TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

TEMA

Microplásticos en agua y sedimentos de ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE: LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

PRESENTA

Diana Estrella Cabrera Landero

ASESOR INTERNO:

Dr. Sergio Cohuo Durán

ASESOR EXTERNO:

MMZC. Plutarco Hernández Hernández

Chetumal, Quintana Roo a 5 de febrero de 2026

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios, por permitirme concluir esta etapa universitaria, por guiarme, darme las fuerzas para lograrlo y por escucharme cada vez que se lo pedí. Por colocarme a las personas correctas en el camino que hicieron que esta etapa fuera más llevadera.

A mi mamá Maria Guadalupe Landero de la Cruz y a mi papá Ermilo Cabrera Quen que han puesto toda su confianza en mí y me han apoyado incondicionalmente, cuando les dije lo que quería estudiar no dudaron en apoyarme. Han estado presentes en todo este proceso, en mi desarrollo personal y académico, me han alentado a no rendirme a pesar de las dificultades. Me han dado absolutamente todo, se han esforzado trabajando y han sacrificado muchas cosas para darme lo mejor. Mi papá que se ha tenido que ir lejos (Canadá) para trabajar y que no nos faltara nada a mis hermanos y a mí. Y mi mamá que se ha quedado cuidándonos y enseñándonos que debemos ser agradecidos.

A mis hermanos William y Alonso por creer en mí y motivarme a seguir adelante, por ser esa fuente de inspiración para culminar esta etapa de mi vida. Por hacer un excelente papel de hermanos mayores y cuidarme en todo momento.

También agradezco a mis asesores, el Dr. Sergio Cohuo y el MMZC. Plutarco Hernández por su guía y apoyo para la realización de este trabajo. Por su paciencia y enseñanzas, por estar siempre dispuestos a ayudarme en todo lo que necesitaba y resolver las dudas que surgían. Además, quiero agradecer por su financiamiento a mi proyecto y por el tiempo que le dedicaron.

De igual manera, expreso mi agradecimiento al Instituto Tecnológico de Chetumal por brindarme las instalaciones (el laboratorio de Microbiología) y el equipo necesario para la realización de este estudio. Además por su formación, por darme las herramientas y conocimiento para poder realizar este proyecto.

También quiero agradecer al Dr. Leopoldo Cutz Pool porque me motivo a seguir adelante con el tema de mi proyecto y me aconsejó, me proporcionó literatura para la realización de esta tesis, y siempre estuvo al pendiente a cualquier duda que me surgiera.

Agradezco igual al M. en C. Héctor Ortiz por prestarme un espacio en el laboratorio de zoología y considerarme miembro de su laboratorio.

A mis amigos por estar presentes en toda esta etapa, por apoyarme en mis decisiones. A Yazmin y Suemi, que me conocen desde hace muchos años, que han visto mi evolución personal y

académica, y se han alegrado por cada uno de mis logros. A Luis por ser mi mejor amigo y mi confidente, que siempre confió en que yo lo lograría, me escuchó en los momentos más difíciles, me aconsejó y jamás me juzgó, me motivó a no rendirme.

A Ingrid y Karla que se convirtieron en mis mejores amigas, casi mis hermanas, quien iba a pensar que a pesar de la diferencia de edades, diferencia de carreras y que cada una vivía en lugares diferentes en algún momento coincidiríamos en un mismo cuarto, nuestra tercera casa; el albergue estudiantil (siendo la primera la casa donde crecimos y la segunda la universidad), gracias por esos momentos de chisme y risas, por las cenas juntas, por las compras de señora, por esas pláticas profundas, por sus motivaciones y por hacer que la lejanía a nuestra hogar no se sintiera mucho, y gracias porque a pesar de que cada quien está en diferentes momentos de la vida, seguimos en contacto y seguimos alegrándonos por los logros de la otra.

A Cristina que aunque en este momento ya no hablemos mucho, fue mi primera amiga de la universidad y a su mamá por llevarme a mi cuarto cuando salíamos tarde de clases y no dejó que me fuera sola en la noche.

A Dariana, Shaila y Wilbert que han sido mis amigos desde el inicio de la carrera, por todas esas veces que hicimos equipo, nos apoyamos, compartimos momentos agradables. Y a mis otros amigos que hice en el transcurso de la carrera, a Daniel y Lenny que aunque al principio no hablábamos mucho, ahora son una parte importante en mi vida, me han escuchado y me han apoyado en momentos difíciles, me han motivado en todo momento. A Esmeralda que nunca pensé que nos llevaríamos tan bien, por ser tan diferentes, pero a pesar de eso, se convirtió en mi amiga, ha confiado en mi y me ha demostrado que puedo confiar en ella. Y finalmente pero no menos importante a Diana, Litzi, Abril, Cristopher, Victoria y José Miguel que también han sido buenos amigos, me han apoyado. Con el tiempo hemos ido construyendo un grupo de amigos, hemos compartido risas, lagrimas, viajes e hicieron que los años en la carrera pasaran más rápido. Gracias por hacerse mis amigos y por apoyarme todo este tiempo.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Ermilo Cabrera y Maria Guadalupe Landero que han estado apoyándome en toda mi carrera universitaria y en todo el proceso de realización de mi tesis, ellos jamás han dudado, y han confiado en mí. Han influido para que yo sea una mejor persona, para que no me rinda y logre todas mis metas. Que a pesar de los sacrificios que han tenido que hacer siguen apoyándome en todas mis decisiones. Me han enseñado que a pesar de todos los obstáculos que se han presentado y que puedan presentarse en un futuro, la vida sigue y siempre hay una salida. Me han demostrado que se puede ser buenos padres a pesar de que ellos no tuvieron la misma suerte, me han criado en un ambiente lleno de amor y confianza. Ellos han sido siempre mi motivación para seguir esforzándome en lograr todos mis objetivos y me han enseñado a ser agradecida con lo que tengo.

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Chetumal
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica

SECCIÓN: DEPTO. ING. QUÍM. Y BIOQ.
OFICIO No 0066-DT-2025

Chetumal, Q. Roo., 09/Febrero/2025

ASUNTO: Liberación de Proyecto para Titulación Integral

LIC. CECILIA LORÍA TZAB
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación integral:

a) Nombre del Egresado:	DIANA ESTRELLA CABRERA LANDERO
b)Carrera:	LICENCIATURA EN BIOLOGÍA
c) N° de control	21390572
d)Nombre del proyecto	MICROPLÁSTICOS EN AGUA Y SEDIMENTOS DE AMBIENTES ACUÁTICOS CONTINENTALES DEL SUR DE QUINTANA ROO.
d)Producto	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS)

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica•
Cultura, Ciencia y Tecnología para la Superación de México•

EDUCACIÓN | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

M.C. ALEJANDRO MEDINA QUEJ
JEFE DEL DEPTO. DE INGENERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA.

DR. SERGIO COHUO DURAN **ASESOR**	**DR. LEOPOLDO QUERUBÍN CUTZ POOL** **REVISOR**	**DRA. NALLELY A. AGUILAR CASTRO** **REVISOR**

C.c.p. Expediente



2026 año de Margarita Maza





SISTEMA DE GESTIÓN
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
BICERT, S.C.





Resumen

La contaminación plástica es un problema global debido a su lenta degradación, y fragmentación en microplásticos que se acumulan en sistemas acuáticos. En las lagunas de la Península de Yucatán se asume la presencia de microplásticos, pero poco se conoce de la magnitud de la contaminación. El estudio tuvo por objetivo evaluar la presencia de microplásticos en agua y sedimento superficial de cuatro ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo: La Sabana, Bacalar, El Ocho, y Lagartija. En cada laguna se seleccionaron tres sitios de muestreo, donde se filtró agua superficial (100 L) y recolectó sedimento superficial (500 gr). Los resultados mostraron presencia de microplásticos en el agua y sedimento, con un promedio entre 1.25-2.12 MPs/L y 26-216 MPs/kg respectivamente, del cual las fibras y los colores azul y negro fueron predominantes. Se realizó inicialmente una prueba de normalidad Shapiro-Wilk. Posteriormente se realizó el análisis Kruskal-Wallis ($p>0.05$), que indicó que no hay diferencias significativas entre la concentración media de microplástico en las lagunas tanto en agua (Forma: $p=0.93$; y color: $p=0.89$) como en sedimentos (Forma: $p=0.53$, y color: $p=0.1$), lo que demuestra la homogeneidad de la distribución de microplásticos. Para determinar si existe correlación entre el tamaño poblacional y la abundancia de microplásticos se realizó una correlación de Spearman, encontrándose que no hay correlación significativa entre ellos (agua: $p= 0.688$ y sedimento: $p= 0.149$). Se demostró que las concentraciones medias de microplásticos registradas en el agua superficial de las lagunas analizadas fueron similares a las reportadas a nivel mundial (1.9 MPs/L), en contraste, las concentraciones observadas en el sedimento superficial resultaron inferiores a los valores globales (359 MPs/kg), lo que sugiere una baja acumulación de microplásticos en el sedimento. Se concluye que existe presencia de microplásticos en las lagunas analizadas y que el tamaño de la población circundante de los sistemas no contribuye en un aumento sustancial en la cantidad de microplásticos.

Palabras clave: microplástico, contaminación, ecosistemas acuáticos, salud ambiental

Abstract

Plastic pollution is a global issue due to its slow degradation and fragmentation into microplastics, which accumulate in aquatic systems. Usually, the presence of microplastics is assumed in the lakes, but little is known about the extent of the pollution in lakes of the Yucatan Peninsula. This study aimed to assess the presence of microplastics in surface water and sediments from four inland aquatic environments in southern Quintana Roo: La Sabana, Bacalar, El Ocho, and Lagartija. In each lake, three sampling sites were selected, where surface water (100 L) was filtered and surface sediment (500 g) was collected. The results showed the presence of microplastics in the water and sediment, with averages between 1.25–2.12 MPs/L and 26–216 MPs/kg, respectively, with fibers and blue and black colors being predominant. A Shapiro-Wilk normality test was initially performed. Subsequently, a Kruskal-Wallis test ($p > 0.05$) was conducted, indicating no significant differences in the mean microplastic concentration in the lakes, either in the water (Shape: $p=0.93$; y color: $p=0.89$) or the sediment (Shape: $p=0.53$, y color: $p=0.1$),, demonstrating the homogeneity of the microplastic distribution. To determine if there is a correlation between population size and microplastic abundance, a Spearman correlation was performed, revealing no significant correlation between them (water: $p = 0.688$ and sediment: $p = 0.149$). Prior to this, a Shapiro-Wilk normality test was conducted, revealing no significant correlation between the two. The average microplastic concentrations recorded in the surface water of the analyzed lakes were similar to those reported globally (1.9 MPs/L). In contrast, the concentrations observed in the surface sediment were lower than the global values (359 MPs/kg), suggesting a low accumulation of microplastics in the sediment. It is concluded that microplastics are present in the analyzed lakes and that the size of the surrounding population does not contribute to a substantial increase in the amount of microplastics.

Keywords: microplastic, pollution, aquatic ecosystem, environmental health

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
2. ANTECEDENTES 4
3. MARCO TEÓRICO 8
3.1. MICROPLÁSTICOS 8
3.2. PRIMEROS REGISTROS DE PARTÍCULAS PLÁSTICAS EN SEDIMENTOS DE SISTEMAS ACUÁTICOS. 9
3.3. ORIGEN Y CLASIFICACIÓN DE MICROPLÁSTICOS 9
3.4. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MICROPLÁSTICOS 10
3.5. RESISTENCIA Y DEGRADACIÓN DE PLÁSTICOS 10
3.6. PERMANENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN LA COLUMNA DE AGUA Y EN EL SEDIMENTO 11
5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 13
6. OBJETIVOS 13
6.1. OBJETIVO GENERAL 13
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13
7. MATERIALES Y MÉTODOS 14
7.1. ÁREA DE ESTUDIO 14
7.2. TRABAJO DE CAMPO 16
7.3. TRABAJO DE LABORATORIO 16
7.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS 17
8. RESULTADOS 19
8.1. AGUA SUPERFICIAL 20
8.2. SEDIMENTO 25
9. DISCUSIÓN 31
9.1. AGUA SUPERFICIAL 32
9.2. SEDIMENTO SUPERFICIAL 33
10. CONCLUSIÓN 37
11. REFERENCIAS 38
12. ANEXOS 43

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO 15
FIGURA 2. FOTOGRAFÍAS. A. FIBRAS AZULES. B. FIBRA ROJA Y FIBRA VERDE. C. FRAGMENTO ROJO 20
FIGURA 3. PORCENTAJE DE MICROPLÁSTICOS EN EL AGUA DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 23
FIGURA 4. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS POR FORMA EN MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL RECOLECTADAS EN LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 24
FIGURA 5. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS POR COLOR EN MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL RECOLECTADAS EN LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 25
FIGURA 6. PORCENTAJE DE MICROPLÁSTICOS EN EL SEDIMENTO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 28
FIGURA 7. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS POR FORMA EN MUESTRAS DE SEDIMENTO SUPERFICIAL RECOLECTADAS EN LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 29
FIGURA 8. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS POR COLOR EN MUESTRAS DE SEDIMENTO SUPERFICIAL RECOLECTADAS EN LA SABANA, BACALAR, EL OCHO, LAGARTIJA 30
FIGURA 9. A. FIBRA AZUL DECOLORÁNDOSE. B. FIBRAS AZULES. C. FIBRA ROJA. D. FIBRA VERDE 44
FIGURA 10. A. FRAGMENTO ROJO. B. HAZ DE FIBRAS VERDES. C. FRAGMENTOS. D. FRAGMENTO AMARILLO 45
FIGURA 11. A. FRASCOS DE VIDRIO CON SEDIMENTO. B. FRASCOS DE VIDRIO CON AGUA 45

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS MICROPLÁSTICOS 8
TABLA 2. COMPARACIÓN ENTRE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA DONDE EL P VALOR NO REFLEJA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS SEGÚN EL ANÁLISIS KRUSKAL WALLIS ... 19
TABLA 3. CORRELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO POBLACIONAL Y LA ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS SEGÚN EL ANÁLISIS DE SPEARMAN 19
TABLA 4. PROMEDIO DE MICROPLÁSTICOS EN AGUA Y SEDIMENTO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 20
TABLA 5. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS CLASIFICADOS SEGÚN SU FORMA EN 100 L DE AGUA SUPERFICIAL POR CADA SITIO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 21
TABLA 6. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS CLASIFICADOS SEGÚN SU COLOR EN 100 L DE AGUA SUPERFICIAL POR CADA SITIO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO, LAGARTIJA 22
TABLA 7. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS CLASIFICADOS SEGÚN SU FORMA EN 500 G DE SEDIMENTO SUPERFICIAL POR CADA SITIO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 26
TABLA 8. NÚMERO DE MICROPLÁSTICOS CLASIFICADOS SEGÚN SU COLOR EN 500 G DE SEDIMENTO SUPERFICIAL POR CADA SITIO DE LA SABANA, BACALAR, EL OCHO Y LAGARTIJA 27
TABLA 9. TAMAÑO POBLACIONAL (DATOS TOMADOS DE INEGI) Y LA ABUNDANCIA DE MICROPLÁSTICOS EN AGUA Y SEDIMENTO EN LAS LAGUNAS 43
TABLA 10. CANTIDAD DE MICROPLÁSTICOS EN CADA LAGUNA POR FORMA EN AGUA 43
TABLA 11. CANTIDAD DE MICROPLÁSTICOS EN CADA LAGUNA POR COLOR EN AGUA 43
TABLA 12. CANTIDAD DE MICROPLÁSTICOS EN CADA LAGUNA POR FORMA EN SEDIMENTO 44
TABLA 13. CANTIDAD DE MICROPLÁSTICOS EN CADA LAGUNA POR COLOR EN SEDIMENTO 44

1. Introducción

La disponibilidad de desechos plásticos y la mala gestión para recuperación, manejo y reciclaje es un problema ambiental actual a nivel global dado que es un contaminante emergente y presenta una degradación lenta, siendo particularmente dañino para los ambientes acuáticos (Jiang et al., 2019). Una de las razones de la disponibilidad de estos compuestos es la actividad industrial, la cual genera grandes volúmenes de plásticos que, tras su uso y disposición inadecuada, ingresan a los ecosistemas terrestres y acuáticos. En el ambiente, estos materiales no se biodegradan fácilmente, sino que se fragmentan en partículas de menor tamaño, las cuales pueden afectar a la biota que sostiene los ecosistemas y transferirse progresivamente a través de las cadenas tróficas (Van Cauwenberghe et al., 2015). Por ello, se inició con el estudio de la contaminación por plásticos en los sistemas acuáticos, principalmente en su forma macro (Ivar do Sul & Costa, 2014). No obstante, recientemente los estudios se han centrado en los microplásticos (MPs), definidos como partículas microscópicas menores a 5 mm, que pueden encontrarse hoy en día en casi todos los ambientes acuáticos (Elias, 2015; Alomar et al., 2016; Blumenröder et al., 2017). La contaminación por microplásticos se considera como el segundo problema más importante de las ciencias ambientales y ecológicas, sólo siendo superado por el cambio climático (Ma et al., 2024). Su estudio ha demostrado que pueden ingresar de manera directa y/o indirecta a los ecosistemas costeros, marinos y terrestres, afectando cualquier ciclo biológico en el cual exista una transferencia de materiales. Los MPs son contaminantes originados a partir de diferentes tipos de productos, compuestos por distintos polímeros químicos (Cera et al., 2020), no son uniformes y son una gama compleja de diferentes colores, formas y tamaños (Botterell et al., 2020). De las formas más destacadas incluyen películas, fragmentos irregulares, fibras y espumas (Acosta González et al., 2022). También pueden clasificarse en primarios y secundarios. Los primarios incluyen las partículas menores a 5 mm liberadas directamente al ambiente por procesos industriales (Cera et al., 2020), que pueden provenir de productos cosméticos (e. g., exfoliantes) y contienen microperlas de polietileno (D'Avignon et al., 2022), así como también, por la elaboración de productos de limpieza para el hogar (Acosta González et al., 2022). Los secundarios resultan de la fragmentación y degradación de plásticos de gran tamaño (macroplásticos), como pueden ser bolsas, botellas, entre otros a partir de procesos de degradación mecánica, fotolítica, física y/o química en el medio marino (Alomar et al., 2016; Ma et al., 2024). Estos procesos ocurren principalmente por

la acción mecánica de las olas, vientos, mareas, fricción con la arena y radiación solar (Acosta González et al., 2022).

Por esta razón, se ha comenzado a implementar estrategias para mitigar las problemáticas de los desechos plásticos (Cole et al., 2011). Si bien algunos desechos plásticos se reciclan, la mayoría termina en vertederos, donde pueden pasar años antes de descomponerse. Dichos desechos plásticos pueden llegar a obstruir las raíces y órganos de plantas y animales, pero también pueden adsorber contaminantes orgánicos en el agua, lo cual aumenta su nivel de contaminación (Ma et al., 2024). Durante la última década se ha revelado que estos contaminantes están ampliamente distribuidos en el medio marino, con el potencial de afectar negativamente a la biota (Cole et al., 2011). La ingestión de partículas plásticas por organismos marinos puede deteriorar el tracto intestinal, limitando su capacidad de digerir alimentos, lo que a su vez reduce el crecimiento, la fecundidad y el rendimiento reproductivo (Sánchez-Campos et al., 2024).

Actualmente, se ha registrado que los organismos acuáticos adquieren y retienen microplásticos dentro de su cuerpo debido a que lo confunden con su alimento. Se ha documentado una mayor cantidad de estudios de microplásticos en vertebrados marinos siendo los peces los más estudiados (Cole et al., 2011; Acosta González et al., 2022). Además, se ha encontrado microplásticos en otras especies, como tortugas, aves marinas, entre otros animales. Por el contrario, en los invertebrados existe un menor número de estudios sobre la presencia de microplásticos en ellos. Se ha descrito que pueden llegar a ser más susceptibles a la contaminación por microplásticos ya que se encuentran en entornos que acumulan y retienen estas partículas (Nel et al., 2018). Por ejemplo, las larvas de mosquitos no picadores (*Chironomus sp.*) se encontraron con las cargas más altas, con 370–1200 partículas/g (D'Avignon et al., 2022).

En los ecosistemas marinos la presencia de microplásticos está mejor evidenciada que en los sistemas de agua dulce, sin embargo, existen estudios que han documentado la presencia de microplásticos en ecosistemas lagunares, los cuales pueden afectar la salud de la vida silvestre y, de manera indirecta, la salud humana a través del uso y consumo del agua, y también mediante la ingestión de organismos acuáticos contaminados como peces (Chico-Ortiz et al., 2020). Las concentraciones de microplásticos en sedimentos de agua dulce llegan al mismo

nivel que en los sedimentos marinos más contaminados en el mundo (D'Avignon et al., 2022). El estudio de las lagunas es importante dado su valor ecológico y económico, ya que sustenta la actividad pesquera, regulan el clima, absorben carbono y ofrecen protección a la biodiversidad. Además, funcionan como áreas de anidación y alimentación para diversas aves nativas y migratorias (Chico-Ortiz et al., 2020; Sánchez-Campos et al., 2024). Asimismo, proporcionan recursos alimenticios y materias primas para la población costera (Sánchez-Campos et al., 2024).

No existe conocimiento sobre la presencia de microplásticos en los sistemas lagunares de Quintana Roo, además hay una carencia de concientización y educación de la comunidad respecto a este tema. La Laguna de Bacalar (LB), La Sabana, Laguna Lagartija y Laguna del Ocho son esenciales sistemas lagunares con una gran importancia ecológica. La LB alcanzó un alto valor económico, lo que causó un gran crecimiento turístico, esto llevó a que en 2006 Bacalar fuera catalogado como Pueblo Mágico (Gómez Pech et al., 2018) aumentando más la urbanización y el turismo, actualmente cuenta con una población aproximada de 12,000 habitantes (INEGI, 2020), lo que ha ocasionado un aumento de contaminación progresivo. Por otro lado, La Sabana se encuentra cerca de la ciudad de Chetumal la cual cuenta con una población aproximada de 100,000 habitantes (INEGI, 2020). Desafortunadamente este sistema lagunar se ha visto afectado por la contaminación debido al crecimiento urbano, evidenciado por la basura acumulada en sus sedimentos y columna de agua (Flores-Rodríguez et al., 2022). Adicionalmente, el manejo deficiente de una planta de tratamiento de aguas residuales que descarga las aguas sin tratar directamente al sistema lagunar. En consecuencia, La Sabana es considerada actualmente el sistema más contaminado del estado de Quintana Roo y es la principal fuente de elementos dañinos como los coliformes fecales, metales pesados, solidos disueltos y nutrientes (Cohuo Durán et al., 2020). En contraste, la Laguna del Ocho y Lagartija se encuentran asociadas a poblaciones cercanas considerablemente menores, estimadas en aproximadamente 1,000 y 10 habitantes (INEGI, 2020), respectivamente, lo que sugiere un menor impacto antropogénico directo. A pesar de ello, estos sistemas han sido menos estudiados, aun cuando desempeñan un papel importante, bridando hábitat para una amplia diversidad de flora y fauna. Todos estos sistemas son importantes ya que brindan diferentes servicios, proveen materias primas de fundamental valor económico, además, ofrecen servicios al ser humano (e.

g., agua potable, riego, transporte, recreación, etc.), así como hábitat para plantas y animales (Baron et al., 2003; Sterner et al., 2020).

Se han encontrado estudios que evidencian la presencia de microplásticos en columnas de agua y sedimentos en lagunas costeras y otros cuerpos dulceacuícolas como el estudio publicado de Sánchez-Campos et al., (2024), esto es alarmante debido a que destacan el impacto de estas partículas contaminantes en los ecosistemas lagunares. Por lo que, se considera que, la Laguna de Bacalar, debido a su alta actividad turística y La Sabana, por su cercanía a la ciudad y presencia de descargas de aguas residuales podrían estar pasando por procesos similares. Por otro lado, la Laguna Lagartija y la Laguna del Ocho al recibir menos impacto antropogénico, se espera que no haya presencia de microplásticos o al menos en un menor número, debido al arrastre de la basura por precipitaciones. Además, la alta presencia de macroplásticos en las orillas de estos sistemas, principalmente de la Sabana, sería un indicador de la existencia de MPs en el agua y sedimento, que podrían estar afectando a los organismos, principalmente aquellos que se alimentan del detritus y partículas de sedimento. Por ello, se desea estudiar la disponibilidad de microplástico en dichos ambientes acuáticos del sur de Quintan Roo.

2. Antecedentes

D'Avignon et al. (2022) destacan el problema que presentan los microplásticos en los sistemas marinos y dulceacuícolas, ya que las partículas alcanzan el mismo número que los organismos planctónicos y tienen la capacidad de adsorber sustancias tóxicas lo que podría afectar a la biota. Por lo tanto, en la Universidad McGill, Montreal realizaron un estudio donde recopilaron artículos de 2010 a 2020 de diferentes países, los cuales presentan evidencia sobre la presencia de microplásticos en invertebrados. Ellos se centraron en las aguas continentales, pero también consideraron datos de ambientes marinos. Sus resultados mostraron que las concentraciones en las aguas continentales superficiales fueron más bajas que en los ambientes estuarinos o marinos. Y en su recopilación de datos encontraron que las larvas de mosquito (*Chironomus sp*.) y los gusanos oligoquetos (*Tubifex tubifex*) tenían las cargas más altas, con 370–1200 partículas/g y 129 ± 65,4 partículas/g, respectivamente. Concluyen que dicha evidencia recopilada sobre la concentración de microplásticos es un parámetro relevante ecológicamente, por ende, debe integrarse dentro de los estudios limnológicos estándar y las evaluaciones de la calidad del agua.

Más tarde, Silburn et al., en 2023 investigaron la distribución de macro, meso, micro plásticos a lo largo de la cuenca del río Belice y el 77,3% de la basura consistían en plástico. El estudio indicó que hay un aumento en la carga de basura a medida que se mueve de la cuenca a la costa. Se determinó la abundancia de microplásticos en los sedimentos del río y en el pez ribereño *Cichlasoma synspilum* (n = 22). En sus resultados encontraron que todas sus muestras de sedimentos contenían microplásticos, con una concentración de 200-6500 partículas por kg de sedimento seco y se mostró que los microplásticos estaban presentes en el 36% de los peces ribereños. Concluyendo que había una gran cantidad de basura en el área estudiada y las concentraciones de microplásticos que encontraron en el sedimento fueron altas.

Kunz et al. (2023) mencionan que la contaminación por plásticos afecta a todos los ecosistemas, sin embargo, no se tiene mucho conocimiento sobre las fuentes y vías. Este estudio relacionó la abundancia de microplásticos y los factores antropogénicos, así como el papel potencial de las alcantarillas de tormenta como vías en los afluentes del río Wu en Taichung, en el centro de Taiwán. Se tomaron muestras de 41 lugares diferentes en áreas urbanas y rurales utilizando una red de manta con un tamaño de malla de 0,3 mm. Los resultados muestran abundancias que van desde 0 pcs/m3 en áreas rurales despobladas hasta 230 pc/m3 en centros urbanos densamente poblados, y están correlacionados positivamente con la densidad de población. Los resultados de este estudio muestran que las correlaciones entre la abundancia de microplásticos y la densidad de población o los patrones de uso de la tierra a lo largo de los gradientes urbano-rurales no son triviales. En conclusión, la ausencia de correlaciones debe considerarse cuidadosamente, ya que las correlaciones existentes podrían estar enmascaradas por otros factores.

Shruti et al. (2019) estudiaron la abundancia, distribución y características (color, morfología, textura) de los MP de la cuenca del río Atoyac, un sistema fluvial altamente urbanizado ubicado en el centro de México. Ellos recolectaron 29 sitios diferentes a lo largo de la cuenca del río Atoyac en cuatro zonas diferentes: río Zahuapan, río Atoyac, zona de confluencia y presa Valsequillo, las muestras se procesaron para la extracción de microplásticos mediante el método de separación por densidad de $ZnCl_2$. Como resultados, el número de MPs en los ríos Zahuapan, Atoyac, zona de confluencia y presa Valsequillo fue de 1633.34±202.56, 1133.33±72.76, 833.33±80.79 y 900±346.12ítemskg−1, respectivamente. Se encontró que la

concentración de MPs es mayor en la sección aguas abajo del río revelando impactos significativos de la densa población y el complejo industrial de la Ciudad de Puebla. Las imágenes de microscopio electrónico de barrido revelaron características de desintegración variables y los espectros de rayos X de energía dispersiva demostraron la presencia de diferentes elementos metálicos en la superficie de los MPs. Se concluye en que hay una amplia distribución de MPs en los sedimentos de la cuenca del río Atoyac, México.

Ramírez-Álvarez et al. (2020) destacan que los microplásticos son una amenaza para los ambientes marinos y de agua dulce. Por ello, investigaron las aguas efluentes de las plantas de tratamiento secundario de aguas residuales (PTAR) en la Bahía de Todos Santos (BTS) como fuentes de MPs. Sus resultados mostraron que todas las matrices analizadas presentaron microplásticos. Los MP de las muestras de agua superficial (n = 18) variaron de 0,01 a 0,70 partículas plásticas/m^3 (pp/m^3). Los fragmentos (47 ± 23 %) y las fibras (47 ± 23 %) fueron las partículas más abundantes encontradas en las muestras de agua superficial. En las muestras de sedimento (n = 11), los MP variaron de 85 a 2494 pp/0,1 m^2. Las muestras de sedimento mostraron fragmentos de 70 ± 19 % y fibras de 28 ± 18 % en promedio. Se identificaron varios polímeros sintéticos (polipropileno, polietileno, polietileno-propileno, cloruro de polivinilo, celofán) y fibras naturales (algodón y madera). Concluyen que, las corrientes superficiales y los parámetros que las modulan son los principales factores que dominan la distribución de MP en aguas superficiales. Mientras que en los sedimentos, parámetros como la batimetría y la distribución granulométrica tienen mayor influencia en su distribución en el medio marino, donde las aguas de efluentes de las PTAR solo contribuyen con MPs a la BST.

Quesadas-Rojas et al., (2021) destacan que existe escasa información sobre la distribución y transporte de microplásticos en lagunas costeras, por lo tanto, proporcionan una primera evaluación en una laguna hipersalina y los factores naturales y antropogénicos que afectan la localización y transporte de microplásticos. En este estudio los autores realizaron la medición de su distribución en sedimentos y la columna de agua en Laguna costera de Río Lagartos en septiembre de 2017 (temporada húmeda) y febrero de 2018 (temporada invernal). Además, analizaron el intercambio de agua y microplásticos océano-laguna en la entrada de la laguna durante ciclos de marea. Sus resultados mostraron una marcada estacionalidad en agentes y fuentes de transporte. Destacan que las concentraciones de microplásticos en verano

estuvieron relacionadas con actividades antropogénicas y en la época de lluvias aumentó el nivel del agua de las lagunas, generando una diferencia de presión lo que provocó que el flujo de agua hipersalina junto con los microplásticos se trasladara hacia el mar. Y registraron que había más presencia de partículas en el reflujo que en la inundación. Concluyen que la variabilidad estacional y de marea son fatores importantes al muestrear microplásticos en lagunas y estuarios costeros.

Para el año 2024, Sánchez-Campos et al., examinaron la contaminación por microplásticos en la laguna de Sontecomapan, un sitio dentro de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, México, que, a pesar de ser un área protegida, enfrenta vulnerabilidad de contaminación por microplásticos. En este estudio analizaron la presencia de microplásticos en agua, sedimento y zooplancton, ellos hicieron la colecta en junio de 2018 y, cuantificaron y clasificaron los microplásticos en fragmentos, fibras y espumas, además los identificaron como acrílico, poliéster y rayón. Los resultados obtenidos mostraron que la concentración media de microplásticos en agua fue de 7,5 ± 5,3 partículas/L. En el sedimento, la concentración media fue de 8,5 ± 12,5 partículas/kg y un máximo de 43 partículas/kg en un brazo lagunar de agua casi estancada. Por último, en el caso del zooplancton se encontraron concentraciones medias en los tres tipos que muestrearon: en copépodos fue de 0,002 ± 0,005 partículas/individuo, luciferidos; 0,011 ± 0,011 partículas/individuo y quetognatos; 0,019 ± 0,016 partículas/individuo. En conclusión, las concentraciones medias de microplásticos en la laguna fue baja, es decir, el grado de contaminación por MPs es bajo, sin embargo, este puede ser una amenaza para la biota si sigue aumentando.

3. Marco teórico

3.1. Microplásticos

El concepto “microplásticos” ha sido empleado para llamar a las pequeñas partículas de plástico observadas inicialmente en agua marina. En septiembre 2008, el taller internacional de investigación sobre la ocurrencia, los efectos y el destino de los desechos marinos, definió a los microplásticos como partículas de plástico menores a 5 mm. La definición no establece un límite mínimo, pero su tamaño está entre 5 mm y 33 μm (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018).

También, el consenso inicial definió a los microplásticos como polímeros sintéticos menores o igual a 5 mm. Las clasificaciones diferencian las partículas de plástico en macro (>1 cm), meso- (1 a <10 mm), micro- (1 a <1000 μm), nano- (1 a <100 nm) y submicrotamaños (100 a < 1000 nm), además, se caracterizan la forma, estructura y composición de las partículas (D’Avignon et al., 2022). Los microplásticos generalmente se clasifican por forma, color, polímero y tamaño.

Tabla 1. Clasificación de los microplásticos

Clasificación	Ejemplo
Forma	Fibra Fragmento Espuma Película Pellets
Color	Azul Negro Transparente Verde Rojo Etc.
Polímero	Polietileno (PE) Polipropileno (PP) Poliestireno (PS)

	Policloruro de vinilo (PVC) Poliéster (PET)

Nota: Elaboración propia. (Información tomada de Acosta González et al., 2022; López Cuevas, 2023; Sánchez-Campos et al., 2024)

3.2. Primeros registros de partículas plásticas en sedimentos de sistemas acuáticos.

Curillo García (2021) menciona que los primeros registros de plásticos en los ambientes acuáticos fueron registrados por Carpenter y Smith, quienes en los 70s publicaron un estudio documentando fragmentos de basura plástica en el océano flotando en la superficie del mar, resaltando la contaminación plástica y el posible impacto en ecosistemas marinos. Sin embargo, no obtuvo la atención suficiente por parte de los científicos, ya que era un problema reciente y no percibieron la magnitud de su impacto. Para los años siguientes, se fueron acumulando datos sobre las consecuencias de dichos contaminantes, la problemática recibió un interés de investigación mayor (Andrady, 2011).

3.3. Origen y clasificación de microplásticos

Los residuos de plásticos se producen en mayor cantidad en los países industrializados mejor desarrollados, por el contrario, los menos desarrollados generan una menor cantidad. Sin embargo, estos plásticos siempre son desechados y presentan un gran riesgo para el medio ambiente (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018). Los plásticos se degradan con el tiempo y se forman lo que conocemos como microplásticos. Estos MPs se originan a partir de dos fuentes, primarios y secundarios. Además de su origen pueden clasificarse por su composición química (polímero): polietileno (e. g., envases, botellas, bolsas y embalajes), poliéster o acrílico (e. g., ropa), polipropileno (e. g., fibras) y poliamidas (e. g., cuerdas) (López Cuevas, 2023). También pueden clasificarse por forma, de las más conocidas son fibras originados a partir de productos domésticos y roturas de redes de pesca; gránulos que provienen de productos de limpieza; esferas provenientes de cosméticos; fragmentos que pueden originarse por macroplásticos como botellas y bolsas; y pellets que son utilizados como materia prima en las industrias para la producción de plásticos. Por último, los MPs también son clasificados por color, de los más comunes incluyen; azul, negro y rojo (Acosta González et al., 2022).

3.4. Características y propiedades de los microplásticos

Los plástico o polímeros son una amplia variedad de materiales orgánicos que tienen un peso molecular elevado, por lo que, son aptos para fabricar productos industriales, farmacéuticos y alimenticios. Los plásticos son de origen sintético que resultan a partir de diferentes procesos químicos, son derivados de los combustibles fósiles como el petróleo. Debido a la descomposición térmica del combustible fósil se extraen monómeros que requieren de un proceso de polimerización, por lo tanto, el tipo de plásticos (polímero) va a depender de las modificaciones que sufran los monómeros durante la polimerización. Una vez finalizado el proceso de polimerización, los polímeros generalmente quedan en polvo, por lo que, regularmente son procesados en gránulos para obtener una fácil manipulación de estos, finalmente se procesan en moldes de diferentes formas (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018).

Además, los plásticos pueden clasificarse de otras dos formas; termoestables y termoplásticos. El primer grupo se caracteriza por endurecerse de manera permanente una vez que hayan sido calentados, este tipo de plástico son comúnmente usados para productos que soportan el calor. Los termoplásticos tienen la capacidad de suavizarse rápidamente por calor y endurecerse al enfriarse, lo que hace que puedan volver a reutilizarse prácticamente ilimitadas veces. Son empleados en su mayoría para la fabricación de productos como contenedores de alimentos y productos de limpieza y el hogar, también como envases de bebidas (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018).

3.5. Resistencia y degradación de plásticos

Los plásticos pueden degradarse por diferentes procesos como la fotodegradación, sin embargo, existen algunos plásticos fabricados para resistir a la luz solar ultravioleta, por lo tanto, la foto-degradabilidad en plásticos no siempre es efectiva y rápida. Otra forma de degradación es por la oxidación, con ayuda del oxígeno y aire. Sin embargo, todos los procesos de biodegradación son lentos y sólo fragmentan el macroplásticos en partículas más pequeñas, lo que contribuye a una acumulación de estos contaminantes, haciéndolos persistir en las columnas de agua y sedimentos por décadas (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018). La biodegradación fragmenta al plástico gradualmente, y el tiempo exacto que duran en el medio acuático es desconocido. Si los microplásticos son consumidos por un organismo, no solo puede

afectar su tracto intestinal y reproducción, sino también pueden transferirlos a otros organismos por medio de la cadena alimenticia, otra consecuencia es que los plásticos tienen la capacidad de absorber y concentrar sustancias tóxicas lo que es un riesgo aún mayor para la biota (Andrady, 2011).

3.6. Permanencia de microplásticos en la columna de agua y en el sedimento

Una de las razones de la distribución de los microplásticos dentro de los sistemas acuáticos está relacionada con sus propiedades físicas, así como con los procesos hidrodinámicos y biológicos que ocurren en el ambiente. Una mayor concentración de MPs en la columna de agua sugiere que una proporción considerable de estas partículas tiende a permanecer en suspensión. Este comportamiento se explica, en gran medida, por la baja densidad de ciertos tipos de plásticos, lo que dificulta su hundimiento (Van Cauwenberghe et al., 2015).

En contraste, la acumulación de microplásticos en los sedimentos se encuentra influenciada por mecanismos específicos de deposición, particularmente en el caso de las fibras. Dichas fibras en suspensión pueden ser removidas de la columna de agua y quedar atrapadas entre los granos del sedimento, donde su forma alargada facilita su retención y sedimentación (López Cuevas, 2023). Asimismo, la concentración y retención de microplásticos en los sedimentos puede variar en función de las características del sustrato, particularmente del tamaño del grano. Estudios previos han demostrado que la granulometría influye en la deposición de MPs, observándose diferencias en los patrones de acumulación de acuerdo con el tipo de sedimento presente (Alomar et al., 2016; López Cuevas, 2023).

4. Justificación

Los microplásticos son una amenaza emergente para los ecosistemas acuáticos, debido a que afectan a los organismos que habitan en ellos. Estas partículas pueden ser ingeridas por organismos de diferentes niveles tróficos, lo que puede generar daños físicos o fisiológicos, así como efectos tóxicos, debido a los aditivos químicos por los que están compuestos los plásticos. A través de la cadena trófica, este contaminante puede llegar al ser humano mediante el consumo de peces, crustáceos, moluscos y otros organismos contaminados, Asimismo, puede ocurrir a través del uso y consumo del agua en actividades domésticas.

La presencia de microplásticos ha sido ampliamente documentada en sistemas marinos, sin embargo, aún existe poco conocimiento sobre su presencia en cuerpos de agua dulce. Los sedimentos en estos cuerpos de agua están actuando como sumideros de microplásticos, ya que las lagunas son sistemas relativamente cerrados, que favorecen la acumulación de los microplásticos provenientes de diversas fuentes, como actividades urbanas, agrícolas, industriales y recreativas. A diferencia de los sistemas fluviales, donde el flujo continuo puede dispersar los contaminantes, por lo tanto, la retención de MPs en las lagunas podría ser mayor, haciendo que actúen como reservorios a largo plazo debido a su lenta degradación.

Ante esta situación, el presente proyecto busca dar evidencia del posible impacto humano hacia los sistemas acuáticos, a través del estudio de cuatro lagunas del sur de Quintana Roo. En este contexto, las lagunas seleccionadas; Bacalar, Sabana, El Ocho y Lagartija tienen una gran importancia, ya que guardan servicios ecosistémicos como el control de inundaciones en temporadas de lluvias, también purifican residuos industriales y desechos humanos, además de proporcionar un hábitat en condiciones favorables para una diversidad de especies de plantas y animales, así como contribuir a la producción de peces y otros recursos alimentarios y bienes con valor comercial (Baron et al., 2003).

La Laguna de Bacalar ha experimentado un crecimiento urbano significativo desde que Bacalar fue reconocido como pueblo mágico. El atractivo color de sus aguas ha impulsado un aumento en el turismo, lo que con el tiempo ha generado problemas de contaminación por plásticos (Gómez Pech et al., 2018). Dentro de estos sistemas lagunares podemos encontrar especies de gran relevancia como los estromatolitos y el caracol Chivita, y una gran diversidad de especies y ecosistemas únicos en el mundo (Gobierno de México, 2021), por lo que su estudio

y cuidado son de gran relevancia para su conservación. Por otro lado, La Sabana desempeña un papel vital en el equilibrio ecológico de la región y en el bienestar de los habitantes de la ciudad de Chetumal, capital del estado de Quintana Roo, ya que actúa como regulador natural de las inundaciones durante temporada de huracanes y lluvias.

Por lo anterior, resulta fundamental conocer si existe presencia de microplásticos en las lagunas de la región, así como comprender su distribución y los posibles efectos que pueden ocasionar, con el fin de evaluar el estado ambiental de estos ecosistemas. Y de esta manera, brindar información que permita generar estrategias de mitigación a nivel local y abordar esta problemática como un primer paso hacia la concientización sobre el uso, manejo y reciclaje de los plásticos, así como la promoción de acciones para la protección de los sistemas acuáticos.

5. Pregunta de investigación

¿Cuál es la concentración media de microplásticos en el agua y sedimento superficial de los ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo?

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Evaluar el tipo y concentración media de microplásticos en el agua y los sedimentos de cuatro ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo, así como su relación con el tamaño poblacional.

6.2. Objetivos específicos

- Clasificar las partículas de microplásticos presentes en los sedimentos y agua superficial de cuatro ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo.
- Determinar las concentraciones medias de microplásticos en el sedimento y agua superficial de los ambientes acuáticos continentales muestreados.
- Comparar las concentraciones medias de microplásticos presentes en sedimentos y agua en los ambientes acuáticos continentales.
- Determinar la relación entre el tamaño poblacional y la abundancia de microplásticos.

7. Materiales y métodos

7.1. Área de estudio

Las lagunas Bacalar, Sabana, Laguna Lagartija y Laguna del Ocho se encuentran al sur de la Península de Yucatán (PY), en la región hidrológica no. 109 corredor Bacalar-Bahía de Chetumal. La PY se caracteriza por poseer un clima cálido subhúmedo con una temperatura media de 26.5 °C y con precipitaciones que van desde los 750 a los 1400 mm al año. Se distinguen tres temporadas de regímenes de lluvias: secas, lluvias y nortes (Ovando-Hidalgo et al., 2020; Tobón Velázquez, 2018).

La Laguna de Bacalar se extiende aproximadamente 60 km de longitud, con un ancho entre 20 m y 2 km y una profundidad variable entre 0.5m y 15m (Gómez Pech et al., 2018; Palafox-Juárez et al., 2022). Está ubicada en el sureste del estado de Quintana Roo con coordenadas; 18° 56’ 26.5’’ N, 88° 09’ 28.6’’ O y 18° 32’ 38.6’’ N, 88° 27’ 48.6’’ O. En las zonas inundables cuenta con vegetación escasa y dispersa, que consiste en pastizales de agua dulce, así como plántulas y juveniles de mangle rojo. Otro tipo de vegetación son *Cladium jamaicense*, *Typha domingensis* (tule), y *Conocarpus erectus* (mangle de botoncillo). Además, hay especies de selva como: *Metopium brownei* (chechén) y, vegetación acuática y flotante que se desarrolla al borde de la laguna. Sus sedimentos están compuestos por arena, limo y restos orgánicos (Palafox-Juárez et al., 2022).

Por otro lado, la Sabana es un humedal que cuenta con una extensión de aproximadamente 6.5 kilómetros de longitud, su ancho es máximo de 300 m y mínimo de 100 m, y su profundidad no supera los 5 m. Este humedal es importante para el equilibrio ecológico de la región y para el bienestar de la población de la ciudad de Chetumal, ya que regula procesos de inundación durante temporadas de lluvias y huracanes. Se encuentra ubicada al noroeste de la ciudad, es altamente sensible a las precipitaciones pluviales. Se localiza en una depresión a 4 m entre las coordenadas geográficas de 18.51°N, 88.35°W y 18.55°N; 88.30°W (Cohuo Durán et al., 2020; Flores-Rodríguez et al., 2022).

Por otra parte, existe escasa información respecto a la hidrología y de las comunidades biológicas de las lagunas del Ocho y Lagartija, debido principalmente a su lejanía de los centros urbanos y al poco interés que se le da en trabajos ecológicos, sin embrago son sistemas descritos

como eutróficos, con vegetación circundante típica de la selva mediana y baja, con árboles característicos de los humedales de la Península de Yucatán. Estos sistemas no presentan escorrentías o conexión a otros sistemas durante la temporada de secas, a diferencia de la temporada de lluvias en la cual se presenta una conexión entre las lagunas del Ocho, Lagartija y la laguna Chacchoben.

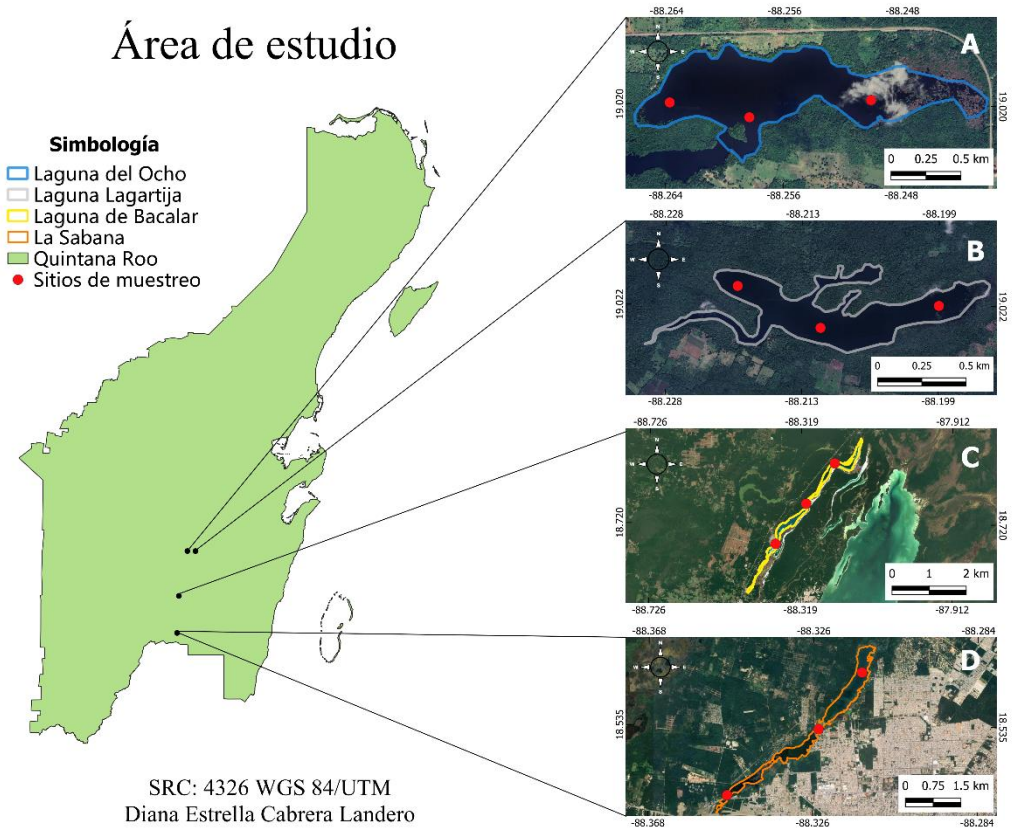


Figura 1. Mapa del área de estudio. A) Laguna del Ocho. B) Lagartija. C) Laguna Bacalar. D) La Sabana

7.2. Trabajo de campo

El muestreo se realizó de febrero a mayo de 2025, en tres sitios de muestreo distribuidos a lo largo de cada laguna. En la Sabana, se estableció un sitio en la región norte, uno en la parte central y uno hacia el sur. Este mismo procedimiento se aplicó en el resto de las lagunas; Laguna Lagartija, Laguna del Ocho y Laguna de Bacalar, para garantizar un muestreo homogéneo.

7.2.1. Sedimento

Se recolectaron muestras de sedimento de los centímetros superiores utilizando una draga Ekman, inmediatamente se colocó el sedimento recolectado de cada laguna en frascos de vidrio con tapa metálica de 500 ml previamente esterilizados. Posteriormente fueron etiquetados debidamente y trasladados al laboratorio de microbiología del Instituto Tecnológico de Chetumal. Para minimizar la contaminación durante el muestreo en el campo, se utilizó ropa de algodón (Woodall et al., 2015).

7.2.2. Agua superficial

Las muestras se filtraron con una red de arrastre zooplanctónica con una apertura de malla de 150 micras. Para cada sitio de muestreo, se midieron 100 litros de agua con ayuda de una cubeta de aluminio con capacidad de cinco litros, los cuales se filtraron a través de la red, reteniendo los microplásticos (MPs) en el vaso colector ubicado al extremo final de la misma, para su posterior análisis (Gong & Xie, 2020). Las muestras fueron depositadas en frascos de vidrio de 500 ml con tapa de metal previamente lavados con agua destilada, y se etiquetaron cuidadosamente antes de su transporte al laboratorio.

7.3. Trabajo de laboratorio

7.3.1. Sedimento

Las partículas de plástico se extrajeron del sedimento recolectado utilizando un protocolo de separación por densidad basado en el método de Thompson et al. (2004). Al sedimento se le añadió una solución saturada de NaCl (384 g L−1), y se agitó utilizando un vórtex. Posteriormente, la mezcla se dejó en reposo con el fin de permitir que se sedimente. Luego, la mitad superior de la solución fue cuidadosamente aspirada con una pipeta de vidrio y transferida a un vaso de precipitado. El contenido fue sometido a filtración mediante una bomba de vacío, utilizando filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro (Crawford y Quinn, 2017b).

Finalmente, los filtros se colocaron en placas de Petri de vidrio, debidamente cubiertas, para su preservación y posterior análisis.

Los filtros se examinaron con un microscopio estereoscópico Motic SMZ160T y los microplásticos se clasificaron en términos de forma y color, se contaron y se colocaron en viales con agua desionizada (Blumenröder et al., 2017). Para minimizar y controlar la contaminación durante el análisis en laboratorio, se usó ropa de algodón, se limpió la superficie de trabajo y se colocó un filtro de fibra de vidrio limpio en una placa de Petri en la mesa de trabajo durante cada sesión para determinar la incidencia de fibras en el ambiente.

7.3.2. Agua superficial

El agua se filtró utilizando los métodos de Lusher et al. (2015). El contenido de cada muestra fue sometido a filtración mediante una bomba de vacío y filtros de fibra de vidrio de 47 mm de diámetro. Posteriormente, los filtros fueron almacenados en placas de Petri de vidrio para su análisis al microscopio estereoscópico Motic SMZ160T. Durante la observación, las partículas identificadas como microplásticos fueron clasificadas de acuerdo con su forma y color, y se procedió a su conteo. Finalmente, los microplásticos fueron depositados en viales con agua desionizada para su conservación (Jones et al., 2020).

7.4. Análisis estadísticos

Se elaboraron mapas de las lagunas muestreadas, indicando cada uno de los sitios de muestreo mediante el software QGIS, con el propósito de representar espacialmente la ubicación de los puntos de recolección de muestras. Los promedios de microplásticos obtenidos en cada laguna fueron comparados entre sí, considerando los diferentes sitios de muestreo dentro de cada sistema. Asimismo, se efectuó una comparación entre las concentraciones medias generales de las lagunas con el fin de identificar posibles variaciones o similitudes en la abundancia de microplásticos entre los cuerpos de agua analizados.

Se aplicó un test de normalidad Shapiro-Wilk, con el fin de determinar si los datos presentaban normalidad y, con base en ello, proceder a realizar las pruebas estadísticas adecuadas.

Para determinar la existencia de diferencias significativas entre las lagunas de acuerdo con la abundancia de microplásticos por forma y color de los microplásticos, tanto en agua como en sedimento, se aplicó una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis utilizando el software PAST. Este análisis permitió evaluar si existen diferencias en la distribución de los microplásticos y si presentan significancia estadística entre las distintas lagunas de estudio. Para este análisis, la comparación se realizó entre lagunas, utilizando como variables las cantidades de microplásticos registradas en cada una de ellas. Las formas y los colores de los microplásticos se emplearon únicamente como categorías para organizar los datos y construir las tablas que fueron ingresadas al software PAST (Anexo: Tabla 10, 11, 12 y 13). Este procedimiento se aplicó tanto para las muestras de agua como para las de sedimento.

Además, con el propósito de determinar si existía una relación entre el tamaño poblacional y la abundancia de microplásticos se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman. El tamaño de la población se tomó de INEGI (2020), de acuerdo con ello, se relacionó con la abundancia de microplásticos encontrada en las lagunas analizadas (Anexo: tabla 9).

8. Resultados

Los microplásticos observados en las muestras de agua y sedimento de la Sabana, Laguna Bacalar, Laguna del Ocho y Lagartija fueron contabilizados y clasificados según su forma y color. En cuanto a las formas, se identificaron cuatro tipos: fibras, fragmentos, espumas y películas. Además, se registró la presencia de siete colores diferentes de microplásticos; transparente, azul, negro, rojo, verde, amarillo, blanco.

Los datos no representaron normalidad de acuerdo con el test de normalidad Shapiro-Wilk. Por ende, se realizó un análisis Kruskal-Wallis, los valores de *p* obtenidos indicaron que no existen diferencias significativas en la cantidad de microplásticos entre las lagunas, independientemente de su forma o color (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación entre la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija donde el p valor no refleja diferencias significativas según el análisis Kruskal Wallis

Comparación	**p valor**	**Significancia**
Agua-Forma	0.9323	No existe diferencias significativas
Agua-Color	0.8977	No existe diferencias significativas
Sedimento-Forma	0.6958	No existe diferencias significativas
Sedimento-Color	0.09656	No existe diferencias significativas

Posteriormente, se realizó el análisis de Spearman, a partir del cual se determinó que no existe una correlación significativa entre el tamaño de la población y la abundancia de microplásticos (Tabla 3).

Tabla 3. Correlación entre el tamaño poblacional y la abundancia de microplásticos según el análisis de Spearman

Correlación (Abundancia-Población)	Rho de Spearman	p valor	Significancia
Agua	-0.13	0.688	No hay correlación significativa
Sedimento	0.443	0.149	No hay correlación significativa

Se determinaron las concentraciones medias de microplásticos presentes en un litro de agua y en un kilogramo de sedimento correspondientes a cada una de las lagunas analizadas (Tabla 4).

Tabla 4. Promedio de microplásticos en agua y sedimento de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Laguna	MPs / L	MPs / kg
Sabana	1.363	82.7
Bacalar	1.253	144
El Ocho	2.127	17.3
Lagartija	1.333	38.7

Durante el análisis microscópico, se recopilaron fotografías de los microplásticos. Se observan fibras y fragmentos (Figura 2, Anexo: Figura 9 y 10)

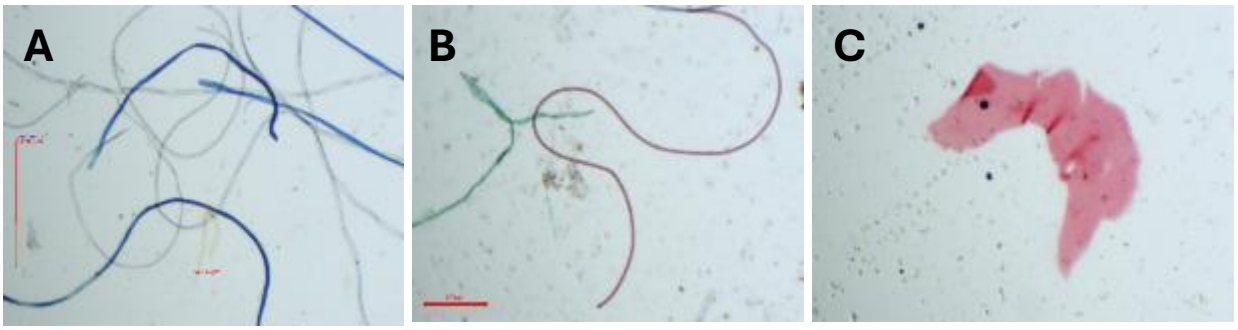


Figura 2. Fotografías. A. Fibras azules. B. Fibra roja y fibra verde. C. Fragmento rojo

8.1. Agua superficial

La tabla 5 indica que las fibras son el tipo de microplástico más abundante en las muestra de agua superficial por sitio de las cuatro lagunas, mientras que las otras formas (fragmentos, espumas y películas) aparecen en menores cantidades o incluso ausentes en ciertos sitios. Además, la Laguna del Ocho concentró la mayor abundancia de microplásticos.

En la Sabana, los valores de microplásticos oscilaron entre 49 y 243 partículas por cada 100 L, predominando las fibras frente a las demás formas. Los fragmentos estuvieron presentes en menor cantidad y las espumas se detectaron únicamente en un sitio; no se registraron películas en esta laguna. Asimismo, el número total de partículas en la Laguna de Bacalar varió de 86 a 151 por cada 100 L, y al igual que en la Sabana, las fibras fueron las más abundantes, mientras que fragmentos y películas se encontraron en menor número, y las espumas estuvieron ausentes en todos los sitios (Tabla 5).

En la Laguna del Ocho, se observó mayor abundancia de microplásticos, alcanzando hasta 338 partículas/100 L. También en esta laguna las fibras dominaron, seguidas por fragmentos en bajas cantidades, mientras que espumas y películas se registraron eventualmente. Finalmente, en la Laguna Lagartija, el número de microplásticos varió de 115 a 171 partículas/100 L. Nuevamente las fibras fueron la forma predominante, acompañadas de algunos fragmentos y con ausencia total de espumas y películas (Tabla 5).

Tabla 5. Número de microplásticos clasificados según su forma en 100 L de agua superficial por cada sitio de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Laguna	Sitio	Forma				Total de partículas
		Fibra MPs/100L	Fragmento MPs/100L	Espuma MPs/100L	Película MPs/100L	
Sabana	1	233	10	0	0	243
Sabana	2	107	9	1	0	117
Sabana	3	46	3	0	0	49
Laguna Bacalar	1	130	8	0	1	139
Laguna Bacalar	2	135	13	0	3	151
Laguna Bacalar	3	82	3	0	1	86
Laguna del Ocho	1	129	13	0	3	145
Laguna del Ocho	2	333	2	0	3	338
Laguna del Ocho	3	144	7	0	4	155
Laguna Lagartija	1	111	4	0	0	115
Laguna Lagartija	2	170	1	0	0	171
Laguna Lagartija	3	103	11	0	0	114

Se presenta el número de microplásticos (MPs/100 L) por sitio en cada una de las lagunas de acuerdo con el color (Tabla 6). Se observó que en todas las lagunas, los colores predominantes fueron azul y negro, seguidos en menor cantidad por las partículas transparentes, mientras que los colores verde, rojo, blanco y amarillo se encontraron con menor frecuencia. En la Sabana, el color azul representó el número más abundante de microplásticos, especialmente en los sitios 1 y 2. En la Laguna de Bacalar, de igual forma hubo predominio de microplásticos azules y negros, con presencia ocasional de partículas transparentes y rojas. La Laguna del Ocho

presentó la mayor concentración de partículas, con valores de hasta 338 MPs/100L, dominando los colores negro y azul, además presentó mayor número de partículas verdes, al contrario de las otras lagunas. Finalmente, en la Laguna Lagartija, los microplásticos azules fueron también abundantes, acompañados de cantidades variables de partículas negras y transparentes (Tabla 6).

Tabla 6. Número de microplásticos clasificados según su color en 100 L de agua superficial por cada sitio de la Sabana, Bacalar, El Ocho, Lagartija

Laguna	Sitio	Color						
		Transparente MPs/100L	Azul MPs/100L	Negro MPs/100L	Rojo MPs/100L	Verde MPs/100L	Otros MPs/100L	Total de partículas
Sabana	1	28	140	51	18	4	2	243
Sabana	2	3	73	20	6	12	3	117
Sabana	3	2	24	8	2	13	0	49
Laguna de Bacalar	1	16	95	20	8	0	0	139
Laguna de Bacalar	2	39	84	16	7	2	3	151
Laguna de Bacalar	3	7	60	13	3	3	0	86
Laguna del Ocho	1	9	81	21	2	32	0	145
Laguna del Ocho	2	39	136	98	9	56	0	338
Laguna del Ocho	3	20	39	46	0	49	1	155
Laguna Lagartija	1	19	49	32	12	3	0	115
Laguna Lagartija	2	21	107	30	12	0	1	171
Laguna Lagartija	3	21	79	2	12	0	0	114

Del total de microplásticos identificados en las muestras de agua en las cuatro lagunas, la Laguna del Ocho representó el mayor porcentaje de microplásticos (35%). En contraste, La Sabana y la Laguna Lagartija presentaron porcentajes iguales (22%), mientras que la Laguna de Bacalar representó el menor porcentaje (21%) (Figura 3). Esto demuestra que todas las lagunas representan porcentajes similares, por lo tanto, no se observan diferencia y los microplásticos están distribuidos homogéneamente.

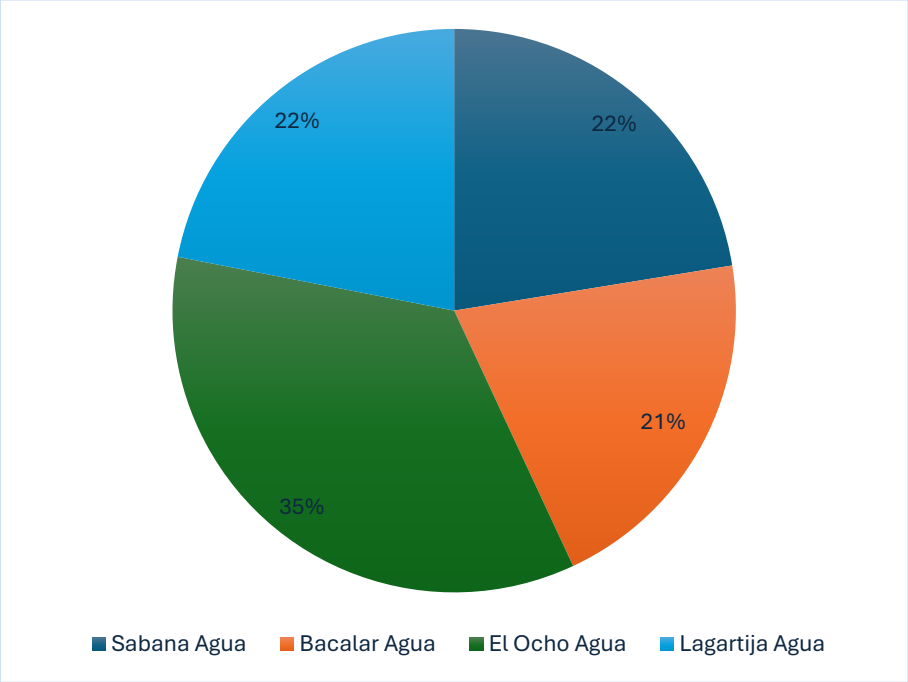


Figura 3. Porcentaje de microplásticos en el agua de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Se observó que la fibra es la forma dominante de microplásticos en las muestras de agua recolectadas en las cuatro lagunas (Figura 4), con valores que superan de manera considerable a los fragmentos, espumas y películas.

En la Laguna del Ocho se registró el mayor número de fibras (606), mientras que en la Sabana, Bacalar y Lagartija también se observaron cantidades elevadas (386, 347 y 384, respectivamente). A diferencia de los fragmentos y películas que tuvieron una presencia mucho menor, y las espumas prácticamente no se detectaron, apareciendo únicamente en la Sabana con un solo registro (Figura 4).

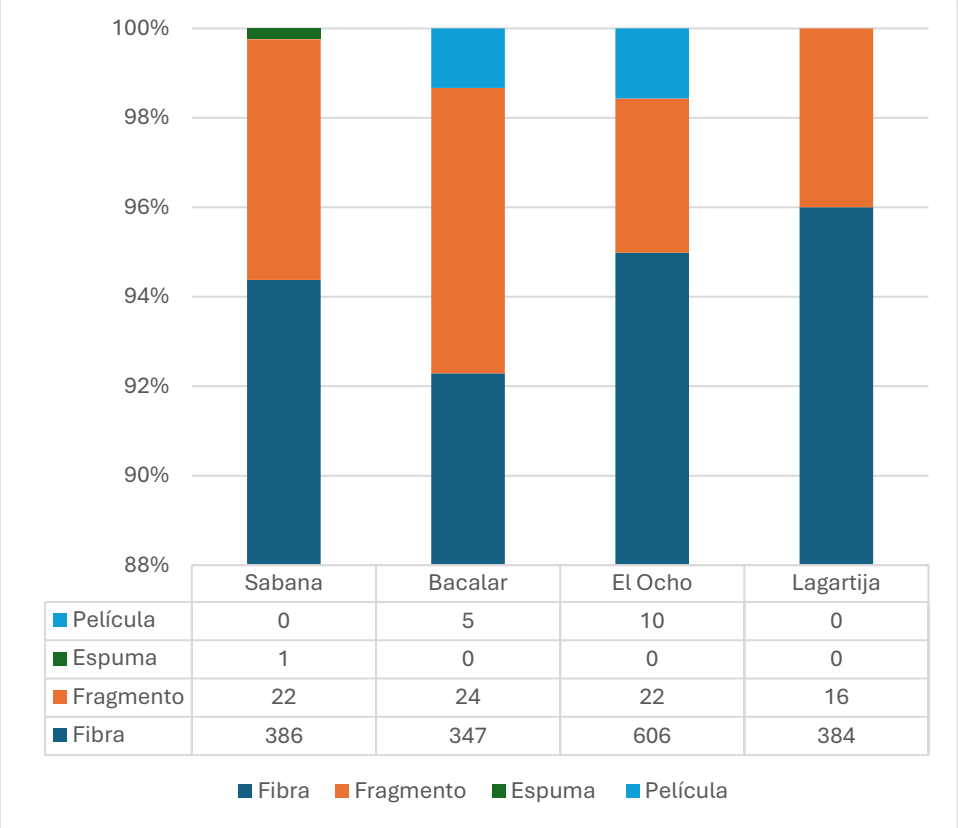
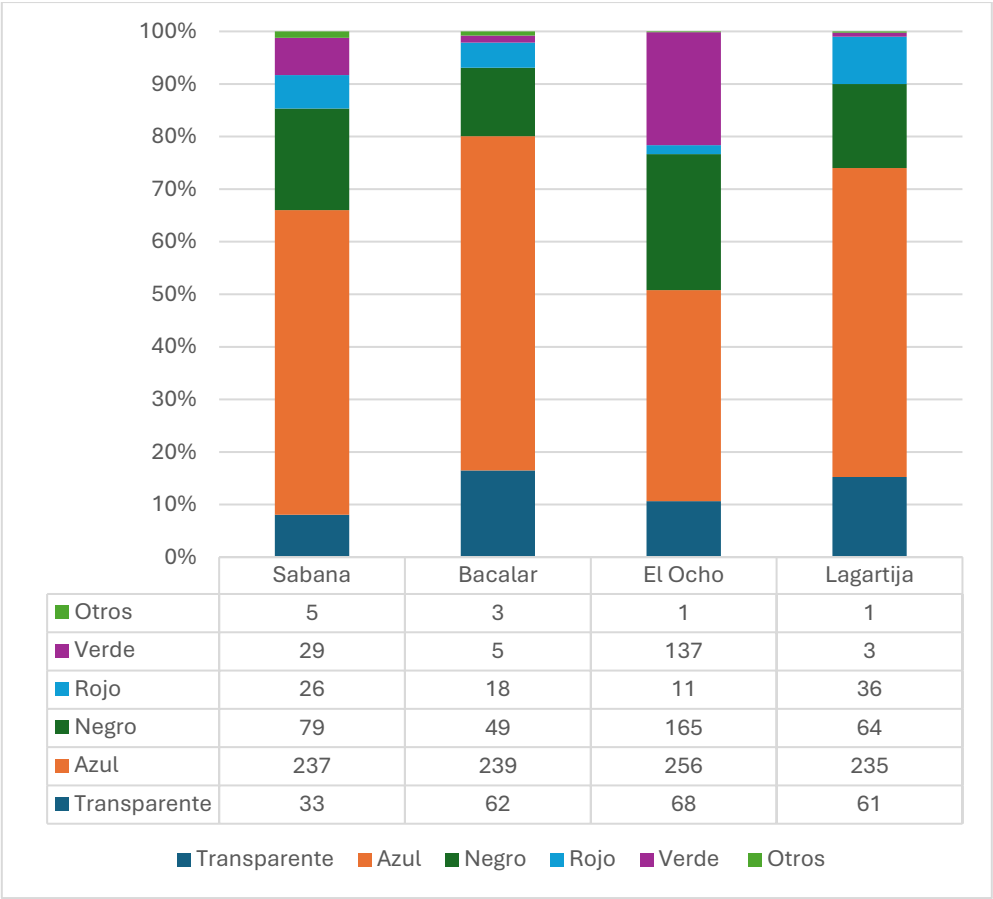


Figura 4. Número de microplásticos por forma en muestras de agua superficial recolectadas en la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Por otro lado, de los colores que más destacaron fueron azul y negro (Figura 5). Se observó que el color azul es el más frecuente en las cuatro lagunas, con valores de más de 200 MPs en cada laguna, lo que confirma su predominancia. Seguido del color negro, especialmente en la Laguna del Ocho con 165 MPs, mientras que en las demás lagunas se registraron cantidades menores, pero aún considerables (79 en Sabana, 49 en Bacalar y 64 en Lagartija). Los microplásticos de color transparente ocupan el tercer lugar en abundancia. El verde fue poco abundante en la mayoría de las lagunas, sin embargo, la Laguna del Ocho presentó un gran número de microplásticos de color verde (137) (Figura 5).



	Sabana	Bacalar	El Ocho	Lagartija
Otros	5	3	1	1
Verde	29	5	137	3
Rojo	26	18	11	36
Negro	79	49	165	64
Azul	237	239	256	235
Transparente	33	62	68	61

Figura 5. Número de microplásticos por color en muestras de agua superficial recolectadas en la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

8.2. Sedimento

Por el contrario de los valores de microplásticos en las muestras de agua, las de sedimento presentan valores menores.

Se presenta el número de microplásticos en cada sitio recuperados de muestras de sedimento húmedo de 500 gramos clasificados por forma (Tabla 7). La Sabana presenta valores que oscilan entre 16 y 80 MPs por cada 500 g de sedimento húmedo, las fibras son la forma predominante, mientras los fragmentos y películas presentaron valores esporádicos, y una ausencia total de espumas. En el caso de la Laguna de Bacalar presentó la concentración de microplásticos mayor, alcanzando hasta 104 partículas en el sitio 1, nuevamente las fibras fueron las más abundantes, seguido de los fragmentos y espumas (Tabla 7).

En la Laguna del Ocho, se observó un número menor microplásticos que varió de 3 a 13 partículas. De igual forma en esta laguna las fibras dominaron, y solamente se registraron tres fragmentos en el sitio 2 y una película en el sitio 1, no hubo registro de espumas. Finalmente, en la Laguna Lagartija, el número de microplásticos fue de 12 a 30 partículas/500 g de sedimento húmedo. También las fibras fueron las más abundantes, con presencia de pocos fragmentos y películas, y ninguna espuma (Tabla 7).

Tabla 7. Número de microplásticos clasificados según su forma en 500 g de sedimento superficial por cada sitio de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Laguna	Sitio	Forma				Total de partículas
		Fibra MPs/500g	Fragmento MPs/500g	Espuma MPs/500g	Película MPs/500g	
Sabana	1	14	0	0	2	16
Sabana	2	24	3	0	1	28
Sabana	3	79	1	0	0	80
Laguna Bacalar	1	98	6	0	0	104
Laguna Bacalar	2	54	13	21	2	90
Laguna Bacalar	3	22	0	0	0	22
Laguna del Ocho	1	2	0	0	1	3
Laguna del Ocho	2	10	3	0	0	13
Laguna del Ocho	3	10	0	0	0	10
Laguna Lagartija	1	24	1	0	5	30
Laguna Lagartija	2	15	1	0	0	16
Laguna Lagartija	3	8	0	0	4	12

Se observó el número de microplásticos por 500 g de sediemento húmedo por sitio en cada una de las lagunas según su color (Tabla 8). Se registró que en todas las lagunas, el color predominante fue el azul, seguido en menor cantidad por las partículas transparentes, mientras que los colores negro y rojo se encontraron con menor frecuencia, y el verde, amarillo y blanco se encontraron únicamente en uno o dos sitios de las lagunas. En la Sabana, el azul fue el número más abundante de microplásticos, sin embargo, únicamente en el sitio 3 se observó un mayor número de partículas transparentes (52), los colores negro, rojo y verde presentaron valores bajos, y en el amarillo y blanco hubo ausencia de partículas en todos los sitios. Por otro lado, la

Laguna de Bacalar, presentó el mayor número de partículas azules en todos los sitios, seguido del negro, rojo y transparente, presentando ocasinalmente partículas de los colores amarillo y blanco. En la Laguna del Ocho se registraron los valores más bajos de microplásticos que osciló entre 3 y 13, igualmente el color azul dominó, seguido del transparente. Por último, en la Laguna Lagartija, los microplásticos azules y transparentes fueron los más abundantes, acompañados de cantidades variables de partículas negras y rojas, con ausencia total de los colores verde, amarillo y blanco (Tabla 8).

Tabla 8. Número de microplásticos clasificados según su color en 500 g de sedimento superficial por cada sitio de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Laguna	Sitio	Color							Total de partículas
		Transparente MPs/500g	Azul MPs/500g	Negro MPs/500g	Rojo MPs/500g	Verde MPs/500g	Amarillo MPs/500g	Blanco MPs/500g	
Sabana	1	4	7	2	3	0	0	0	16
Sabana	2	7	11	5	4	1	0	0	28
Sabana	3	52	27	0	1	0	0	0	80
Laguna de Bacalar	1	4	63	18	16	0	3	0	104
Laguna de Bacalar	2	12	30	8	9	0	11	20	90
Laguna de Bacalar	3	0	14	1	7	0	0	0	22
Laguna del Ocho	1	1	2	0	0	0	0	0	3
Laguna del Ocho	2	1	9	0	3	0	0	0	13
Laguna del Ocho	3	2	8	0	0	0	0	0	10
Laguna Lagartija	1	6	18	3	3	0	0	0	30
Laguna Lagartija	2	1	3	3	9	0	0	0	16
Laguna Lagartija	3	11	1	0	0	0	0	0	12

Se observa el porcentaje de microplásticos en las muestras de sedimento en las cuatro lagunas (Figura 6), la Laguna de Bacalar presentó mayor porcentaje, más de la mitad de los microplásticos registrados en el sedimento (51%). En segundo lugar, La Sabana representa el 29% del total, seguido de la Laguna Lagartija con el 14% y finalmente la Laguna del Ocho que representa el menor porcentaje con tan solo el 6%. Lo que sugieren que el sedimento de la Laguna de Bacalar empieza a funcionar como un sumidero de microplásticos en comparación

con las demás lagunas. Además, la diferencia notoria de porcentaje puede deberse al tipo de sustrato que podría impedir la retención de microplásticos en el sedimento (Figura 6).

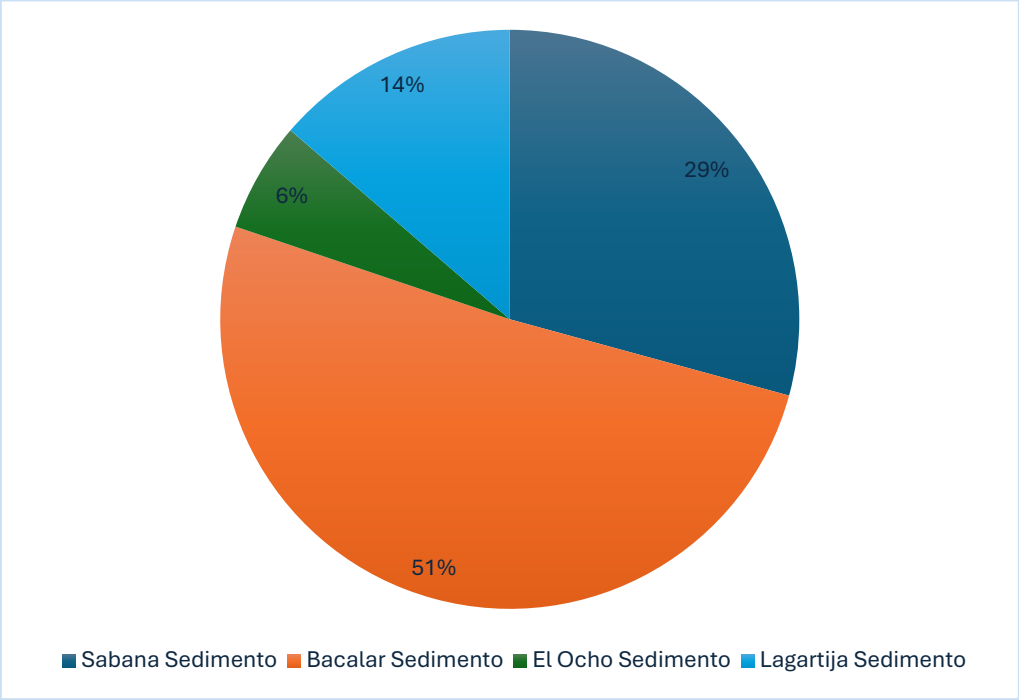


Figura 6. Porcentaje de microplásticos en el sedimento de la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

Se registró que la forma más abundante son las fibras (Figura 7), con valores que oscilan entre 22 y 174 partículas, a diferencia de las otras formas que se observaron menores cantidades.

La Laguna de Bacalar presentó el mayor número de microplásticos en el sedimento, se registró hasta 174 fibras, seguido de las espumas y fragmentos (21 y 19, respectivamente) y únicamente 2 películas registradas. La Sabana, Laguna del Ocho y Lagartija de igual forma se observó más abundancia de fibras, posteriormente acompañado de los fragmentos, algunas películas y ausencia total de espumas (Figura 7).

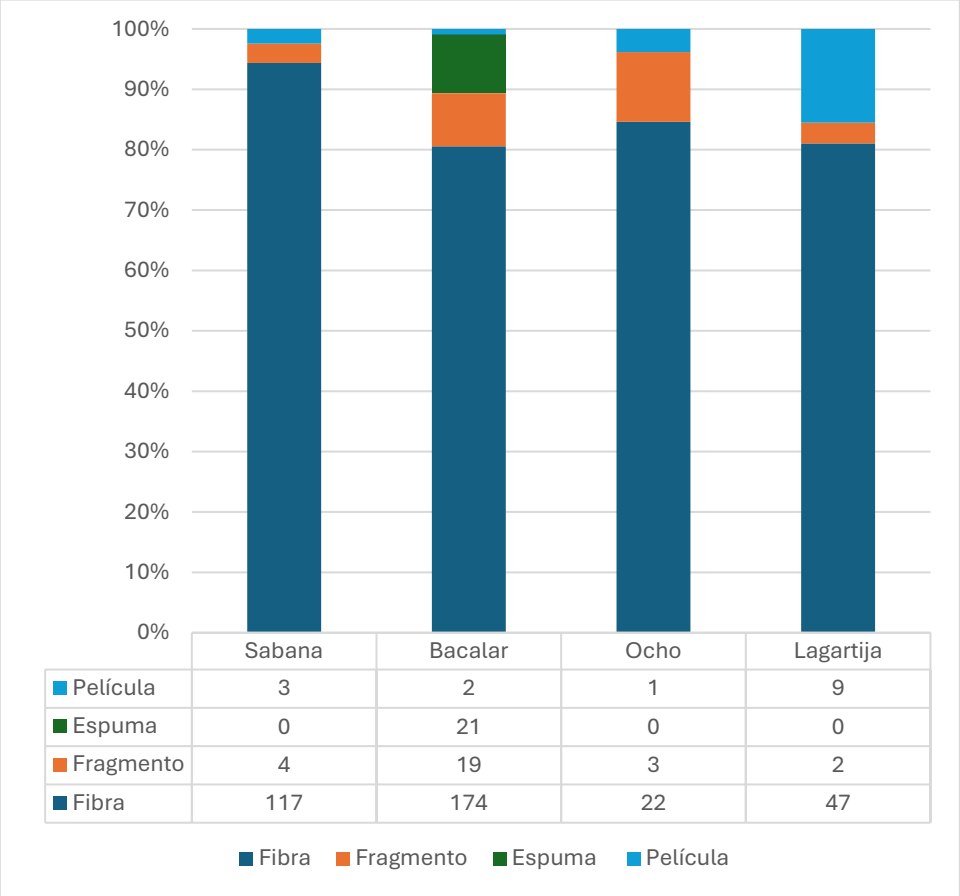
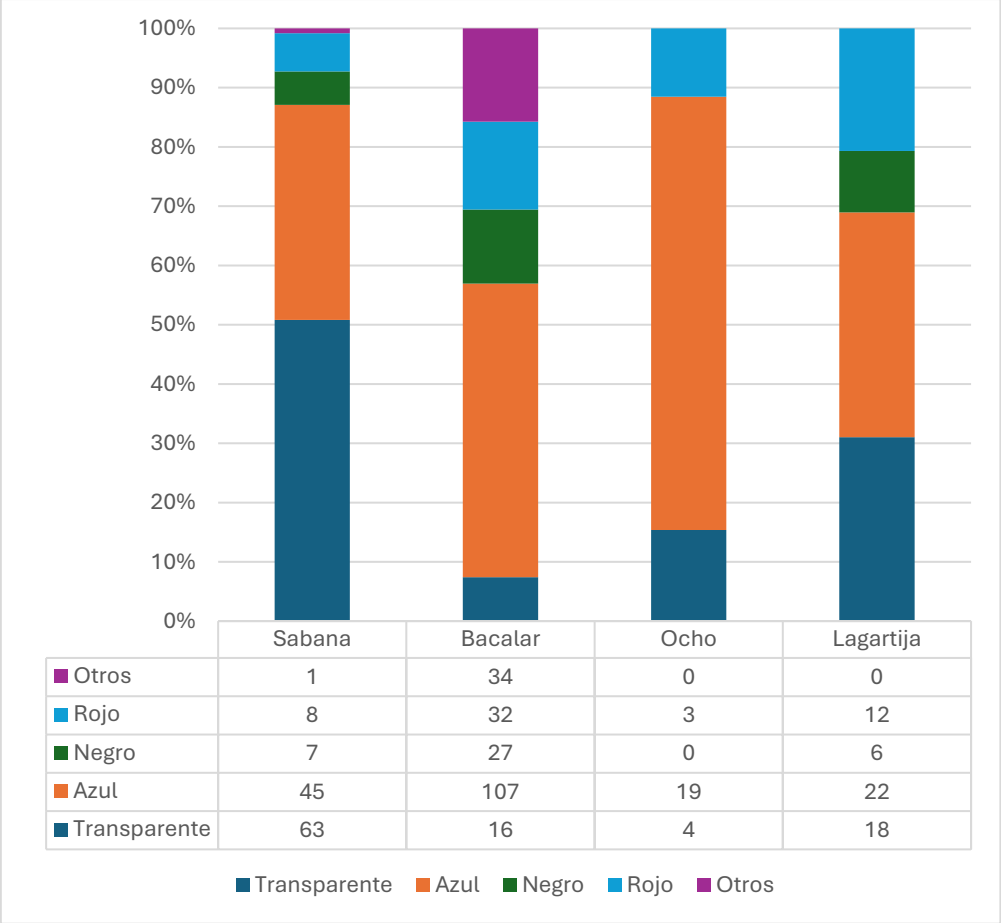


Figura 7. Número de microplásticos por forma en muestras de sedimento superficial recolectadas en la Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija

No obstante, el color que más destacó en las muestras de sedimento en cada laguna fue el azul (Figura 8) que osciló entre 19 y 107 MPs/500 g. Se observó que el azul estuvo más presente en la Laguna de Bacalar, a diferencia de la Sabana, Lagartija y El Ocho (45, 22 y 19, respectivamente), lo que confirma que es el color predominante. En segundo lugar, el transparente presentó valores de 4 a 63 MPs/500 g. En tercer lugar, el rojo se registró en la Sabana con 8 MPs/500 g, Bacalar con 32 MPs/500 g, El Ocho con 3 MPs/500 g y Lagartija con 12 MPs/500 g. Se observaron otros colores como negro, verde, amarillo y blanco, pero sólo con valores mínimos (Figura 8).



	Sabana	Bacalar	Ocho	Lagartija
Otros	1	34	0	0
Rojo	8	32	3	12
Negro	7	27	0	6
Azul	45	107	19	22
Transparente	63	16	4	18

Figura 8. Número de microplásticos por color en muestras de sedimento superficial recolectadas en la Sabana, Bacalar, El Ocho, Lagartija

9. Discusión

Los resultados obtenidos en las muestras de agua y sedimento superficial confirman la presencia de microplásticos en los ambientes acuáticos continentales; Sabana, Laguna Bacalar, Laguna del Ocho y Laguna Lagartija, lo que evidencia que estos sistemas acuáticos también están siendo alcanzados por una de las problemáticas ambientales actuales más extendidas a nivel global a la misma magnitud que los sistemas marinos. Los microplásticos registrados se clasificaron en cuatro formas: fibras, fragmentos, espumas y películas. Y en siete colores diferentes: transparente, azul, negro, rojo, verde, amarillo, blanco, cuyo sistema de clasificación es utilizado a nivel mundial (Sánchez-Campos et al., 2024; Acosta González et al., 2022; López Cuevas, 2023).

Algunos estudios (Alfonso et al., 2020; D'Avignon et al., 2022) señalan que el número de microplásticos en los cuerpos acuáticos superan el número de organismos vivos en los mismos ambientes, por lo que su presencia representa un verdadero problema. Por otra parte, señalan que la concentración de microplásticos en los sistemas dulceacuícolas son comparables con los niveles encontrados en las regiones marinas más contaminadas (D'Avignon et al., 2022), debiéndose a diferentes factores como la descarga de aguas residuales y el confinamiento del agua a espacios delimitados como lagunas y ríos, además de la capacidad de dispersión de estas partículas, favorecida por corrientes, lluvias y posiblemente por actividades humanas indirectas, como el turismo o la agricultura, que introducen plásticos al ambiente sin importar la lejanía de los asentamientos. Estudios como el de Alomar et al., (2016) y Rodrigues et al., (2024) han encontrado que ningún área se encuentra exenta de la contaminación de microplásticos, en los cuales se ha detectado, altos niveles de microplásticos en áreas marinas protegidas como el Parque Nacional Bundala (PNB) y el Parque Nacional Marino Hikkaduwa (PNH) (Alomar et al., 2016; Sevwandi Dharmadasa et al., 2021). Algo que concuerda con nuestros resultados, ya que los sistemas más alejados de las zonas urbanas y rodeados solo por vegetación como el caso de Laguna Lagartija y Laguna del Ocho, se encontró que existe una alta presencia de microplásticos, esto demuestra la homogeneidad en la abundancia de estos entre las cuatro lagunas estudiadas. Se esperaba que la proximidad a zonas urbanas influyera en una mayor presencia de partículas, pero los resultados sugieren lo contrario, ya que según lo obtenido por el análisis estadístico Kruskal-Wallis se indicó que no hay diferencias significativas entre las lagunas, por lo tanto, los microplásticos se encuentran distribuidos homogéneamente en el área

de estudio. Esto contrasta con otros estudios donde registraron concentraciones bajas de MPs en áreas naturales protegidas dulceacuícolas en comparación con lagunas que no se encuentran protegidas (Sánchez-Campos et al., 2024). Esto refuerza la necesidad de ampliar el área de estudio, con la finalidad de reconocer si la distribución de los MPs en la zona es homogénea en todo el territorio de la PY, o si los sistemas en áreas naturales protegidas como Sian Ka´an se encuentran exentos de ellos.

Aunque no se han detectado graves problemas causados por los niveles de microplásticos contenidos en los sedimentos y el agua, pueden causar consecuencias severas a largo plazo, además de que estos actúan como vectores de sustancias tóxicas para diversos organismos, incluyendo el hombre. La gran cantidad de trabajos que existen sobre microplásticos en el mundo de aguas continentales siempre han detectado microplásticos (D'Avignon et al., 2022; Borges Ramirez et al., 2019), lo que refuerza la idea de que se trata de un contaminante ampliamente distribuido. En concordancia con ello, el análisis de correlación de Spearman determinó que el tamaño de la población cercana a las lagunas no se relaciona con la abundancia de microplásticos. Esto indica que la dispersión de microplásticos está vinculada a otros mecanismos de transporte, tales como el flujo del agua (corrientes) o incluso por la acción del viento, lo cual favorece que los microplásticos se distribuyan de manera amplia en distintos sistemas acuáticos (Kunz et al., 2023).

9.1. Agua superficial

Las muestras de agua evidencian que la cantidad de microplásticos encontrados en los ambientes acuáticos del sur de Quintana Roo oscilaron entre 49 a 338 MPs/100 L. La clasificación de las partículas reveló un predominio de fibras, seguido de fragmentos, así como la dominancia de los colores azul y negro, lo cual coincide con investigaciones previas (Sánchez-Campos et al., 2024).

Al contabilizar los microplásticos se registró una mayor abundancia en las muestras de agua en comparación con las obtenidas en el sedimento. Este resultado puede deberse, al mayor volumen de agua recolectado (300 L), ya que es necesario recolectar mayores volúmenes de agua para lograr representatividad (Correia Prata et al., 2019), esto incrementa la posibilidad de observar un número más elevado de microplásticos. Asimismo, la mayor concentración en la columna de agua sugiere que muchos de los MPs observados tienden a permanecer suspendidos

y no se han asentado por completo en el fondo. Este comportamiento puede explicarse por la baja densidad que presentan ciertos plásticos, lo que dificulta su hundimiento, así como por la resuspensión ocasionada tanto por la acción de los organismos que habitan las lagunas como por la influencia de las corrientes, haciendo que los microplásticos se mantengan en constante movimiento (Van Cauwenberghe et al., 2015).

El promedio de partículas plásticas encontradas en la superficie del agua de las lagunas Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija (1.363, 1.253, 2.127 y 1.333 MPs/L, respectivamente) se ubica dentro del rango reportado en estudios previos, particularmente en la investigación de D'Avignon, et al. (2022), quienes documentaron un promedio de 1.9 MPs/L al integrar los resultados obtenidos en distintas lagunas a nivel internacional. De esta manera, los valores registrados en las lagunas del sur de Quintana Roo resultan acordes con lo señalado en la literatura, ya que no se encontraron diferencias en relación con el promedio global reportado (D'Avignon et al., 2022).

Las concentraciones de microplásticos registradas en el presente estudio ponen de evidencian la eficiencia del uso de la red de plancton como método de muestreo para la recolección de este tipo de contaminantes. Diversos autores han señalado que este instrumento permite una recuperación significativamente mayor de microplásticos en comparación con otros tipos de redes; por ejemplo, Correia Prata et al. (2019) reportan que la eficiencia de captura puede ser hasta 30 veces mayor, lo que se atribuye a su mayor capacidad para retener partículas de menor tamaño. De manera consistente, autores de trabajos similares con MPs señalan que las técnicas más empleadas y con alto grado de efectividad son las utilizadas en este trabajo (Alfonso et al., 2020; Arcadio et al., 2023). Ejemplo de ello es el trabajo realizado por Tran-Nguyen et al. (2024) quienes emplearon también una red de plancton, con un tamaño de malla de 80 μm, para la filtración de muestras de agua con ayuda de una cubeta de acero inoxidable, lo que respalda el uso de este método como una técnica adecuada y ampliamente aceptada en estudios sobre microplásticos.

9.2. Sedimento superficial

Las muestras de sedimento recolectadas en cada laguna evidenciaron una predominancia de fibras azules respecto a otras formas y colores, esto coincide con diversos estudios en ambientes costeros que han identificado mayor concentración de fibras que de fragmentos en

sedimentos (Sánchez-Campos et al., 2024). El enriquecimiento de fibras en los sedimentos podría estar relacionada a su mecanismo de deposición, ya que las fibras en suspensión son removidas del agua y quedan atrapadas entre los granos de arena. Su forma alargada facilita su sedimentación (López Cuevas, 2023). Además, la dominancia de fibras está relacionada al lavado de ropa sintética y a la descarga de aguas residuales.

La baja concentración de microplásticos observada podría estar relacionada al tipo de sedimento que presentan las lagunas muestreadas. Debido a que en algunos estudios mencionan que el tamaño del grano puede influir en la deposición de MPs en los sedimentos, es decir, hay diferente acumulación según el tamaño de grano (Alomar et al., 2016; López Cuevas, 2023). En este estudio se infiere que las lagunas como El Ocho y Lagartija al presentar sedimentos más finos podrían retener menor número de microplásticos, mientras que las laguna Bacalar al presentar sedimentos con granulometría más gruesa pueden favorecer su acumulación. Se observó que en la Laguna de Bacalar que presenta sedimentos gruesos en forma de arena principalmente frente a la ciudad de Bacalar (Tobón Velázquez, 2018), hubo mayor concentración de microplásticos en comparación con las demás lagunas que poseen sedimentos reconocidos como limo y arcilla, y con alto contenido de materia orgánica. Esta interpretación coincide con lo reportado por Sánchez-Campos et al. (2024) para la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, donde el sedimento superficial presentó un alto porcentaje de partículas finas (limos y arcillas), una característica similar a la observada en este estudio. Sin embargo, a diferencia de lo observado en las lagunas del sur de Quintana Roo, dichos autores reportaron un mayor número de microplásticos en el sedimento que en el agua, resultado que concuerda con lo descrito por Acosta González et al. (2022), quienes señalan que la concentración de microplásticos en los sedimentos es superior a la del agua. Lo que sugiere que además del tamaño de grano, otros factores como las fuentes de contaminación, la dinámica hidrológica y la actividad humana podrían influir significativamente en la acumulación de microplásticos.

Al comparar la concentración media de microplásticos en el sedimento registrado en las lagunas Sabana, Bacalar, El Ocho y Lagartija (82.7, 144, 17.3, 38.7 MPs/kg, respectivamente) con el promedio global de 359 MPs/kg reportado por diversos estudios (D'Avignon et al., 2022; Acosta González et al., 2022), se observa que las concentraciones encontradas en las lagunas analizadas son bajas. Sin embargo, las concentraciones medias de microplásticos registradas en

las lagunas de este estudio resultan comparables con investigaciones realizadas en ambientes marinos y zonas costeras. Esto resulta relevante si se considera que dichos sistemas presentan una gran conectividad e interacción con precursores de microplásticos como las corrientes marinas lo que demuestra lo alarmante que puede ser los niveles de MPs contenidos en los lagos interiores (Cofano et al., 2023; Islam et al., 2022).

Además, existen diferentes métodos para la extracción de microplásticos del sedimento, como pueden ser con el uso de NaCl y NaI. La baja concentración de microplásticos registrada en los sedimentos analizados podría estar relacionado al método empleado, ya que la utilización de NaCl como solución de separación puede presentar una eficiencia limitada, lo que implica que una fracción de los microplásticos presentes no logre mantenerse en suspensión. De acuerdo con lo reportado por Velázquez Ferrera (2024), el NaI presenta una mayor eficiencia en la recuperación de microplásticos, al favorecer una mejor suspensión de las partículas, asimismo, la combinación de ambas soluciones puede incrementar aún más la eficiencia del proceso. No obstante, en este estudio se optó por el uso de NaCl debido a su valor económico, lo que lo hace más accesible, convirtiéndolo en una de las técnicas más ampliamente empleadas por diversos autores a nivel global (Van Cauwenberghe et al., 2015; López Cuevas, 2023; Blumenröder et al., 2017; Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018).

En cuanto a los riesgos ecológicos, la presencia de microplásticos en el agua y en los sedimentos tiene consecuencias negativas para la biota acuática. Diversos estudios han demostrado que muchos de los organismos que habitan los ambientes acuáticos están ingiriendo microplásticos, ya que los han encontrado dentro de su sistema digestivo y otros órganos, incluyendo humanos (Hernández Hernández & Damián Pérez, 2018; Abbas et al., 2025). Muchos peces, crustáceos, moluscos y organismos planctónicos ingieren las partículas plásticas, debido a que estas tienen un tamaño micrométrico, lo que les permite introducirse dentro de diferentes organismos. Asimismo, la ingesta por parte de estos organismos, puede causar problemas en el funcionamiento digestivo, disminuir la reproducción y crecimiento de las especies (Acosta González et al., 2022).

En este trabajo se destaca la relevancia del estudio de microplásticos y de la problemática que representan para los cuerpos de agua interiores, explorándose muy poco las alternativas de solución para la extracción y captura de MPs. Diversos estudios se han enfocado en la

realización de métodos para la captura de microplásticos mediante filtros creados con materiales como polipropileno, fibras ópticas, entre otros (Sarsour et al., 2025; Zaca-Morán et al., 2025; Barros & Ricardo, 2024), sin embargo, además de combatir el problema de microplásticos, añaden más contaminación, ya que estos están creados con polímeros plásticos. Por tal motivo, en este estudio se propone el uso de métodos sostenibles; la realización de filtros para la captura de MPs hechos a base de fibras naturales/orgánicas, para evitar contaminar más y capturar el mayor número de microplásticos.

10. Conclusión

Los resultados obtenidos en el presente trabajo evidenciaron la presencia de microplásticos en todas las lagunas analizadas, sin que se observaran diferencias significativas entre ellas, lo que indica una distribución relativamente homogénea de estas partículas en los ambientes acuáticos continentales del sur de Quintana Roo. Este patrón sugiere que los microplásticos están llegando a todos los sistemas acuáticos, indicando que el tamaño de la población y la cercanía de las lagunas a asentamientos urbanos no están relacionados a la abundancia de microplásticos, es decir, no influyen en un aumento de estos.

Asimismo, las concentraciones de microplásticos en el sedimento resultaron bajas en comparación con los valores reportados a nivel global, mientras que las concentraciones en el agua fueron similares a las registradas en otros sistemas acuáticos alrededor del mundo. Estos resultados confirman que los sistemas dulceacuícolas de la región presentan niveles de contaminación por microplásticos comparables a los observados en ambientes marinos, lo cual constituye una preocupación ambiental debido a los posibles efectos adversos que estas partículas pueden ocasionar sobre la biota acuática y la salud humana.

Si bien los resultados obtenidos en el presente trabajo demuestran la presencia y abundancia de microplásticos para las lagunas de nuestra región, se recomienda que para futuros trabajos se incluyan gradientes de contaminación e impacto humano, incrementando el número de sistemas en el área de estudio y el número de sitios dentro de los sistemas, tomando en cuenta los vertientes de entrada y salidas de agua, reconociéndose la trazabilidad de concentración y fuentes de los MPs.

La homogeneidad y persistencia de los microplásticos en las lagunas del sur de Quintana Roo ponen en evidencia la necesidad de implementar estrategias para la mitigación de esta problemática y posibles campañas de concientización social para reducir la entrada de plásticos a los ecosistemas acuáticos.

11. Referencias

Abbas, G., Ahmed, U., & Ahmad, M. A. (2025). Impact of Microplastics on Human Health: Risks, Diseases, and Affected Body Systems. *Microplastics*, *4*(2), 23. https://doi.org/10.3390/microplastics4020023

Acosta González, G., Carrillo Rosales, D. V., & Caballero Vázquez, A. (2022). Microplásticos en agua y en organismos. *Ciencia*, *73*(2), 14-21. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_2/PDF/04_73_2_1431_Microplasticos_Agua.pdf

Alfonso, M. B., Scordo, F., Seitz, C., Mavo Manstretta, G. M., Ronda, A. C., Arias, A. H., Tomba, J. P., Silva, L. I., Perillo, G. M. E., & Piccolo, M. C. (2020). First evidence of microplastics in nine lakes across Patagonia (South America). *Science of The Total Environment*, *733*, 139385. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139385

Alomar, C., Estarellas, F., & Deudero, S. (2016). Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Marine Environmental Research*, *115*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.01.005

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, *62*(8), 1596-1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Arcadio, C. G. L. A., Navarro, C. K. P., Similatan, K. M., Inocente, S. A. T., Ancla, S. M. B., Banda, M. H. T., Capangpangan, R. Y., Torres, A. G., & Bacosa, H. P. (2023). Microplastics in surface water of Laguna de Bay: First documented evidence on the largest lake in the Philippines. *Environmental Science and Pollution Research International*, *30*(11), 29824-29833. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24261-5

Baron, J., Poff, L., Angermier, P., Dahm, C., Gleick, P., Hairston, N., Jackson, R., Johnston, C., Richter, B., & Steinman, A. (2003). Ecosistemas de agua dulce sustentables. *Ecological Society of America*, *10*. https://esa.org/wp-content/uploads/2013/03/issue10.pdf

Barros, L., & Ricardo, A. (2024). *Construcción de un filtro piloto para reducir la contaminación por microplástico en las aguas del Parque Histórico de Samborondón*. Universidad Politécnica Salesiana.

Blumenröder, J., Sechet, P., Kakkonen, J. E., & Hartl, M. G. J. (2017). Microplastic contamination of intertidal sediments of Scapa Flow, Orkney: A first assessment. *Marine Pollution Bulletin*, *124*(1), 112-120. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.07.009

Borges Ramirez, M. M., Dzul Caamal, R., & Rendón von Osten, J. (2019). Occurrence and seasonal distribution of microplastics and phthalates in sediments from the urban channel of the Ria and coast of Campeche, Mexico. *Science of The Total Environment*, *672*, 97-105. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.472

Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Cole, M., Hopkins, F. E., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2020). Bioavailability of Microplastics to Marine Zooplankton: Effect of Shape and

Infochemicals. *Environmental Science & Technology*, *54*(19), 12024-12033. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02715

Cera, A., Cesarini, G., & Scalici, M. (2020, julio 9). *Microplastics in Freshwater: What Is the News from the World?* https://www.mdpi.com/1424-2818/12/7/276

Chico-Ortiz, N., Mahu, E., Crane, R., Gordon, C., & Marchant, R. (2020). Microplastics in Ghanaian coastal lagoon sediments: Their occurrence and spatial distribution. *Regional Studies in Marine Science*, *40*, 101509. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101509

Cofano, V., Mele, D., Lacalamita, M., Di Leo, P., Scardino, G., Bravo, B., Cammarota, F., & Capolongo, D. (2023). Microplastics in inland and offshore sediments in the Apulo-Lucanian region (Southern Italy). *Marine Pollution Bulletin*, *197*, 115775. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115775

Cohuo Durán, S., Pérez Tapia, M. A., Macario González, L. A., & Ortíz León, H. J. (2020). Humedal la Sabana Chetumal ¿qué sabemos y qué podemos hacer? *Ava Cicnt*, *11*(2), 150-158.

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, *62*(12), 2588-2597. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

Correia Prata, J. C., da Costa, J. P., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *110*, 150-159. https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029

Curillo García, J. M. (2021). *Revisión sistemática de la información existente sobre las metodologías aplicadas en el estudio de microplásticos en los ecosistemas costeros de cinco países identificados en Latinoamérica, Europa y Asia* [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal "Península de Santa Elena"]. https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6612/1/UPSE-TBM-2021-0018.pdf

D'Avignon, G., Gregory-Eaves, I., & Ricciardi, A. (2022). Microplastics in lakes and rivers: An issue of emerging significance to limnology. *Environmental Reviews*, *30*(2), 228-244. https://doi.org/10.1139/er-2021-0048

Elias, R. (2015). Mar del plástico: Una revisión del plástico en el mar. *Rev. Invest. Desarr. Pesq.*, *27*, 83-105.

Flores-Rodríguez, J. R., Gonzalez Vera, M. A., & Oropeza-García, N. A. (2022). *Aplicación de tecnologías geoespaciales en el estudio del humedal urbano La Sabana de Chetumal, Q. Roo, México.* https://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/4160

Gobierno de México. (2021, julio 15). *Los estromatolitos, primeros formadores de zonas arrecifales*. gob.mx. http://www.gob.mx/semarnat/articulos/los-estromatolitos-primeros-formadores-de-zonas-arrecifales

Gómez Pech, E. H., Barrasa García, S., García de Fuentes, A., Gómez Pech, E. H., Barrasa García, S., & García de Fuentes, A. (2018). Paisaje litoral de la Laguna de Bacalar (Quintana Roo, México):

Ocupación del suelo y producción del imaginario por el turismo. *Investigaciones geográficas*, *95*, 0-0. https://doi.org/10.14350/rig.59594

Gong, J., & Xie, P. (2020). Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics. *Chemosphere*, *254*, 126790. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126790

Hernández Hernández, E., & Damián Pérez, D. F. (2018). *Evaluación de microplásticos en sedimentos del Río Tecate* [Tesisi de ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California]. https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/20deb30a-6a75-49ad-ac38-5231d76b8b7a/content

Islam, M. S., Islam, Z., & Hasan, Md. R. (2022). Pervasiveness and characteristics of microplastics in surface water and sediment of the Buriganga River, Bangladesh. *Chemosphere*, *307*, 135945. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135945

Ivar do Sul, J. A., & Costa, M. F. (2014). The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution*, *185*, 352-364. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036

Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., & Klobučar, G. (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, *250*, 831-838. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055

Kunz, A., Schneider, F., Anthony, N., & Lin, H.-T. (2023). Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways. *Environmental Pollution*, *321*, 121096. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121096

López Cuevas, D. L. (2023). *Reconstrucción temporal de la concentración de microplásticos en sedimentos de la Laguna Estero de Urías, Sinaloa.* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México]. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000839930/3/0839930.pdf

Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015). Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, *5*(1), 14947. https://doi.org/10.1038/srep14947

Ma, H., Chao, L., Wan, H., & Zhu, Q. (2024). Microplastic Pollution in Water Systems: Characteristics and Control Methods. *Diversity*, *16*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/d16010070

Nel, H. A., Dalu, T., & Wasserman, R. J. (2018). Sinks and sources: Assessing microplastic abundance in river sediment and deposit feeders in an Austral temperate urban river system. *Science of The Total Environment*, *612*, 950-956. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.298

Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., Parra-Tabla, V., Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., & Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, *91*. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883

Palafox-Juárez, E. B., Herrera-Silveira, J., Teutli-Hernández, C., Callejas-Jiménez, M. E., & Torrescano-Valle, N. (2022). Manglares y Humedales de Bacalar, Quintana Roo. *Colegio de la Frontera Sur*. https://www.ecosur.mx/lagunabacalar/wp-content/uploads/sites/54/2024/05/Manglares-y-Humedales-de-Bacalar_BD-y-Metadatos.pdf

Quesadas-Rojas, M., Enriquez, C., & Valle-Levinson, A. (2021). Natural and anthropogenic effects on microplastic distribution in a hypersaline lagoon. *Science of The Total Environment*, *776*, 145803. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145803

Ramírez-Álvarez, N., Rios Mendoza, L. M., Macías-Zamora, J. V., Oregel-Vázquez, L., Alvarez-Aguilar, A., Hernández-Guzmán, F. A., Sánchez-Osorio, J. L., Moore, C. J., Silva-Jiménez, H., & Navarro-Olache, L. F. (2020). Microplastics: Sources and distribution in surface waters and sediments of Todos Santos Bay, Mexico. *Science of The Total Environment*, *703*, 134838. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134838

Rodrigues, C., Rodríguez, Y., Frias, J., Carriço, R., Sobral, P., Antunes, J., Duncan, E. M., & Pham, C. K. (2024). Microplastics in beach sediments of the Azores archipelago, NE Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, *201*, 116243. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116243

Sánchez-Campos, M., Ponce-Vélez, G., Sanvicente-Añorve, L., & Alatorre-Mendieta, M. (2024). Microplastic contamination in three environmental compartments of a coastal lagoon in the southern Gulf of Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(11), 1012. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13156-2

Sarsour, J., Ewert, B., Janisch, B., Stegmaier, T., & Gresser, G. T. (2025). Efficient Filtration Systems for Microplastic Elimination in Wastewater. *Microplastics*, *4*(3), 36. https://doi.org/10.3390/microplastics4030036

Sevwandi Dharmadasa, W. L. S., Andrady, A. L., Kumara, P. B. T. P., Maes, T., & Gangabadage, C. S. (2021). Microplastic pollution in Marine Protected Areas of Southern Sri Lanka. *Marine Pollution Bulletin*, *168*, 112462. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112462

Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodriguez-Espinosa, P. F., & Rodríguez-González, F. (2019). Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *Science of The Total Environment*, *654*, 154-163. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054

Silburn, B., Bakir, A., Binetti, U., Russell, J., Kohler, P., Preston-Whyte, F., Meakins, B., van Hoytema, N., Andrews, G., Carrias, A., & Maes, T. (2023). A baseline study of macro, meso and micro litter in the Belize River basin, from catchment to coast. *ICES Journal of Marine Science*, *80*(8), 2183-2196. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab268

Sterner, R. W., Keeler, B., Polasky, S., Poudel, R., Rhude, K., & Rogers, M. (2020). Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosystem Services*, *41*, 101046. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101046

Tobón Velázquez, N. I. (2018). *Hidroquímia y caracterización del sedimento carbonatado del sur de la Laguna de Bacalar* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Tran-Nguyen, Q. A., Le, T. M., Nguyen, H. N. Y., Nguyen, Q. T., & Trinh-Dang, M. (2024). Microplastics in the surface water of urban lakes in central Vietnam: Pollution level, characteristics, and ecological risk assessment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *9*, 100622. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100622

Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbens, J., & Janssen, C. R. (2015). Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects. *Marine Environmental Research*, *111*, 5-17. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.007

Velázquez Ferrera, M. E. (2024). *Desarrollo y evaluación de la metodología de extracción de microplásticos en sedimentos marinos* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/4157/1/tesis_Mar%C3%ADa%20Elena%20Velazquez%20Ferrera_23%20ago%202024.pdf

Woodall, L. C., Gwinnett, C., Packer, M., Thompson, R. C., Robinson, L. F., & Paterson, G. L. J. (2015). Using a forensic science approach to minimize environmental contamination and to identify microfibres in marine sediments. *Marine Pollution Bulletin*, *95*(1), 40-46. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.044

Zaca-Morán, R., Guzmán-Barraza, A., Zaca-Morán, P., Padilla-Martínez, J. P., & Ortega-Mendoza, J. G. (2025, enero). Técnica innovadora para la captura de microplásticos en aguas contaminadas usando fibras ópticas. *RD-ICUAP*, *31*, 11-20.

12. Anexos

Tabla 9. Tamaño poblacional (datos tomados de INEGI) y la abundancia de microplásticos en agua y sedimento en las lagunas

Laguna	Sitio	Población	Abundancia-Sedimento	Abundancia-Agua
Sabana	1	100000	16	243
Sabana	2	100000	28	117
Sabana	3	100000	80	49
Bacalar	1	12000	104	139
Bacalar	2	12000	90	151
Bacalar	3	12000	22	86
El Ocho	1	1000	3	145
El Ocho	2	1000	13	338
El Ocho	3	1000	10	155
Lagartija	1	10	30	115
Lagartija	2	10	16	171
Lagartija	3	10	12	114

Tabla 10. Cantidad de microplásticos en cada laguna por forma en agua

	Sabana	Bacalar	Laguna del Ocho	Lagartija
Fibra	386	347	606	384
Fragmento	22	24	22	16
Espuma	1	0	0	0
Película	0	5	10	0

Tabla 11. Cantidad de microplásticos en cada laguna por color en agua

	Sabana	Bacalar	Laguna del Ocho	Lagartija
Transparente	33	62	68	61
Azul	237	239	256	235
Negro	79	49	165	64
Rojo	26	18	11	36
Verde	29	5	137	3
Amarillo	0	3	1	1
Blanco	5	0	0	0

Tabla 12. Cantidad de microplásticos en cada laguna por forma en sedimento

	Sabana	Bacalar	Laguna del Ocho	Lagartija
Fibra	117	174	22	47
Fragmento	4	19	3	2
Espuma	0	21	0	0
Película	3	2	1	9

Tabla 13. Cantidad de microplásticos en cada laguna por color en sedimento

	Sabana	Bacalar	Laguna del Ocho	Lagartija
Transparente	63	16	4	18
Azul	45	107	19	22
Negro	7	27	0	6
Rojo	8	32	3	12
Verde	1	0	0	0
Amarillo	0	14	0	0
Blanco	0	20	0	0

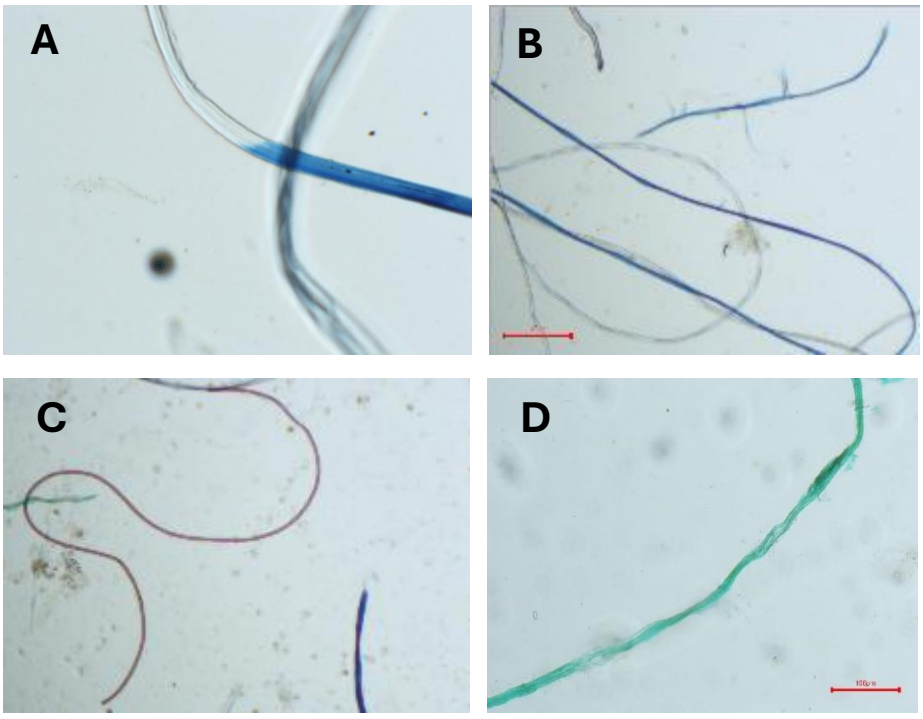


Figura 9. A. Fibra azul decolorándose. B. Fibras azules. C. Fibra roja. D. Fibra verde

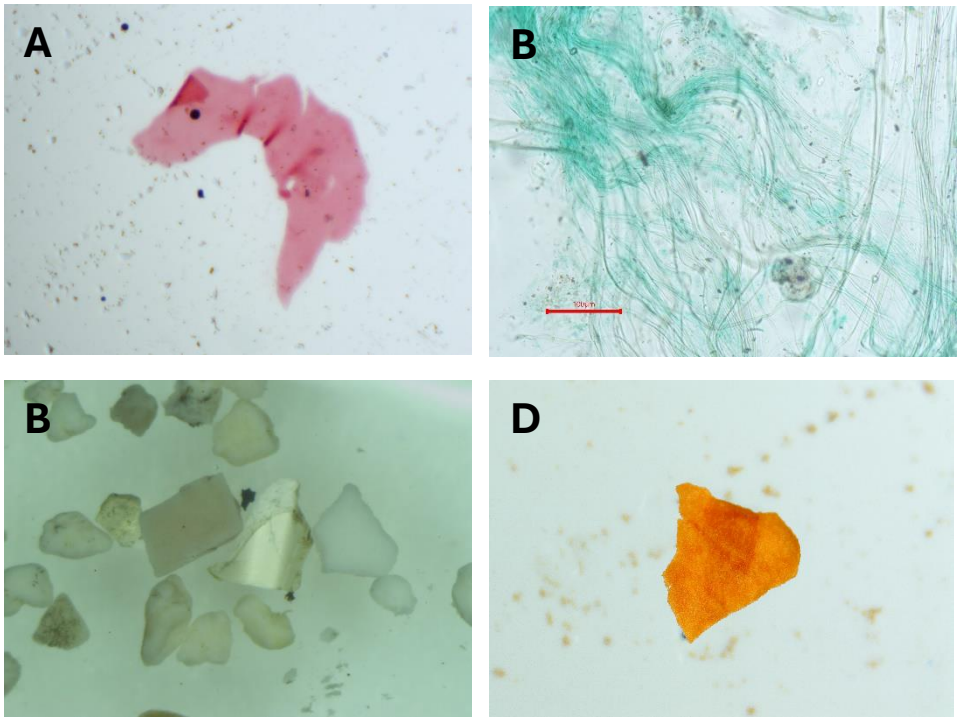


Figura 10. A. Fragmento rojo. B. Haz de fibras verdes. C. Fragmentos. D. Fragmento amarillo



Figura 11. A. Frascos de vidrio con sedimento. B. Frascos de vidrio con agua