negro	Fibra	4
Mayo	F	L	Multicolor	Fibra	2
Mayo	F	F	Azul	Fibra	1
Mayo	F	F	Negro	Fibra	4
Mayo	F	F	Rojo	Fibra	1
Junio	D	L	Transparente	Fibra	4
Junio	D	L	Azul	Fibra	2
Junio	D	L	Negro	Fibra	1
Junio	D	L	Negro	Fragmento	1
Junio	D	L	Otros	Fibra	1
Junio	D	F	Transparente	Fibra	1
Junio	D	F	Azul	Fibra	4
Junio	D	F	Negro	Fibra	3
Junio	D	F	Negro	Fragmento	1
Junio	D	F	Rojo	Fibra	3
Junio	E	L	Transparente	Fibra	3
Junio	E	L	Azul	Fibra	3
Junio	E	L	Negro	Fibra	1
Junio	E	L	Rojo	Fibra	1
Junio	E	F	Transparente	Fibra	3
Junio	E	F	Azul	Fibra	2
Junio	E	F	Negro	Fibra	1
Junio	E	F	Rojo	Fibra	1
Junio	E	F	Multicolor	Fibra	1

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Junio	F	L	Transparente	Fibra	5
Junio	F	L	Azul	Fibra	1
Junio	F	L	Negro	Fibra	2
Junio	F	L	Multicolor	Fibra	1
Junio	F	L	Multicolor	Film	1
Junio	F	F	Transparente	Fibra	1
Junio	F	F	Azul	Fibra	2
Junio	F	F	Negro	Fibra	1
Junio	F	F	Rojo	Fibra	1
Junio	F	F	Multicolor	Fibra	1
Julio	D	L	Transparente	Fibra	12
Julio	D	L	Azul	Fibra	3
Julio	D	L	Negro	Fibra	6
Julio	D	L	Negro	Fragmento	1
Julio	D	L	Rojo	Fibra	2
Julio	D	L	Otros	Fragmento	2
Julio	D	F	Transparente	Fibra	2
Julio	D	F	Azul	Fibra	2
Julio	D	F	Negro	Fibra	2
Julio	E	L	Transparente	Fibra	9
Julio	E	L	Azul	Fibra	5
Julio	E	L	Azul	Fragmento	5
Julio	E	L	Negro	Fibra	13
Julio	E	F	Azul	Fibra	6
Julio	E	F	Negro	Fibra	12
Julio	E	F	Rojo	Fibra	2
Julio	E	F	Otros	Fibra	2
Julio	F	L	Transparente	Fibra	5
Julio	F	L	Azul	Fibra	3
Julio	F	L	Negro	Fibra	9
Julio	F	L	Rojo	Fibra	1
Julio	F	L	Multicolor	Film	1
Julio	F	F	Azul	Fibra	8
Julio	F	F	Negro	Fibra	4
Julio	F	F	Rojo	Fibra	1
Agosto	D	L	Transparente	Fibra	12
Agosto	D	L	Azul	Fibra	9
Agosto	D	L	Azul	Fragmento	1
Agosto	D	L	Negro	Fibra	5
Agosto	D	L	Rojo	Fibra	1
Agosto	D	L	Rojo	Fragmento	1
Agosto	D	F	Azul	Fibra	3

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Agosto	D	F	Azul	Fragmento	1
Agosto	D	F	Negro	Fibra	2
Agosto	D	F	Rojo	Fibra	1
Agosto	D	F	Otros	Fibra	1
Agosto	E	L	Transparente	Fibra	12
Agosto	E	L	Azul	Fibra	4
Agosto	E	L	Azul	Fragmento	1
Agosto	E	L	Negro	Fibra	3
Agosto	E	L	Negro	Fragmento	3
Agosto	E	L	Rojo	Fibra	1
Agosto	E	L	Multicolor	Fibra	1
Agosto	E	F	Transparente	Fibra	1
Agosto	E	F	Azul	Fibra	5
Agosto	E	F	Negro	Fibra	3
Agosto	F	L	Transparente	Fibra	5
Agosto	F	L	Azul	Fibra	2
Agosto	F	L	Azul	Fragmento	1
Agosto	F	L	Negro	Fibra	4
Agosto	F	L	Negro	Fragmento	1
Agosto	F	L	Rojo	Fibra	1
Agosto	F	F	Transparente	Fibra	4
Agosto	F	F	Azul	Fibra	6
Agosto	F	F	Negro	Fibra	3
Agosto	F	F	Rojo	Fibra	1
Septiembre	D	L	Transparente	Fibra	11
Septiembre	D	L	Azul	Fibra	3
Septiembre	D	L	Azul	Film	1
Septiembre	D	L	Negro	Fibra	2
Septiembre	D	L	Otros	Fibra	2
Septiembre	D	F	Transparente	Fibra	4
Septiembre	D	F	Azul	Fibra	9
Septiembre	D	F	Negro	Fibra	17
Septiembre	D	F	Rojo	Fibra	2
Septiembre	D	F	Otros	Fragmento	1
Septiembre	D	F	Otros	Film	1
Septiembre	E	L	Transparente	Fibra	5
Septiembre	E	L	Azul	Fibra	2
Septiembre	E	L	Negro	Fibra	4
Septiembre	E	L	Rojo	Fibra	1
Septiembre	E	F	Transparente	Fibra	1
Septiembre	E	F	Azul	Fibra	13
Septiembre	E	F	Negro	Fibra	33

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Septiembre	E	F	Rojo	Fibra	9
Septiembre	E	F	Multicolor	Fibra	1
Septiembre	E	F	Otros	Fibra	3
Septiembre	F	L	Transparente	Fibra	8
Septiembre	F	L	Azul	Fibra	1
Septiembre	F	L	Negro	Fibra	2
Septiembre	F	L	Rojo	Fibra	2
Septiembre	F	F	Azul	Fibra	9
Septiembre	F	F	Azul	Film	1
Septiembre	F	F	Negro	Fibra	14
Septiembre	F	F	Multicolor	Fibra	1
Octubre	D	L	Transparente	Fibra	1
Octubre	D	L	Negro	Fragmento	3
Octubre	D	L	Multicolor	Fragmento	1
Octubre	D	F	Transparente	Fibra	1
Octubre	D	F	Azul	Fibra	2
Octubre	D	F	Negro	Fibra	5
Octubre	D	F	Negro	Fragmento	10
Octubre	E	L	Negro	Fibra	1
Octubre	E	L	Negro	Fragmento	3
Octubre	E	F	Azul	Fibra	1
Octubre	E	F	Negro	Fibra	4
Octubre	E	F	Negro	Fragmento	4
Octubre	E	F	Rojo	Fibra	3
Octubre	E	F	Multicolor	Fibra	1
Octubre	F	L	Transparente	Fibra	2
Octubre	F	L	Azul	Fibra	2
Octubre	F	L	Negro	Fibra	2
Octubre	F	L	Negro	Fragmento	9
Octubre	F	F	Azul	Fibra	4
Octubre	F	F	Negro	Fibra	7
Octubre	F	F	Negro	Fragmento	9
Enero	D	L	Transparente	Fibra	1
Enero	D	L	Negro	Fragmento	1
Enero	D	F	Transparente	Fibra	1
Enero	D	F	Azul	Fibra	5
Enero	D	F	Negro	Fibra	8
Enero	D	F	Negro	Fragmento	3
Enero	D	F	Multicolor	Fibra	1
Enero	E	L	Transparente	Fibra	3
Enero	E	L	Azul	Fibra	3
Enero	E	L	Negro	Fibra	1

MES	MUESTRA	TIPO	COLOR	FORMA	CANTIDAD
Enero	E	L	Negro	Fragmento	1
Enero	E	F	Transparente	Fibra	4
Enero	E	F	Azul	Fibra	6
Enero	E	F	Negro	Fibra	3
Enero	E	F	Negro	Fragmento	1
Enero	E	F	Rojo	Fibra	2
Enero	F	L	Transparente	Fibra	5
Enero	F	L	Azul	Fibra	2
Enero	F	F	Transparente	Fibra	1
Enero	F	F	Transparente	Fragmento	1
Enero	F	F	Azul	Fibra	2
Enero	F	F	Negro	Fibra	6
Enero	F	F	Negro	Fragmento	1
Enero	F	F	Rojo	Fibra	5
Enero	F	F	Multicolor	Fibra	2
Enero	F	F	Otros	Fibra	1

Las muestras A, B y C se congelaron al tomarlas (húmedas) y las muestras D, E y F se secaron al sol posterior a la toma.

El tipo L se refiere al líquido de la muestra y tipo F a la fronda.